



**Subvention accordée par la Région wallonne
à un Centre de Recherche Agréé
Dans le cadre d'une Recherche collective**

'Ciments ternaires à haute teneur en calcaire'

CemCalc II

Rapport scientifique et technique annuel

N° 2

période du 01/05/2013 au 30/04/2015 prolongé au 31/08/15

Numéro de convention

1217819

Recherche collective (biennale 2013-2015)

Table des Matières

INTRODUCTION GÉNÉRALE	7
RÉSULTATS ET DISCUSSIONS	11
1 Tâche 1 : Sélection des cendres volantes	11
2 Tâche 2 : Caractérisation des constituants des ciments ternaires et des ciments de référence.....	11
2.1 Méthodologie.....	11
2.1.1 Détermination de la finesse.....	11
2.1.2 Caractérisation physico-chimique	15
2.1.3 Indice d'activité des cendres volantes.....	17
2.2 Ciments industriels de référence	18
2.2.1 Détermination de la finesse.....	18
2.2.2 Analyse chimique	18
2.2.3 Analyse minéralogique	21
2.3 Caractérisation des cendres volantes classiques et de co-combustion.....	22
2.3.1 Détermination de la finesse.....	22
2.3.2 Analyse chimique	23
2.3.3 Analyse minéralogique	24
2.3.4 Test d'activité.....	26
2.3.5 Evaluation environnementale des cendres volantes.....	26
2.4 Caractérisation des autres constituants	29
2.4.1 Détermination de la finesse.....	29
2.4.2 Granulométrie.....	29
2.4.3 Granulo-morphologie par analyse d'images	30
2.4.4 Surface spécifique.....	34
2.4.5 Analyse chimique	34
2.4.6 Analyse minéralogique	36
2.5 Caractérisation des ciments de laboratoire anhydres	41
2.6 Ciments à base de la cendre volante de combustion classique CV1	43
2.6.1 Détermination de la finesse.....	43
2.6.2 Analyse chimique	44
2.6.3 Analyse minéralogique	46
2.7 Ciments à base de la cendre volante de co-combustion CVco1.....	48
2.7.1 Détermination de la finesse.....	48
2.7.2 Analyse chimique	49
2.7.3 Analyse minéralogique	50
2.8 Ciments à base de la cendre volante de combustion classique CV2	52
2.8.1 Détermination de la finesse.....	52
2.8.2 Analyse chimique	53
2.8.3 Analyse minéralogique	54
2.9 Etude de l'influence de la composition du filler calcaire	56
2.9.1 Détermination de la finesse.....	56
2.9.2 Analyse chimique	56
2.9.3 Analyse minéralogique	59
3 Tâche 3 : Evaluation des performances des nouveaux ciments ternaires	61

3.1	Méthodologie	62
3.1.1	Caractérisation physico-mécanique	62
3.1.1	Détermination des résistances mécaniques (flexion et compression).....	63
3.2	Ciments industriels de référence	63
3.2.1	Calorimétrie Langavant.....	63
3.2.2	Temps de prise,.....	65
3.2.3	Résistances mécaniques	66
3.3	Ciments à base de la cendre volante de combustion classique CV1	67
3.3.1	Calorimétrie Langavant.....	67
3.3.2	Temps de prise,.....	71
3.3.3	Résistances mécaniques	72
3.4	Ciments à base de la cendre volante de co-combustion CVco1	75
3.4.1	Calorimétrie Langavant.....	75
3.4.2	Temps de prise,.....	78
3.4.3	Résistances mécaniques	79
3.5	Ciments à base de la cendre volante de combustion classique CV2	82
3.5.1	Calorimétrie Langavant.....	82
3.5.2	Temps de prise,	85
3.5.3	Résistances mécaniques	86
3.6	Sélection de cinq compositions.....	89
3.7	Etude de l'influence de la composition du filler calcaire	90
3.7.1	Calorimétrie Langavant.....	90
3.7.2	Temps de prise,	91
3.7.3	Résistances mécaniques	92
3.8	Conclusions.....	95
4	Tâche 4: Etude de l'activation chimique des ciments	96
4.1	Méthodologie	96
4.2	Introduction.....	97
4.3	Phase 1	97
4.3.1	Choix des matériaux (activateurs et ciments ternaires).....	97
4.3.2	Confection des éprouvettes de mortier	98
4.3.3	Mesures de flexion et compression.....	100
4.3.4	Interprétation des résultats	100
4.3.5	Différence d'activation entre les ciments CEM1 et CEM12.....	102
4.3.6	CaSO ₄ et NaOH	102
4.3.7	Na ₂ SO ₄	106
4.4	Phase 2	106
4.4.1	Protocole expérimental	106
4.4.2	Résultats des essais sans activation.....	107
4.4.3	Analyse des résultats concernant les ciments provenant de CEMCALC 1.....	107
4.4.4	Analyse des résultats concernant les ciments provenant de CEMCALC 2.....	109
4.4.5	Comparaison des résultats entre les ciments provenant de CEMCALC 1 et de CEMCALC 2.....	113
4.5	Conclusions.....	114
5	Tâche 5 – Etude de la compatibilité ciments/superplastifiants	116
5.1	Introduction.....	116
5.2	Etude sur mortiers.....	116

5.2.1	Introduction	116
5.2.2	Principe et conditions de l'essai	116
5.2.3	Résultats.....	117
5.3	Etude sur bétons	124
5.3.1	Introduction	124
5.3.2	Composition des bétons	124
5.3.3	Etude de la compatibilité ciment/superplastifiant.....	126
5.3.4	Analyse des résultats	128
5.4	Conclusions.....	132
6	Tâche 6 – Evaluation comparative des performances mécaniques et de durabilité des nouveaux ciments ternaires (sur béton).....	134
6.1	Tâche 6.1 – Formulation et confection des bétons et mortiers	134
6.1.1	Introduction	134
6.1.2	Formulation et confection des bétons.....	134
6.1.3	Confection et cure des mortiers	141
6.1.4	Conclusions	143
6.2	Tâche 6.2 – Performances physico-mécaniques.....	144
6.2.1	Introduction	144
6.2.2	Caractérisation des bétons à l'état frais	145
6.2.3	Essai de prise.....	148
6.2.4	Résistance à la compression	152
6.2.5	Résistance à la flexion.....	162
6.2.6	Résistance à la traction par fendage.....	166
6.2.7	Module d'élasticité	170
6.2.8	Retrait	177
6.2.9	Fluage.....	183
6.2.10	Conclusions	187
6.3	Tâche 6.3– Performances de durabilité	194
6.3.1	Introduction	194
6.3.2	Résistance à la carbonatation.....	196
6.3.3	Résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage	208
6.3.4	Résistance aux cycles de gel-dégel interne.....	214
6.3.5	Résistance à la diffusion des chlorures.....	220
6.3.6	Résistance aux attaques sulfatiques.....	230
6.3.7	Absorption d'eau	246
6.3.8	Perméabilité à l'oxygène.....	249
6.3.9	Conclusions	256
7	Tâche 7 – Etablissement de règles technologiques.....	267
7.1	Introduction.....	267
7.2	La spécification d'un béton	267
7.3	Exigences en matière de durabilité pour les classes d'exposition et d'environnement	269
7.4	Les différents types de béton de la recherche.....	269
7.5	Les règles technologiques des nouveaux ciments	270
	CONCLUSIONS GÉNÉRALES	275
	BIBLIOGRAPHIE	279
	ANNEXES.....	285

INTRODUCTION GÉNÉRALE

Les projets CEMCALC I et CEMCALC II s'inscrivent dans une dynamique environnementale. En effet, l'utilisation d'ajouts cimentaires pour substituer partiellement le clinker permet de diminuer les émissions de CO₂ dues à la production de ciment.

Les ajouts cimentaires les plus couramment utilisés jusqu'à présent sont les cendres volantes (sous-produit des centrales thermiques) et/ou le laitier de haut-fourneau (sous-produit de l'industrie sidérurgique). Une baisse importante de l'activité sidérurgique et des centrales thermiques en Belgique rend toutefois ces sous-produits plus rares. A l'inverse, le calcaire broyé et les fillers calcaires sont disponibles en abondance en Wallonie. C'est dans ce contexte que le projet CEMCALC a été initié en vue d'étudier le comportement de ciments ternaires plus riches en filler calcaire que les ciments courants.

Le projet CEMCALC II (biennale 2013-2015) est complémentaire au projet CEMCALC I (biennale 2010-2012). Dans le cadre de CEMCALC I, des ciments ternaires à base de clinker, filler calcaire et laitier étaient étudiés. Pour CEMCALC II, le laitier est remplacé par trois cendres volantes de provenance différente.

La Figure 0-1 montre où se situent les CEM I et les ciments industriels déjà existants composés de clinker, cendre volante ou pouzzolane naturelle et de filler calcaire.

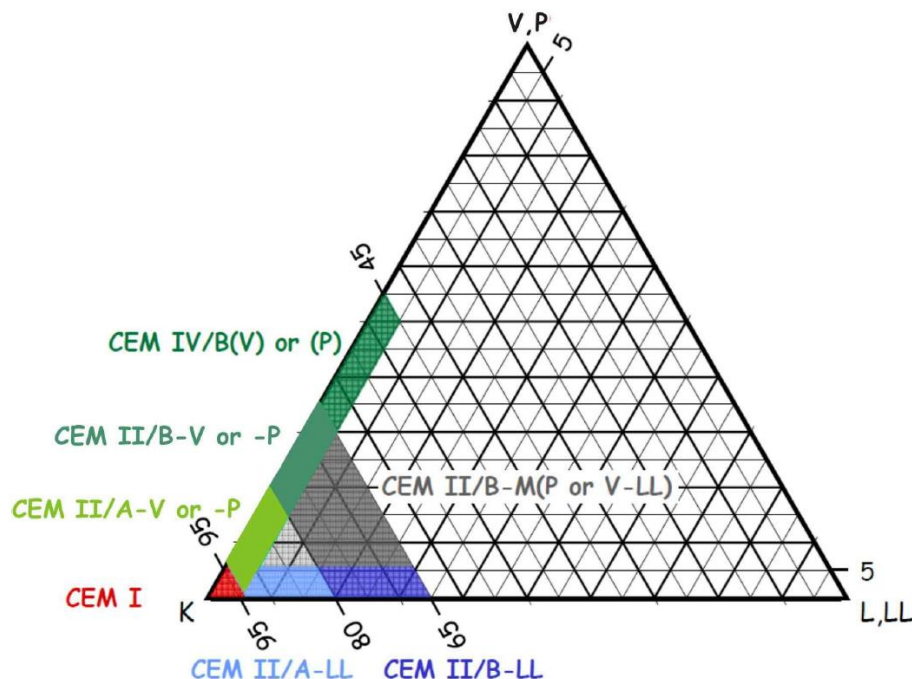


Figure 0-1 – Situation de ciments industriels dans le diagramme ternaire K-V-L [i]

Avec : K : clinker ; V : cendre volante ; P : pouzzolane, L : filler calcaire dont le TOC < 0.5wt% et LL : filler calcaire dont le TOC < 0.2wt%

La Figure 0-2, quant à elle, indique où se situe la zone étudiée dans le cadre du projet CEMCALC II au sein du même diagramme ternaire.

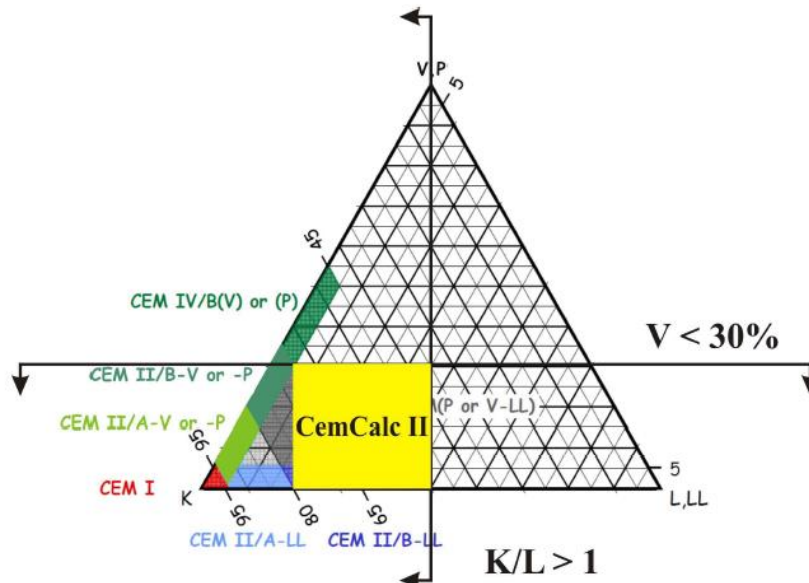


Figure 0-2 – Situation du projet CEMCALC II dans le diagramme ternaire K-V-L

Avec : K : clinker ; V : cendre volante ; P : pouzzolane, L : filler calcaire dont le TOC < 0.5wt% et LL : filler calcaire dont le TOC < 0.2wt%

Les cendres volantes sont le résidu fin du dépoussiérage des fumées rejetées par les centrales thermiques utilisant comme combustible du charbon pulvérisé en présence éventuellement de co-combustibles. Elles sont obtenues par précipitation électrostatique ou mécanique des particules pulvérulentes de ces fumées.

Selon leur emploi, les cendres volantes doivent répondre aux critères de deux normes différentes :

- Norme EN 197-1 pour les cendres incorporées directement dans les ciments [ii] ;
- Norme EN 450-1 pour les cendres incorporées dans les bétons [iii]. Cette norme donnant plus de critères, nous l'utilisons à plusieurs reprises dans ce travail pour disposer de valeurs repères.

Il existe deux principaux types de cendres volantes :

- Les **cendres volantes siliceuses** (V) qui ont des propriétés pouzzolaniques et sont essentiellement constituées de silice réactive (SiO_2 réactive de 25,0wt% minimum) et d'alumine (Al_2O_3). Leur proportion de chaux réactive (CaO réactive) doit être inférieure à 10,0wt% et leur teneur en chaux libre (CaO libre) doit être plus petite qu'1,0wt%. (EN 197-1 [ii])
- Les **cendres volantes calciques** (W) qui ont des propriétés hydrauliques et/ou pouzzolaniques et sont principalement constituées de chaux réactive, de silice et d'alumine. Leur proportion en chaux réactive est supérieure à 10,0wt%. Les cendres calciques contenant de 10,0 à 15,0wt% de chaux réactive doivent contenir au moins 25,0wt% de silice réactive. (EN 197-1 [ii])

Un liant est dit *pouzzolanique* si son mélange avec de la chaux et de l'eau engendre la formation de composés stables (prise) qui peuvent agglomérer les constituants d'un mélange.

Un liant est dit *hydraulique* lorsqu'au contact de l'eau, il forme des composés stables (prise) qui sont capables d'agglomérer les constituants d'un mélange. Le ciment Portland en est un exemple.

Le refroidissement des particules dans les gaz d'extraction confère aux cendres volantes une forme sphérique dont le diamètre est compris entre 0,01 et 100 µm. Certaines d'entre elles sont solides ou creuses, il s'agit des *cénosphères*. D'autres sont remplies de particules amorphes, ce sont les *plérosphères*. [iv ; v]

La composition chimique et minéralogique des cendres volantes peut fluctuer selon la composition du minerai initial, des conditions de combustion, du type de traitement des émissions et des conditions de stockage. Cela aura un impact sur leurs propriétés physico-chimiques et minéralogiques [vi ; iv].

Le filler calcaire est quant à lui un matériau inerte mais qui a un effet positif au niveau de la durabilité des bétons de par sa finesse qui permet d'obtenir un matériau plus compact et moins perméable aux agents agressifs.

Le présent rapport présente l'ensemble des résultats obtenus au cours des deux années de recherche du projet CEMCALC II. Ce projet s'est réalisé en sept tâches. Il a fallu tout d'abord sélectionner des cendres à étudier au cours du projet, à savoir deux cendres de combustion classique et une cendre de co-combustion. Comme dans le cadre de CEMCALC I, deux fillers calcaires ont été étudiés : un premier filler très pauvre en impuretés et un deuxième filler issu de concassage. Les différents matériaux de départ ont été caractérisés puis ont servi à fabriquer des ciments dont les performances mécaniques et de durabilité ont été évaluées sur mortier et béton. Le but étant d'évaluer quelles formulations pourraient être utilisées à l'échelle industrielle et pour quelles applications. Trois types de bétons (rapports E/C différents) ont été réalisés ainsi que deux cures, une considérée comme « bonne cure » et l'autre définie comme « mauvaise cure ».

Une étude de l'activation chimique des cendres volantes a également été menée en vue de trouver une solution à la lenteur de la réaction pouzzolanique des cendres volantes. D'autre part, la compatibilité de deux superplastifiants avec les nouveaux ciments ternaires a été étudiée sur mortier et béton.

RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

1 Tâche 1 : Sélection des cendres volantes

Trois cendres ont été étudiées dans le cadre de cette recherche :

- CV1 : Cendre Volante thermique de combustion classique de type A provenant de France (500 kg) ;
- CV co1 : Cendre Volante de 8 à 12,5% co-combustion de bois provenant de Belgique (50 kg) ;
- CV2 : Cendre Volante thermique de combustion classique de type A provenant d'Allemagne (1 T).

Ces trois cendres ont été évaluées sur mortier avec douze compositions.

La quantité reçue de la cendre de co-combustion était insuffisante pour la phase béton et nous n'avons pas réussi à en obtenir d'avantage. Nous avons constaté que suite à des décisions politiques, le procédé de co-combustion est actuellement en disparition en Belgique et dans les pays limitrophes.

Nous avons dès lors décidé de cibler le projet sur une seule cendre de combustion classique (CV2) pour l'étude de l'influence de la composition du filler calcaire et pour les essais sur béton. Cela nous a permis de sélectionner plus de compositions de ciment que les trois prévues initialement (cinq comme dans le cas de CEMCALC I auxquelles on a ajouté la formulation du CEM 6 avec le filler impur).

2 Tâche 2 : Caractérisation des constituants des ciments ternaires et des ciments de référence

2.1 Méthodologie

2.1.1 Détermination de la finesse

Deux types de broyeurs de laboratoire ont été utilisés pour voir l'impact d'une finesse plus grande de la cendre volante. Il s'agit d'un broyeur à disque et d'un broyeur oscillant en tungstène.

La mesure de la masse volumique absolue est une étape nécessaire à la détermination de la finesse Blaine. La masse volumique du ciment est le rapport entre sa masse et son volume. Pour un ciment donné, ce rapport est une constante qui est propre aux caractéristiques physiques du ciment.

La méthode utilisée pour la détermination de la **masse volumique** est le volumétre Le Châtelier (norme EN 196-6 [vii]).

Dans le cadre de cette étude, la finesse d'un matériau est déterminée par mesure de la **finesse Blaine** selon la norme EN 196-6 [vii]. La finesse Blaine correspond à la surface

spécifique de l'échantillon et est obtenue à l'aide d'un « perméabilimètre de Blaine » qui détermine la vitesse d'écoulement de l'air à travers la poudre.

Une autre méthode utilisée pour la caractérisation de la finesse des matériaux étudiés est la **granulométrie laser** suivant le modèle Fraunhofer. Cette technique permet de mesurer la taille des particules d'un matériau. L'appareillage utilisé au CRIC est un Mastersizer 2000 de Malvern Instruments. Les critères visés, dans le cadre de CEMCALC I pour les ciments à base de laitier, sont un passant entre 7 et 8,6 μm compris entre 42 et 46% et un passant entre 30 et 32 μm entre 78 et 82%. Ces valeurs sont utilisées comme repère pour une comparaison avec les résultats obtenus avec les ciments de CEMCALC I.

Pour la caractérisation des cendres volantes, un tamisage à l'aide d'un tamis 45 μm est effectué sous eau.

La granulométrie en voie humide est obtenue par tamisage. La distribution de taille de grains est également déterminée au moyen de deux méthodes optiques : la diffraction laser et l'imagerie numérique. Cette dernière méthode permet en outre d'évaluer la morphologie des grains individualisés. Un comparatif des techniques de caractérisation de la taille a également été réalisé. La surface spécifique est mesurée au moyen d'un perméamètre à air sous charge variable (méthode Blaine) et par adsorption d'azote (méthode BET).

2.1.1.1 Tamisage en voie humide

Préalablement au tamisage, un échantillonnage a été réalisé. Pour ce faire, les échantillons sont prélevés et réduits à l'aide d'un diviseur à cloisons (largeur des fentes = $2,5 \times D_{\text{max}}$), conformément à la norme EN 932-2 [viii]. Le tamisage est ensuite réalisé sur une prise d'essai d'environ 100 g (séchée à 105°C, jusqu'à masse constante).

2.1.1.2 Granulométrie par diffraction laser

Les courbes granulométriques des fillers calcaires ont été déterminées à l'ULg au moyen du granulomètre laser « Mastersizer 2000 » (Malvern Instruments) et du disperseur en voie humide « Hydro S » (Malvern Instruments). La vitesse de circulation de la suspension dans le circuit, ainsi que le temps d'ultra-sons, sont paramétrés de manière à optimiser la dispersion des particules.

Le dispersant utilisé est l'eau désionisée. En effet, une phase de pré-test a démontré que l'utilisation d'un tensioactif tel que le pyrophosphate de sodium, produit fréquemment utilisé dans les études sédimentologiques des sols calcaires en raison de son caractère basique (pH = 9,86 à l'équilibre), ne permettait pas d'améliorer de manière significative la dispersion des particules.

La concentration solide de la suspension est limitée [obscurisation de $(15 \pm 2) \%$] de manière à éviter les erreurs de mesure induites par l'apparition des phénomènes de diffusion multiple.

En raison de l'hétérogénéité minéralogique du filler impur et du caractère fort biréfringent de la calcite ($n_o=1,63$ et $n_e=1,48$), les distributions granulométriques ont été calculées en utilisant l'approximation de Fraunhofer. Ce modèle d'inversion utilise les hypothèses de

sphéricité et d'opacité des particules. Les conditions de mesure sont résumées ci-dessous :

- dispersant : eau désionisée,
- vitesse de la pompe : 2835 rotations par minute,
- ultrasons : 100 % jusqu'à stabilisation du signal,
- obscuration : 15±2 %
- modèle de diffraction : Fraunhofer.

Représentation des résultats :

Le modèle d'inversion permet de déduire, à partir de l'image de diffraction des particules, une distribution granulométrique en volume $d [3,0]$ en termes de sphères équivalentes avec (Eq. 1) :

$$d[p, q] = \sqrt[p-q]{\frac{\sum_{i=0}^j d_i^p n_i}{\sum_{i=0}^j d_i^q n_i}} \quad \text{Eq. 1}$$

où n_i est le nombre de particules de chacune des classes i de diamètre moyen d_i et p, q sont des variables.

Les distributions granulométriques sont généralement caractérisées par des percentiles dx (lire $dx [3,0]$), qui sont définis comme les diamètres pour lesquels x % en volume de la population sont constitués de particules de taille inférieure à d .

Deux paramètres "pertinents" du point de vue des échanges (surface spécifique) et des processus chimiques (volume spécifique) sont également souvent représentés :

- le **diamètre de Sauter** « $d [3,2]$ » : qui est défini comme la moyenne du rapport entre le diamètre équivalent en volume « $d [3,0]$ » et le diamètre équivalent en surface « $d [2,0]$ ». Il permet de comparer les effets de volume (inertiel) aux effets de surface.
- le **diamètre de De Brouker** « $d [4,3]$ » ou diamètre moyen en volume : qui est défini comme la moyenne du rapport entre le diamètre équivalent à la quatrième puissance $d [4,0]$ et le diamètre équivalent en volume $d [3,0]$.

Une série de paramètres supplémentaires, couramment employés en sédimentologie, ont aussi été calculés dans le but de caractériser la courbe granulométrique des fillers :

- le **coefficient d'uniformité** C_U :

$$C_U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad \text{Eq. 2}$$

- le **coefficient d'étalement** C_E :

$$C_E = \frac{d_{90}}{d_{10}} \quad \text{Eq. 3}$$

- le **coefficient de courbure** C_C :

$$C_C = \frac{(d_{30})^2}{d_{10} \cdot d_{60}} \quad \text{Eq. 4}$$

- le coefficient de symétrie C_S

$$C_S = \frac{(d_{50})^2}{d_{10} \cdot d_{90}} \quad \text{Eq. 5}$$

Le coefficient d'uniformité C_U est une mesure de la pente de la courbe entre les diamètres d_{10} et d_{60} : lorsque $C_U > 2$, la granulométrie est uniforme. Le coefficient de courbure C_C représente la forme de la courbe granulométrique. Un C_C élevé (> 3) correspond à une courbe granulométrique cumulée concave vers le haut, comportant une pente importante dans le domaine des particules de gros diamètre. Inversement, une faible valeur de C_C (< 1) témoigne d'une courbe granulométrique convexe vers le haut, présentant un accroissement du volume de particules dans le domaine des fines. Le coefficient de symétrie C_S exprime quant à lui la symétrie du mode de l'histogramme par rapport à la médiane.

2.1.1.3 Granulo-morphométrie par analyse d'images

La caractérisation en taille et en forme des particules a été réalisée avec l'Occhio 500 nano. La poudre est dispersée sur une lame de verre à l'aide d'une cloche et d'une pompe à vide. L'échantillon se trouve sur une membrane en plastique qui est déchirée par le vide réalisé dans la cloche. Les particules se dispersent alors sur la lame de verre.

La lame de verre est ensuite placée de façon motorisée entre un microscope (à l'extrémité duquel se trouve une caméra) et une source lumineuse. Les images ainsi acquises sont formées par la rétroprojection des particules sur le capteur. Chaque pixel de l'image est inspecté et son niveau de gris est transformé en valeur binaire. Les particules individuelles sont automatiquement extraites des images afin de mesurer, sur chaque grain individuel, différents paramètres de taille et de forme. Entre 40.000 et 50.000 particules individuelles sont mesurées sur chaque filler.

2.1.1.4 Surface spécifique (B.E.T et laser)

a) Surface spécifique B.E.T.

L'isotherme d'adsorption d'un gaz sur un solide peut être modélisée à partir de la théorie de Brunauer, Emmet et Teller [ix] lorsque le nombre de couches moléculaires pouvant s'adsorber n'est pas limité (Eq. 6) :

$$\frac{P}{v \cdot (P - P_0)} = \frac{c - 1}{v_m \cdot c} \cdot \frac{P}{P_0} + \frac{1}{v_m \cdot c} \quad \text{Eq. 6}$$

où v [$\text{cm}^3 \cdot \text{g}^{-1}$] est le volume de vapeur adsorbé par gramme de solide sous une pression P , P_0 est la pression atmosphérique et v_m le volume de vapeur nécessaire pour recouvrir entièrement la surface du solide d'une couche monomoléculaire d'adsorbat par unité de masse d'adsorbant [cm^3/g d'adsorbant].

D'après l'équation 7, les points obtenus expérimentalement s'alignent selon une droite du type $y = \alpha x + \beta$ dans le graphique de coordonnées $(P/P_0, P/v \cdot (P - P_0))$, appelé diagramme B.E.T. La pente et l'ordonnée à l'origine de la régression linéaire des points expérimentaux

permettent alors de calculer le volume d'une monocouche v_m (Eq. 7) et la constante c (Eq. 8).

$$v_m = \frac{1}{\alpha + \beta} \quad \text{Eq. 7}$$

$$c = \frac{\alpha}{\beta + 1} \quad \text{Eq. 8}$$

A partir de v_m , il devient possible de calculer la surface spécifique $S_{S,BET}$ du solide (Eq. 9) :

$$S_{S,BET} = \frac{1}{\rho_S} \cdot \left[\frac{\sigma \cdot v_m \cdot N}{V_M} \right] \quad \text{Eq. 9}$$

où V_M est le volume occupé par une mole de vapeur (=22414 cm³/mole), σ la surface occupée par une molécule de vapeur (A.molécule⁻¹)² et N le nombre d'Avogadro (=6,022.10²³ mole⁻¹).

Pour l'azote, $\sigma = 16,2 \text{ A}^2/\text{molécule}$ à 77 °K (Eq. 10) :

$$S_{S,BET} = 4,3 v_m \quad \text{Eq. 10}$$

b) Surface spécifique « laser »

La surface spécifique des fillers calcaires peut être déduite du diamètre de Sauter d [3,2], précédemment défini comme la moyenne du rapport entre le diamètre équivalent en volume d [3,0] et le diamètre équivalent en surface d [2,0] (Eq. 11). Bien entendu, cette méthode considère uniquement la surface géométrique externe développée par le solide.

$$d [3,2] = \frac{\sum_{i=0}^q d_i^3 n_i}{\sum_{i=0}^q d_i^2 n_i} \quad \text{Eq. 11}$$

Connaissant ce paramètre, il suffit d'appliquer la loi suivante (Eq. 12) pour trouver la surface spécifique.

$$S_{S,Laser} = \frac{6000}{\rho d [3,2]} \quad \text{Eq. 12}$$

où ρ est la masse volumique des particules.

2.1.2 Caractérisation physico-chimique

Les **analyses chimiques** sont effectuées selon la *norme EN 196-2* [x] :

- la teneur de la majorité des oxydes est déterminée par fluorescence des rayons X (FX) ;
- la teneur en sulfates et la teneur en résidu insoluble sont obtenues par gravimétrie ;
- la teneur en sulfures par iodométrie ;
- la teneur en CO₂ et la perte au feu sont données par thermogravimétrie (TG) sous atmosphère inerte (gaz argon) sauf dans le cas des fillers et du CEM I 52,5 R pour lesquels la perte au feu est déterminée sous air à 950°C dans un four à moufle ;
- la teneur en chlorures par potentiométrie ;

- la teneur en chaux libre du clinker et des ciments par conductimétrie. Pour les cendres volantes, elle est déterminée selon la norme EN 451-1 [xi] ;
- la teneur en P_2O_5 soluble des cendres volantes est mesurée par ICP-OES ;
- la teneur en silice réactive des cendres volantes correspond à la différence entre la teneur en SiO_2 totale obtenue par FX et la teneur en SiO_2 insoluble obtenue par attaque à l'acide nitrique, à l'hydroxyde de potassium, calcination et attaque à l'acide fluorhydrique ;
- la teneur en chaux réactive des cendres volantes est définie comme égale à la teneur en CaO déterminée par FX si cette dernière est inférieure à 10,0wt%. Dans le cas contraire, elle calculée comme étant égale à la différence entre le CaO total obtenu par FX et le CaO provenant du $CaCO_3$ (teneur calculée sur base de la teneur en CO_2 obtenue par TG) et du $CaSO_4$ (teneur calculée sur base de la teneur en SO_3 déterminée par gravimétrie).

Les analyses par FX sont réalisées sur perles fabriquées par fusion de $1,2000 \pm 0,0002$ g de l'échantillon à perte au feu nulle avec $6,0000 \pm 0,0002$ g de tétraborate de lithium SPECTROFLUX 100 AESAR et environ $0,6000 \pm 0,0050$ g de nitrate de lithium MERCK pour analyses. L'appareil utilisé est un spectromètre séquentiel d'analyse par fluorescence des rayons X à dispersion de longueur d'onde *Thermo ARL* de type *ADVANT X P+ SEQUENTIAL XRF*. Il est piloté par ordinateur via le logiciel *WIN XRF 3.0*. Le rayonnement primaire de l'appareil est émis par un tube à anticathode de rhodium $K\alpha$ (puissance maximum de 4200 W). La tension et l'intensité du courant traversant le tube utilisées sont de 30 kV et 50 mA et de 50 kV et 50 mA selon les éléments dosés. L'appareil comporte deux systèmes de détection, un compteur à scintillations dont la fenêtre est constituée par une feuille de mylar de 1,5 mm (pour les éléments lourds tel que le strontium) et un compteur proportionnel à flux gazeux alimenté par un courant d'argon contenant 10% de méthane et placé juste derrière le compteur à scintillation (pour les éléments légers).

Les analyses thermogravimétries sont réalisées à l'aide d'un appareil *TGA/DSC 1 Star System* de la marque *METTLER-TOLEDO*.

La détermination de la **teneur en constituants** des ciments est effectuée par dissolution sélective selon la *norme EN 196-4* [xii].

La **teneur en matières organiques** a été déterminée par oxydation à l'eau oxygénée, selon la norme d'essai NBN 589-207 [xiii].

Les mesures de dégagement de **chaleur d'hydratation** sont réalisées par calorimétrie Langavant (méthode semi-adiabatique) selon la *norme EN 196-9* [xiv].

Les phases minéralogiques sont identifiées par diffraction des rayons X (DRX) à l'aide du logiciel *DiffraPlus EVA 14.0.0.0* de la firme *Bruker-AXS*. Le diffractomètre est un *Bruker D8* de géométrie Bragg-Brentano équipé d'un détecteur *Lynx Eye*, muni d'une anticathode en cuivre et ne contenant pas de monochromateur.

La quantification des phases minéralogiques est effectuée selon la méthode Rietveld en reprenant les diffractogrammes. Le logiciel utilisé est *Topas 4.2* de la firme *Bruker*. Dans le

cas des échantillons contenant une phase amorphe, un étalon interne (5% de silicium métallique) est ajouté à l'échantillon avant l'acquisition DRX afin de quantifier cette phase amorphe.

Bien que la DRX sur un échantillon n'ayant subi aucun traitement permet la **détection d'argiles** au sens large, l'identification plus poussée des composés appartenant à ce groupe nécessite un protocole particulier :

- Préparation des échantillons :
 - Fraction décarbonatée < 63 µm

Le passant à 63 µm est récupéré dans un erlenmeyer et décarbonaté sous hotte par ajout d'acide chlorhydrique (HCl) avant d'être décanté à l'eau déminéralisée puis séché.

- Fraction décarbonatée < 2 µm

La fraction décarbonatée inférieure à 63 µm décantée à l'eau déminéralisée est versée dans un pilulier afin de la laisser sédimenter. Le premier centimètre de la solution est prélevé après 50 minutes. Selon la loi de Stokes, ce volume contient les particules inférieures à 2 µm. La fraction argileuse ainsi récupérée est déposée délicatement sur une lame de verre puis séchée 24 heures à l'air.

- Protocole d'essais :

Les minéraux argileux sont caractérisés à partir de trois diffractogrammes obtenus dans les conditions expérimentales suivantes :

- à l'état naturel, après exposition et séchage à l'air ;
- après conservation pendant 24 heures de l'échantillon dans une cloche sous vide en présence d'éthylène glycol (solvatation) ;
- après chauffage à 500°C durant 4 heures.

2.1.3 Indice d'activité des cendres volantes

L'**indice d'activité des cendres volantes** est déterminé selon la norme NBN EN 450-1 [iii] par comparaison avec un ciment de référence. Il s'agit du rapport entre les résistances à la compression d'un mortier constitué d'un ciment constitué de 75wt% de CEM I de référence additionné de 25wt% de la cendre étudiée et d'un mortier à base du CEM I de référence. L'indice d'activité à 28 et 90 jours doit être, respectivement, supérieur à 75% et 85%.

$$IA (\%) = \frac{f_{c(75\%CEMI+25\%CV),t}}{f_{c(100\%CEMI),t}} \times 100$$

Avec :

- IA : Indice d'Activité (%) ;
- fc : résistance à la compression (N/mm²) ;
- CEM I : ciment de référence ;
- CV : cendre volante étudiée ;
- t : échéance (28 ou 90 jours).

La préparation des éprouvettes de mortier de référence et la détermination de leur résistance à la compression se font selon la méthode décrite dans la norme EN 196-1 [xxi].

2.2 Ciments industriels de référence

Trois ciments industriels ont été sélectionnés comme références par rapport aux ciments de laboratoire :

- CEM I 52,5 R HES ;
- CEM II/B-V 32,5 R ;
- CEM II/(B-M) LL-S-V 32,5 N.

2.2.1 Détermination de la finesse

La finesse Blaine ainsi que la granulométrie laser des trois ciments de référence sont repris au Tableau 2-1.

Type de ciment	Masse volumique (g/cm ³)	Blaine ACMEI (cm ² /kg)	Granulométrie Laser	
			Résultats CRIC	
			<8µm (%)	<32µm (%)
CEM II/B-V 32.5 R	2.90	2960	27.28	69.84
CEM II/B-M LL-S-V 32.5 N	2.97	3360	30.81	70.54
CEM I 52.5 R HES 2ème lot	3.15	4780	43.58	94.08
CEM I 52.5 R HES 3ème lot	3.15	4930	43.87	96.13

Tableau 2-1 - Caractérisation de la finesse des trois ciments industriels de référence

Le Tableau 2-1 montre que les finesses des deux lots de CEM I 52,5 R sont similaires.

Selon les critères de finesse définis au point 2.1.1, nous voyons au Tableau 2-1 que le CEM I 52,5 R rentre dans le critère de passant à 8 µm (entre 42 et 46%) mais dépasse le critère de passant à 32 µm (entre 78 et 82%). Les CEM II/B-V 32,5 R et CEM II/B-M LL-S-V 32,5 N présentent des passants à 8 et 32 µm inférieurs aux limites visées ; ils sont donc moins fins que souhaité dans le cadre de cette étude.

2.2.2 Analyse chimique

L'analyse chimique des trois ciments industriels de référence est présentée au Tableau 2-2.

	CEM II/B-V 32.5 R	CEM II/B-M LL-S-V 32.5 N	CEM I 52.5 R 2ème lot	CEM I 52.5 R 2ème lot après 1an & 9mois	CEM I 52.5 R 3ème lot	CEM I 52.5 R 4ème lot
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	1.66	6.79	1.28	1.27	1.29	1.25
P.F. à l'air 950°C (%)	2.55	/	1.30	/	1.21	1.21
SiO ₂ (%)	27.37	19.67	18.33	/	18.93	18.80
Al ₂ O ₃ (%)	8.51	7.20	5.72	/	5.75	5.85
Fe ₂ O ₃ (%)	3.28	3.60	4.24	/	3.89	4.17
CaO (%)	50.77	55.53	62.90	/	62.42	62.34
SrO (%)	0.11	0.14	0.16	/	0.18	0.18
Na ₂ O (%)	0.22	0.42	0.46	/	0.46	0.48
K ₂ O (%)	1.23	0.63	0.58	/	0.79	0.70
MgO (%)	1.80	1.60	1.02	/	1.03	1.19
Mn ₂ O ₃ (%)	0.05	0.11	0.10	/	0.11	0.11
TiO ₂ (%)	0.47	0.38	0.31	/	0.29	0.31
P ₂ O ₅ (%)	0.30	0.40	0.49	/	0.47	0.44
S ²⁻ (%)	0.04	0.11	0.01	/	0.01	0.02
SO ₃ (%)	2.78	2.98	3.58	/	3.61	3.62
Cl ⁻ (%)	0.033	0.065	0.031	/	0.067	0.089
TOTAL (%)	101.18	99.62	100.51	/	100.50	100.76
Na ₂ O équ (%)	1.03	0.83	0.84	/	0.98	0.94
RI (%)	17.28	6.24	0.38	/	0.24	0.18
CaO libre (%)	0.26	0.73	0.86	/	1.04	0.87
CO ₂ (%)	0.95	6.33	0.48	0.51	0.70	0.62
H ₂ O (%)	0.71	0.46	0.80	0.76	0.59	0.63
A/F	/	/	1.35	/	1.48	1.40
C ₃ A (%)	/	/	7.99	/	8.66	8.46

Tableau 2-2 - Composition chimique des trois ciments industriels de référence

Avec : P.F. : Perte au Feu ; Na₂O équ : Na₂O équivalent = %Na₂O + 0,658 %K₂O ; RI : Résidu Insoluble ; A/F : Al₂O₃/Fe₂O₃ ; C₃A : Ca₃Al₂O₆ ; / : analyse non effectuée

La perte au feu élevée du CEM II/B-M est liée à la présence de filler calcaire (CaCO₃) dans ce ciment, comme le confirme la teneur en CO₂ plus élevée.

Le CEM II/B-V présente une teneur en SiO₂ plus élevée du fait qu'il contient plus de cendre volante que les deux autres ciments, ce qui explique le résidu insoluble plus élevé.

Les deux ciments composés contiennent plus d'Al₂O₃ car les cendres volantes et laitiers en contiennent plus que le clinker.

Le CEM II/B-M présente une teneur en sulfures (S²⁻) plus élevée car il contient du laitier.

Le Tableau 2-3 donne la teneur en constituants déterminée selon la norme EN 196-4 [xii].

	Proportion Cendre (%)	Proportion Clinker (%)	Proportion Filler calcaire (%)	Proportion Laitier (%)	Total (%)
CEM II/B-V 32.5 R	22.3	77.7	0.0	0.0	100.0
CEM II/B-M LL-S-V 32.5 N	9.1	70.4	13.3	7.2	100.0
CEM I 52.5 R	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0

Tableau 2-3 – Teneur en constituants des trois ciments industriels de référence

Ces proportions permettent de situer les ciments CEM II/B-V et du CEM I dans le diagramme ternaire K-V-L (Figure 2-1).

Dans le cas du CEM II/B-M (LL-S-V), sa localisation dans ce diagramme ternaire est une zone assez large car il contient du laitier en plus du clinker, de la cendre et du filler calcaire (Figure 2-1). Pour être situé avec précision, il faudrait utiliser un diagramme quaternaire avec le laitier comme quatrième pôle.

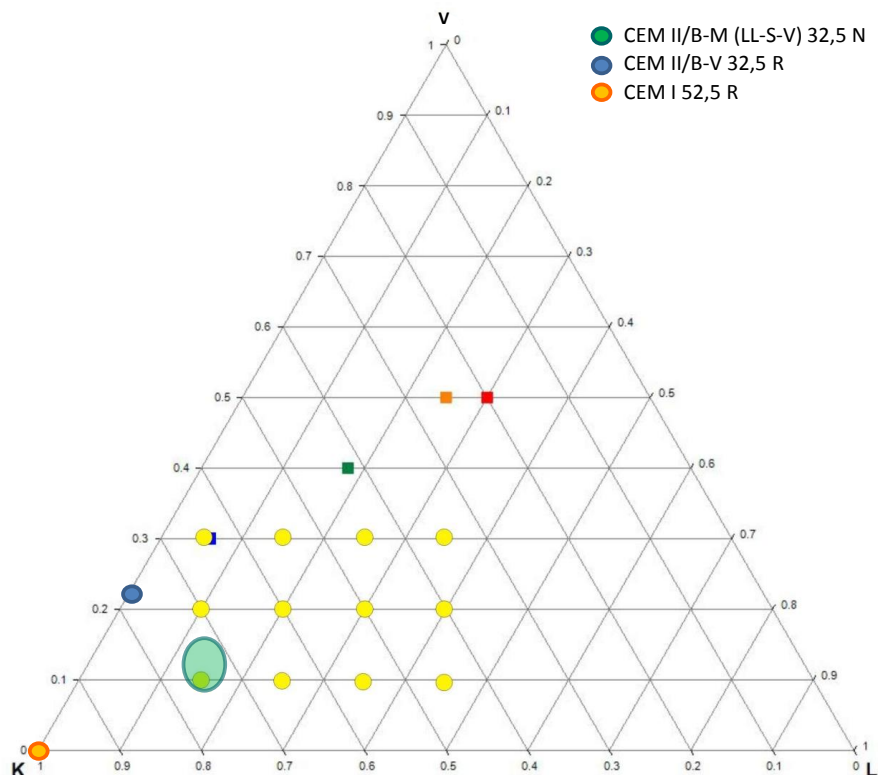


Figure 2-1 – Les CEM II/B-V 32,5 R et CEM I 52,5 R situés dans le diagramme ternaire K-V-L sur base des teneurs en constituants

Avec : K : clinker ; V : cendre volante et L : filler calcaire

2.2.3 Analyse minéralogique

La détermination des phases minéralogiques effectuée par DRX sur les trois ciments industriels de référence est présentée à la Figure 2-2.

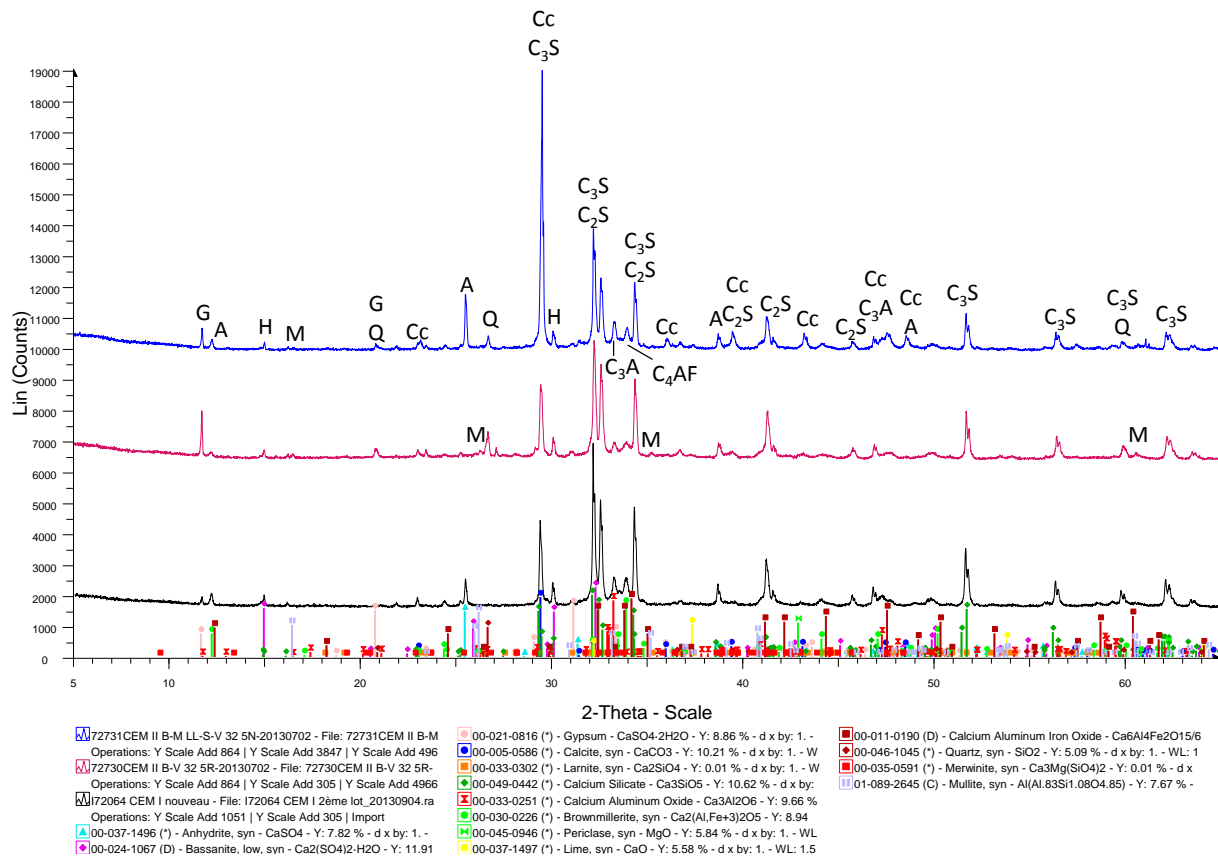


Figure 2-2 – Comparaison des diffractogrammes des trois ciments industriels de référence
Avec : G : gypse ; H : demi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; Q : quartz ; M : mullite

La Figure 2-2 montre que les régulateurs de prise des trois ciments diffèrent dans leur proportion. Le CEM I 52,5 R contient un mélange de gypse (CaSO₄·2H₂O), bassanite, également appelée demi-hydrate (CaSO₄·1/2H₂O), et d'anhydrite (CaSO₄). Le CEM II/B-V 32,5 R contient principalement du gypse et un peu d'hemi-hydrate. Le CEM II/B-M 32,5 N quant à lui contient plus d'anhydrite, un peu de gypse et d'hemi-hydrate.

Les autres phases communes présentes dans ces trois ciments sont les phases classiques du clinker, à savoir C₃S, C₂S (larnite), C₃A et C₄AF (brownmillerite) en notation cimentière : C pour CaO, S pour SiO₂, A pour Al₂O₃ et F pour Fe₂O₃. Les phases mineures sont la chaux (CaO) et le périclase (MgO).

Le CEM II/B-M présente des pics de calcite du fait qu'il contient du filler calcaire contrairement aux deux autres ciments.

Dans les trois ciments, on observe les phases majeures du clinker (C₃S, C₂S, C₃A et C₄AF).

Dans le cas du CEM II/B-V, il y a une légère bosse correspondant à la présence de cendre volante. Dans le cas du CEM II/B-M, il y a une bosse correspondant à la cendre volante et

une bosse correspondant à la phase amorphe du laitier s'ajoute au niveau des raies majeures des phases principales du clinker. La quantité de laitier dans ce ciment étant faible, cette bosse est peu intense.

La présence de cendre volante dans les CEM II/B-V et CEM II/B-M entraîne la présence de mullite ($Al_{(4+2x)}Si_{(2-2x)}O_{(10-x)}$ avec $x = 0.17$ à 0.59), de quartz (SiO_2), d'hématite (Fe_2O_3) et de magnétite (Fe_3O_4). Ces deux dernières phases étant fortement « diluées » par les autres phases de ces ciments, elles ne sont pas indiquées sur les diffractogrammes.

2.3 Caractérisation des cendres volantes classiques et de co-combustion

2.3.1 Détermination de la finesse

Le Tableau 2-4 montre que les cendres de combustion classique CV2 et de co-combustion CVco1 ont des finesses similaires et sont plus fines que la cendre de combustion classique CV1.

Type de ciment	Masse volumique (g/cm ³)	Blaine ACMEL (cm ² /kg)	Granulométrie Laser		Refus tamis 45µm humide (%)
			Résultats CRIC		
			<8µm (%)	<32µm (%)	
CV1 Cendre volante combustion type A	2.10	2560	16.07	47.06	34.26
CV1 broyeur à disque	2.16	2650	17.84	50.16	31.08
CV1 broyeur oscillant essai 1* (30 sec) sur environ 80g			38.34	77.37	
CV1 broyeur oscillant essai 2* (60 sec) sur environ 80g			45.78	84.86	
CV1 broyeur oscillant	2.38	4040	35.68	74.19	17.38
Cendre volante co-combustion (co1)	2.26	3210	22.16	62.97	17.23
CV2 Cendre volante combustion type A	2.27	3180	30.27	64.89	20.58

Tableau 2-4 - Caractérisation de la finesse des trois cendres volantes étudiées

Des tests de broyage en laboratoire ont été effectués sur la cendre CV1 pour évaluer si un broyage plus poussé permettait d'améliorer ses performances.

Le Tableau 2-4 montre que l'utilisation du broyeur à disque ne permettait d'obtenir une finesse significativement plus fine que la cendre de départ.

Nous avons constaté que le broyeur oscillant permettait, quant à lui, d'accroître la finesse de la cendre. Des tests ont été effectués pour décider de la durée du broyage. Comme le montre la quatrième ligne du Tableau 2-4, nous avons constaté que broyer 80 grammes de cendre pendant 60 secondes au broyeur oscillant permettait d'accroître suffisamment la

finesse de la cendre. La cinquième ligne du Tableau 2-4 correspond à l'entièreté du lot (2 kg) de la cendre broyée à l'aide du broyeur oscillant. Les 2 kg ont été broyés par lots de 80 g pendant 30 secondes chacun. La finesse Blaine ainsi que la granulométrie laser montrent que la finesse de la cendre est bien accrue et dépasse celle des deux autres cendres CV2 et CVco1. Les performances mécaniques de cette cendre broyée au laboratoire sont montrées au point 2.3.4 (test d'activité).

2.3.2 Analyse chimique

Le Tableau 2-5 montre les caractéristiques chimiques des trois cendres volantes étudiées dans le cadre de cette recherche.

	Cendre combustion CV1	Cendre combustion CV2	Cendre co-combustion co1
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	0.73	1.45	1.09
P.F. à l'air 950°C (%)	6.39	3.36	4.47
SiO ₂ (%)	51.55	51.46	51.13
Al ₂ O ₃ (%)	26.04	24.84	25.17
Fe ₂ O ₃ (%)	6.18	7.55	8.40
CaO (%)	1.48	3.54	3.48
SrO (%)	0.03	0.09	0.15
Na ₂ O (%)	0.45	1.00	0.79
K ₂ O (%)	4.09	3.33	1.85
MgO (%)	1.45	1.81	1.06
Mn ₂ O ₃ (%)	0.08	0.07	0.03
TiO ₂ (%)	1.16	1.19	1.64
P ₂ O ₅ (%)	0.27	0.57	0.40
SO ₃ (%)	0.20	0.52	0.84
Cl ⁻ (%)	0.002	0.004	0.002
TOTAL (%)	100.10	100.78	100.50
Na ₂ O équ (%)	3.14	3.19	2.01
RI HCl (%)	90.43	87.58	87.90
SiO ₂ réactive (%)	38.36	39.09	37.87
P ₂ O ₅ soluble (mg/kg)	4.70	1.60	0.40
CaO réactive (%)	1.48	3.54	3.48
CaO libre (%)	<0.10	0.20	0.20
CO ₂ (%)	0.24	0.89	0.24
H ₂ O (%)	0.49	0.56	0.85
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	83.77	83.85	84.70

Tableau 2-5 – Composition chimique des cendres volantes étudiées

Le Tableau 2-5 montre que la cendre de combustion CV1 est plus riche en imbrûlés du fait que sa perte au feu à l'air est plus élevée (6,39wt%) que celle des deux autres cendres (3,36 et 4,47wt%). En effet, le carbone imbrûlé s'oxyde au contact de l'air formant du CO₂ et engendre une perte au feu plus importante.

La teneur en silice et en silice réactive des trois cendres sont similaires.

Les trois cendres sont de type siliceux car leur teneur en CaO réactive est inférieure à 10,0wt%.

Par contre, on constate que les cendres CV2 et CVco1 contiennent plus de chaux réactive que la CV1.

La CV1 est nettement plus riche en phosphates solubles avec 4,70wt% contre 1,60wt% pour la CV2 et 0,40wt% pour la CVco1. Les phosphates solubles engendrent un retardement de la prise. Un contrôle de leur teneur est encore exigé, dans la norme EN 450-1, pour les nouvelles cendres de co-combustion entrant sur le marché. La teneur en P₂O₅ total ne doit pas dépasser 5,0 % et la teneur maximal admissible pour le P₂O₅ soluble (pour les cendres de co-combustion) est de 100 mg/ kg (ppm). Les cendres étudiées se situent nettement sous ces seuils.

La teneur en K₂O est plus élevée dans les deux cendres de combustion avec 4,09 et 3,33wt% contre 1,85wt% pour la cendre de co-combustion.

La teneur en SO₃ n'est pas uniforme entre les trois cendres volantes. Elle est plus faible dans le cas de la CV1 avec 0,20wt%, elle est intermédiaire avec 0,52wt% pour la CV2 et est plus élevée pour la cendre de co-combustion avec 0,84wt%.

En dehors de ces différences, les compositions des trois cendres sont relativement proches.

2.3.3 Analyse minéralogique

De façon générale, les cendres volantes sont constituées principalement d'une phase vitreuse amorphe (SiO₂). Elles peuvent contenir les phases cristallines suivantes dont les proportions varie en fonction de la minéralogie du minerai [xv] :

- Mullite (3Al₂O₃.2SiO₂) ;
- Quartz (SiO₂) ;
- Magnétite (Fe₃O₄) ;
- Hématite (Fe₂O₃) ;
- Anhydrite (CaSO₄) ;
- Opaline (SiO₂) ;
- Chaux (CaO) ;
- Chlorite ((Mg,Fe)₃(Si,Al)₄O₁₀(OH)₂.(Mg,Fe)₃(OH)₆) ;
- Feldspaths (orthose : KAlSi₃O₈ ; albite : NaAlSi₃O₈) ;
- Hercynite (FeAl₂O₄) du groupe des spinelles.

Les spinelles sont fréquemment observés dans les cendres issues de charbon riche en fer, tandis que la chaux et les sulfates sont courants dans les cendres provenant de charbon riche en calcium [v].

Les diffractogrammes des trois cendres présentés à la Figure 2-3 montre que les phases minéralogiques des trois cendres sont globalement similaires. Elles contiennent de la mullite (Al₂(Al_{2,8}Si_{1,2})O_{9,54}), du quartz (SiO₂), un peu d'hématite et de magnétite ainsi qu'une phase amorphe qui se situe entre 20 et 30°2θ. La cendre de co-combustion (CVco1) et la deuxième cendre volante de combustion classique (CV2) contiennent en plus un peu de chaux libre.

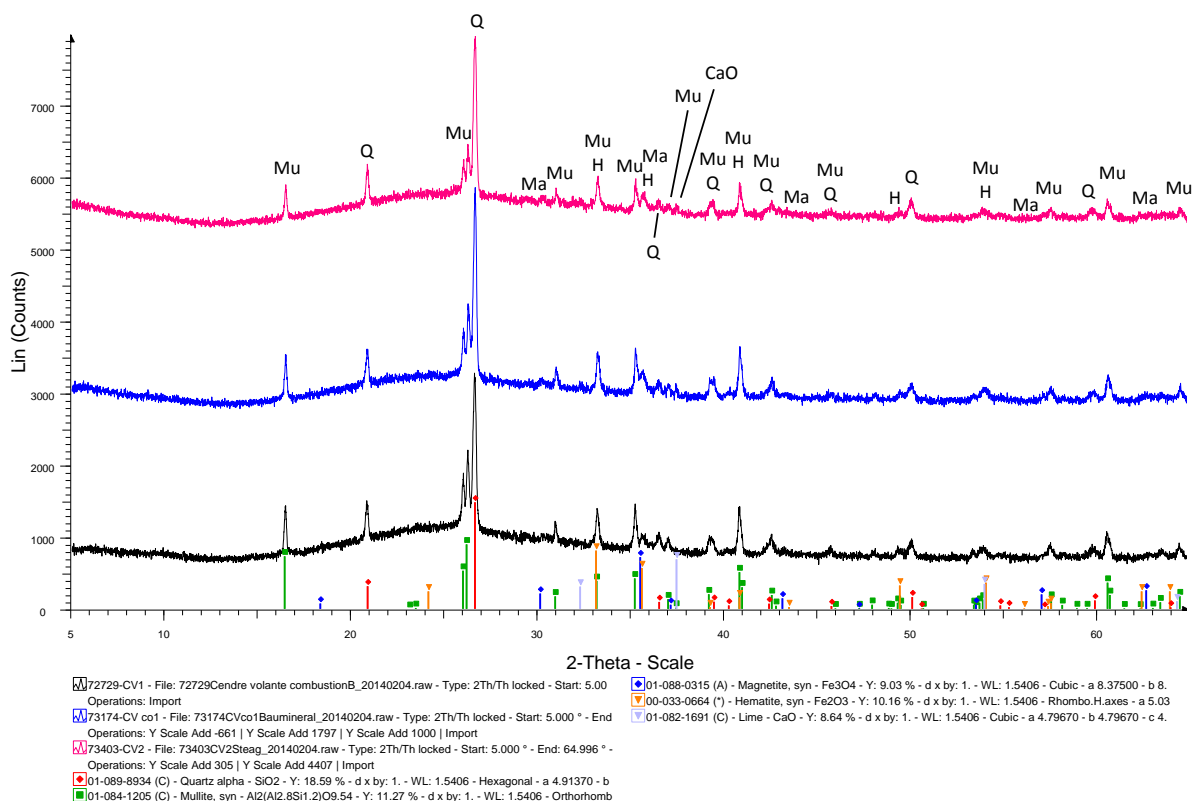


Figure 2-3 – Comparaison des diffractogrammes des trois cendres volantes étudiées
Avec : Mu : mullite ; Q : quartz ; H : hématite ; Ma : magnétite et CaO : chaux libre

Les différentes phases minéralogiques des trois cendres ont été quantifiées à l’aide de la méthode Rietveld sur base des diffractogrammes. Pour quantifier la phase amorphe, le silicium a été utilisé comme étalon interne. Le détail des raffinements est repris en Annexe 1. Le Tableau 2-6 reprend les résultats obtenus.

	CV1	CVco1	CV2
Amorphe (%)	73.8	69.6	79.5
Mullite (%)	16.9	17.8	10.4
Quartz (%)	7.7	9.3	7.9
Hématite (%)	0.7	1.3	1.1
Magnétite (%)	0.9	1.6	1.0
Chaux libre (%)	0.0	0.5	0.1
TOTAL (%)	100.0	100.0	100.0

Tableau 2-6 – Quantification des phases minéralogiques par la méthode Rietveld

Le Tableau 2-6 montre que la deuxième cendre classique (CV2) est plus riche en phase amorphe que les deux autres cendres et contient moins de mullite.

2.3.4 Test d'activité

Le Tableau 2-7 montre les indices d'activité obtenus à 28 et 91 jours pour la cendre classique CV1 telle que reçue et après broyage en laboratoire dans le broyeur à disque et dans le broyeur oscillant.

	Indice d'activité (%)	
	28 jours	91 jours
Exigences EN 450	> 70	> 80
CV1 non broyée	75,79	90,83
CV1 broyeur à disque	76,26	93,84
CV1 broyeur oscillant	78,93	98,28
CV co1	79,40	97,42
CV2	80,97	99,71

Tableau 2-7 – Valeurs de l'indice d'activité de la cendre de combustion CV1 broyée selon différentes méthodes à 28 et 91 jours et de la cendre de co-combustion CVco1 et la cendre de combustion CV2 à 28 jours

Nous voyons que l'indice d'activité augmente avec le broyage en laboratoire, particulièrement pour l'utilisation du broyeur oscillant. Ce qui peut être expliqué par la finesse accrue de la cendre (Tableau 2-4, point 2.3.1).

L'indice d'activité des cendres CV co1 et CV2 à 28 jours est supérieur à ceux de la cendre CV1 avant et après broyage. Comme vu aux points 2.3.1 et 2.3.2, ces cendres sont un peu plus fines et riches en chaux réactive que la CV1.

2.3.5 Evaluation environnementale des cendres volantes

Les trois cendres volantes étudiées dans le cadre de ce projet (CV1, CVco1, CV2) ont subi un test de lixiviation à 4 pH obtenus par ajout HNO₃ jusqu'à 10,5 et de NaOH pour le 11 :

- ✓ 4 ;
- ✓ 6 ;
- ✓ 7 ;
- ✓ 10,5 = pH des cendres dans eau sans acide ;
- ✓ 11 : pas réussi à atteindre sans NaOH.



Figure 2-4 – Photographie du dispositif de lixiviation des cendres volantes

Les éléments chimiques ont ensuite été dosés dans la solution par ICP-OES. Les résultats obtenus sont présentés aux Figure 2-5, Figure 2-6 et Figure 2-7.

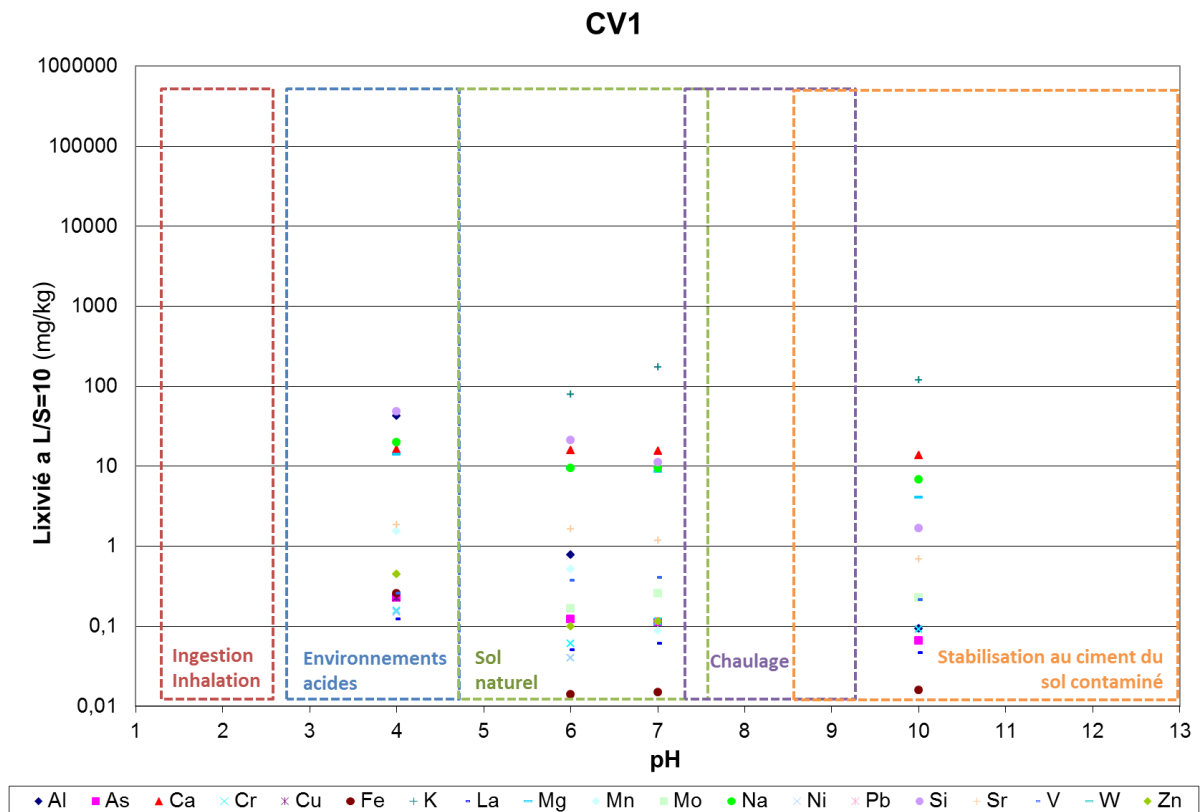


Figure 2-5 – Profil de lixiviation à 4 pH de la cendre CV1

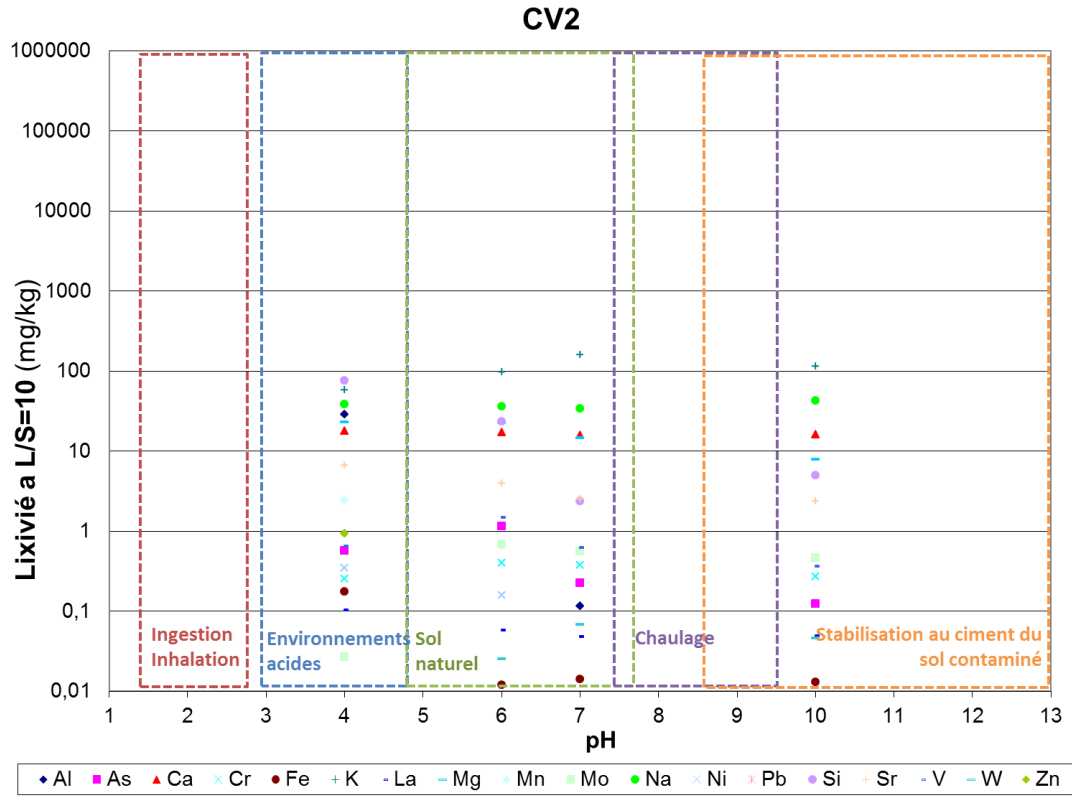


Figure 2-6 – Profil de lixiviation à 4 pH de la cendre CV2

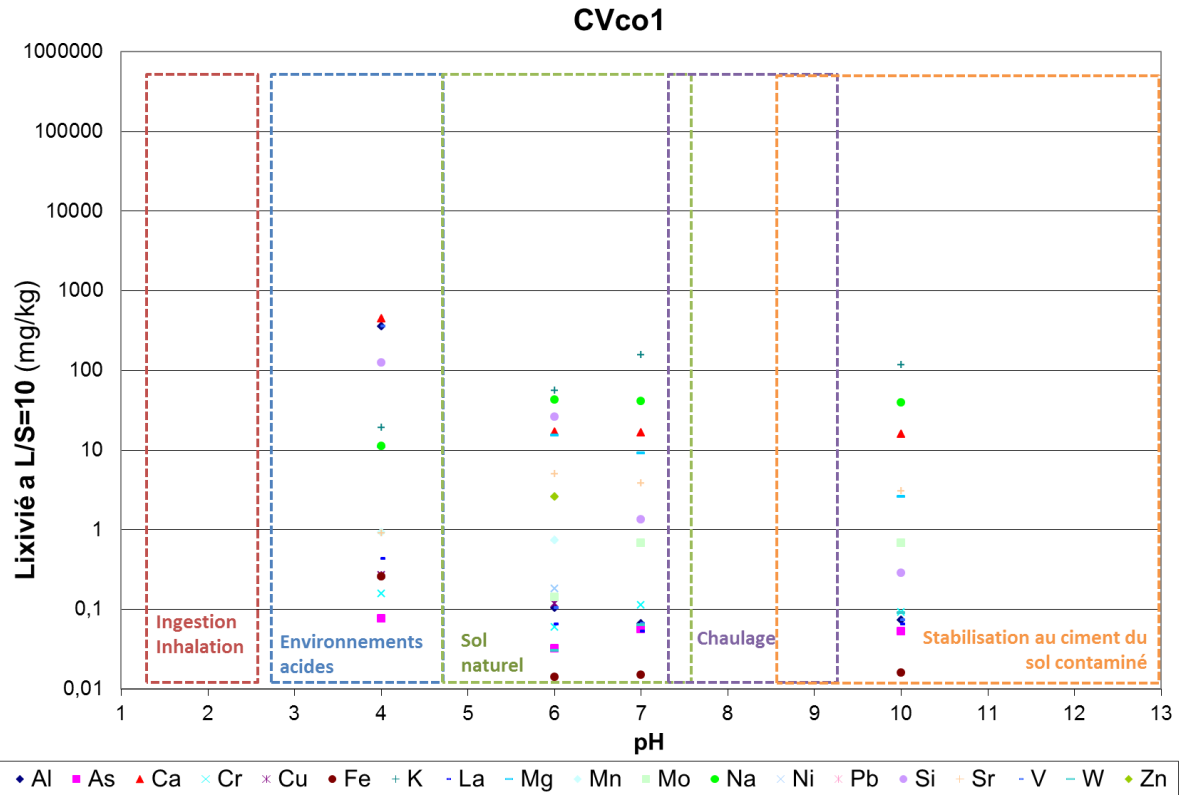


Figure 2-7 – Profil de lixiviation à 4 pH de la cendre CVco1

Le relargage en éléments est sensiblement le même pour les 3 cendres volantes étudiées. Aucune d'entre elles ne relargue de quantités problématiques pour l'environnement de métaux lourds ou d'autres éléments et ce pour aucun des 4 pH testés.

Pour la plupart des éléments, un milieu acide est plus critique qu'un milieu alcalin.

Il faut noter que le comportement dans les ciments sera différent car plusieurs éléments chimiques seront probablement piégés dans les hydrates.

2.4 Caractérisation des autres constituants

2.4.1 Détermination de la finesse

Le Tableau 2-8 donne les finesses Blaine et les passants à 8 et 32 μm obtenus par granulométrie laser du filler impur et des différents lots de filler pur et de gypse utilisés dans le cadre de CEMCALC II. Les troisièmes lots de matériaux ont été nécessaires pour la fabrication en quantité suffisante des ciments pour la Tâche 6 (Phase béton et durabilité).

Type de ciment	Masse volumique (g/cm ³)	Blaine ACMEI (cm ² /kg)	Granulométrie Laser	
			Résultats CRIC	
			<8 μm (%)	<32 μm (%)
Filler pur 2ème lot	2.70	4470	48.62	79.39
Filler pur 3ème lot	2.70	4800	38.69	82.83
Filler impur	2.68	5560	36.88	76.48
Gypse technique 2ème lot	2.37	3600	31.66	80.70
Gypse technique 3ème lot	2.39	3590	31.07	83.06

Tableau 2-8 - Caractérisation de la finesse des matériaux constitutifs des ciments de laboratoire

Le Tableau 2-8 montre que les constituants sont déjà suffisamment fins selon les valeurs repères définies au point 2.1.1, il n'est donc pas nécessaire de les broyer plus.

Les finesses des différents lots de filler et de gypse sont bien suffisamment proches pour ne pas intervenir dans la réactivité des ciments fabriqués à partir de ces matériaux.

2.4.2 Granulométrie

Les refus cumulés obtenus par tamisage humide et par granulométrie laser sont comparés dans le Tableau 2-9. On peut observer que les résultats obtenus par les deux techniques sont comparables (pente de la droite de corrélation proche de 1) et corrélés (indice de corrélation supérieure à 0,99). Le filler pur est caractérisé par une étendue granulaire plus importante que le filler impur (Tableau 2-10). Par ailleurs, les distributions granulaires sont assez continues puisque les paramètres CU restent supérieurs à 2.

Ouverture du tamis [μm]	Refus cumulé [%]			
	Filler impur		Filler pur	
	Tamisage	Laser	Tamisage	Laser
125	1,9	1,5	2,0	1,4
80	4,6	4,2	8,4	7,5
63	8,0	7,0	15,0	12,3
45	12,7	12,9	23,0	20,6

Tableau 2-9 - Comparaison des refus cumulés obtenus par tamisage humide et par diffraction laser

	Filler pur	Filler impur
d_{10} [μm]	1,4	1,2
d_{20} [μm]	2,6	2,2
d_{30} [μm]	4,3	3,8
d_{40} [μm]	6,9	6,4
d_{50} [μm]	11,2	9,8
d_{60} [μm]	18,8	14,5
d_{70} [μm]	30,3	21,4
d_{80} [μm]	46,0	32,2
d_{90} [μm]	70,2	52,3
C_U	13,4	11,7
C_E	49,9	42,3
C_c	0,7	0,8
C_s	1,3	1,5

Tableau 2-10 - Analyses granulométriques par diffraction laser des fillers calcaires

2.4.3 Granulo-morphologie par analyse d'images

2.4.3.1 Paramètre de taille

L'analyse de la taille des matériaux granulaires s'effectue via la construction de courbes granulométriques en volume ou en nombre à partir du paramètre « O. Width ». Pour chaque ouverture de tamis, la courbe donne le pourcentage des particules de l'échantillon dont la largeur est inférieure à cette ouverture. Les courbes granulométriques cumulées des fillers pur et impur sont illustrées aux Figure 2-8 et Figure 2-9. Plus de 100 000 particules ont été analysées. Le Tableau 2-11 compare les résultats obtenus par analyse d'images (pondération en volume) et par diffraction laser.

Type de filler		d ₁₀ [µm]	d ₂₅ [µm]	d ₅₀ [µm]	d ₇₅ [µm]	d ₉₀ [µm]	d ₉₉ [µm]
Pur	AI	9,6	21,9	46,8	80,4	108,9	159,5
	Laser	1,4	3,4	11,2	37,5	70,1	136,3
Impur	AI	6,1	11,8	26,9	49,6	74,7	113,8
	Laser	1,2	2,9	9,8	26,2	52,3	150,8

Tableau 2-11 - Analyses granulométriques des fillers calcaires par diffraction laser et par analyse d'images (pondération en volume)

On peut observer que les diamètres équivalents obtenus par analyse d'images (AI) sont beaucoup plus grands que ceux qui ont été déterminés par diffraction laser. Cette différence de résultat peut être expliquée par :

- la résolution de la caméra CCD qui ne permet pas d'enregistrer des particules inférieures à 0,619 µm ;
- les systèmes de dispersion différents selon la technique de mesure adoptée ;
- les hypothèses restrictives du modèle d'inversion utilisé.

On peut également observer que les maximums mesurés par analyse d'images sont systématiquement inférieurs à ceux calculés par diffraction laser (Tableau 2-11). On peut considérer que les deux facteurs majeurs qui expliquent cette tendance sont :

- la probabilité qu'ont les grosses particules d'être présentes dans la prise d'essai ;
- la probabilité qu'ont les grosses particules, présentes sur la lame, d'être intégralement incluses dans la traverse analysée (puisque le logiciel ne prend pas en compte les particules qui interceptent le bord de l'image). Cette probabilité est inversement proportionnelle à la taille de la particule.

Les courbes granulométriques en volume construites à partir de l'analyse d'images ne semblent donc pas les plus adaptées dans notre cas.

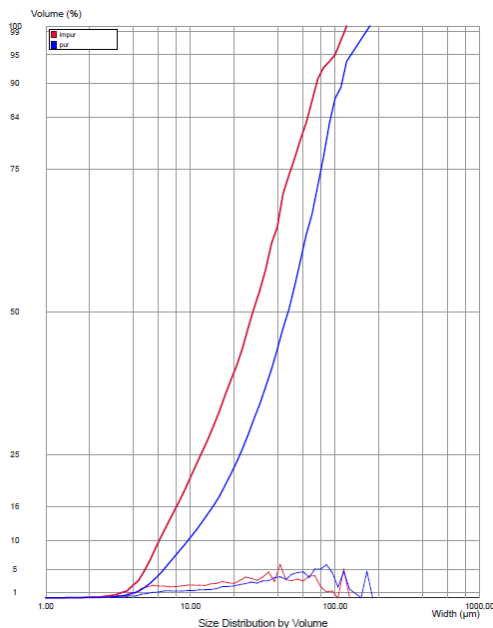


Figure 2-8 – Comparaison des courbes granulométriques cumulées, pondérées en volume, des fillers pur et impur obtenues par analyses d’images

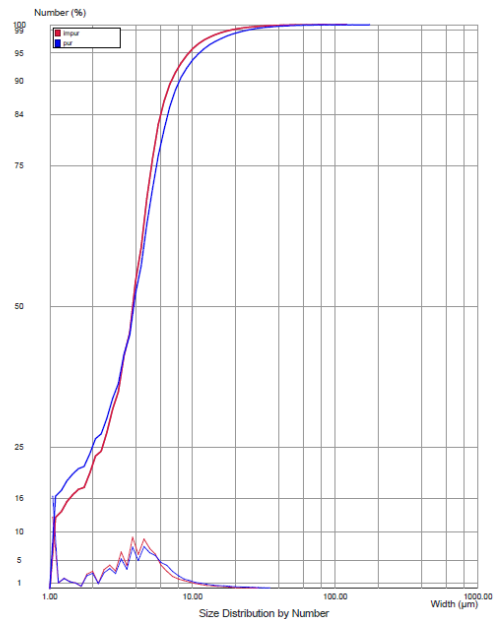


Figure 2-9 – Comparaison des courbes granulométriques cumulées, pondérées en nombre, des fillers pur et impur obtenues par analyses d’images

L’analyse d’images permet par ailleurs d’accéder à la distribution granulométrique en nombre (Tableau 2-12). Cette représentation est particulièrement intéressante car elle permet de quantifier les fines particules présentes dans les fillers, ce qui est difficilement le cas en granulométrie laser.

Les différences observées entre les fillers sont moins marquées, puisque les grosses particules y ont un poids moindre (Tableau 2-12). Comme dans le cas des distributions en volume, la distribution granulométrique du filler pur est plus étendue que celle du filler impur puisqu’il contient plus de grosses particules. Par contre, il existe une distinction notable entre les deux modes de représentation : la seconde analyse permet de mettre en évidence que le nombre de fines particules (en tout cas supérieure à 0,6 µm) est sensiblement plus important dans l’échantillon pur. Grâce à cette analyse en nombre, on peut donc constater que la courbe granulométrique du filler impur est beaucoup plus serrée que celle du filler pur.

Type de filler	Moyenne [µm]	Min [µm]	d ₁₀ [µm]	d ₂₅ [µm]	d ₅₀ [µm]	d ₇₅ [µm]	d ₉₀ [µm]	d ₉₉ [µm]	Max [µm]
Pur	4,61	0,619	0,619	1,97	3,88	5,61	8,08	23,91	169
Impur	4,23	0,619	0,619	2,35	3,77	5,12	7,07	18,05	114,8

Tableau 2-12 - Analyses granulométriques en nombre des fillers calcaires par analyse d’images

2.4.3.2 Paramètre de forme

L’analyse des paramètres de forme est réalisée sur la tranche granulaire (10-15) µm de manière à obtenir une résolution suffisante tout en assurant la présence d’un grand nombre de particules (plus de 3000). La Figure 2-10 illustre la distribution morphométrique des deux fillers dans la tranche granulaire choisie.

Le paramètre O.Bluntness est de 0,69 pour les deux fillers. Par contre, on note une légère différence quant à l'élongation des particules puisque le filler pur semble être légèrement plus allongé que l'impur (0,320 de moyenne contre 0,300 pour l'impur).

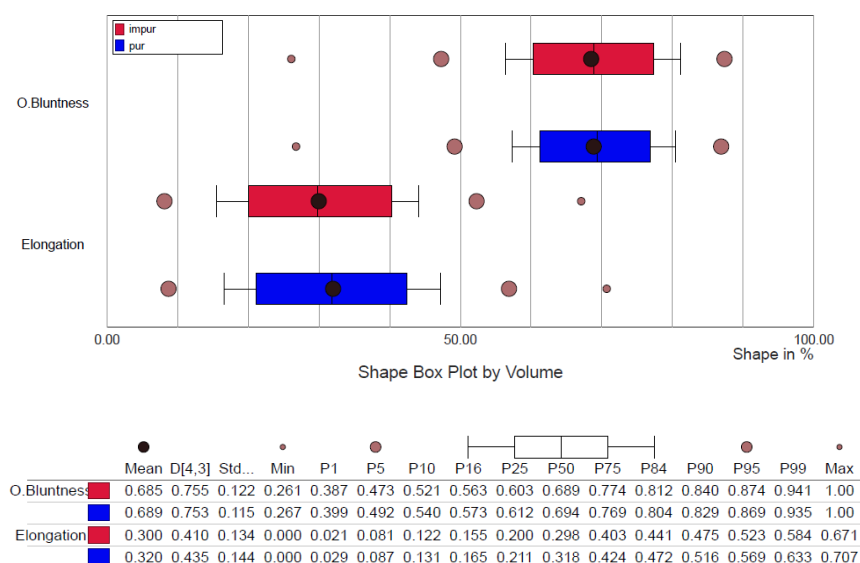


Figure 2-10 – Résultats des paramètres de forme (pondération en volume) sur les deux fillers calcaires

Il est également possible de faire cette analyse en pondérant les valeurs en nombre (Figure 2-11). On constate les mêmes tendances : le paramètre d'émoussé est très proche pour les deux fillers et le paramètre d'élongation est plus important pour le filler pur, ce qui traduit des particules de forme plus allongée.

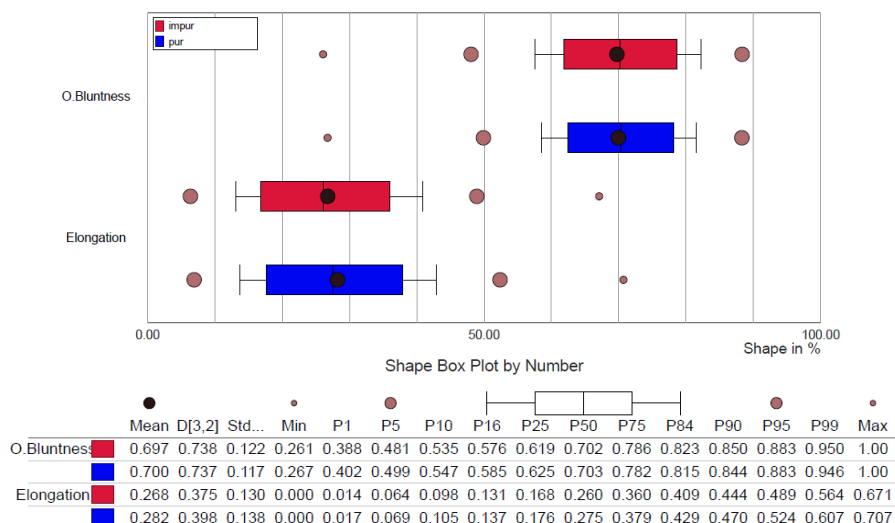


Figure 2-11 – Résultats des paramètres de forme (pondération en nombre) sur les deux fillers calcaires

2.4.4 Surface spécifique

Le Tableau 2-13 reprend l'ensemble des surfaces spécifiques mesurées, par les deux méthodes, sur des échantillons de fillers pur et impur. Le paramètre de Sauter utilisé pour mesurer la surface spécifique par voie laser est une moyenne de 3 courbes.

Filler	Masse volumique [g/cm ³]	d [3,2] [μm]	Ss,BET [m ² /g]	Ss,Laser [m ² /g]
Pur	2,71	3,846	0,904 ± 0,036	0,58
Impur	2,73	3,540	4,43 ± 0,054	0,62

Tableau 2-13 - Surfaces spécifiques B.E.T. et laser des fillers calcaires

La surface spécifique du filler pur est inférieure à la surface spécifique du filler impur, quel que soit la technique de mesure envisagée.

La surface spécifique B.E.T, qui prend en considération la forme, est supérieure à la surface spécifique calculée par diffraction laser. Par ailleurs, la grande différence des résultats obtenus dans le cas du filler impur peut être expliquée par la présence des feuillets d'argile : ceux-ci offrent une très grande surface interne sur laquelle les particules d'azote peuvent s'adsorber.

2.4.5 Analyse chimique

Le Tableau 2-14 reprend les analyses chimiques des deux fillers et du gypse technique utilisés pour la fabrication des ciments. Les fillers pur et impur ont été caractérisés à la fois à l'ULg et au CRIC, les résultats des deux laboratoires y sont repris.

	résultats ULg	CRIC	CRIC	CRIC	résultats ULg	CRIC	CRIC	CRIC
	Filler pur 1er lot	Filler pur 1er lot	Filler pur 2ème lot	Filler pur 3ème lot	Filler impur	Filler impur	Gypse technique 2ème lot	Gypse technique 3ème lot
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	/	43.77	43.86	43.88	/	36.12	19.79	18.36
P.F. sous air 950°C (%)	/	/	/	43.40	/	34.97	/	/
P.F. sous air 500°C (%) ULg	0.12	/	/	/	1.18	/	/	/
P.F. sous air 975°C (%) ULg	43.56	/	/	/	35.29	/	/	/
SiO ₂ (%)	0.43	/	0.19	0.23	14.22	13.98	/	/
Al ₂ O ₃ (%)	0.16	/	0.05	0.06	2.66	2.45	/	/
Fe ₂ O ₃ (%)	0.12	/	0.04	0.05	1.11	1.11	/	/
CaO (%)	57.00	/	55.04	55.04	43.21	42.76	/	/
SrO (%)	/	/	0.02	0.02	/	0.11	/	/
Na ₂ O (%)	0.04	/	0.00	0.00	0.13	0.07	/	/
K ₂ O (%)	0.01	/	0.01	0.01	0.74	0.77	/	/
MgO (%)	0.34	/	0.33	0.30	1.34	1.27	/	/
Mn ₂ O ₃ (%)	0.00	/	0.00	0.01	0.01	0.02	/	/
TiO ₂ (%)	0.02	/	0.00	0.00	0.18	0.13	/	/
P ₂ O ₅ (%)	0.01	/	/	/	0.19	0.17	/	/
S ⁻ (%)	/	/	0.02	/	/	0.52	/	/
SO ₃ (%)	0.01	/	0.00	0.01	0.28	0.25	46.21	47.03
Cl ⁻ (%)	0.001	/	/	/	0.005	/	/	/
TOTAL (%)	101.70	/	99.57	99.61	99.36	99.73	66.00	65.39
Na ₂ O équ (%)	0.05	/	0.01	0.01	0.62	0.58	/	/
RI (%)	0.56	/	43.86	0.32	18.25	16.36	/	/
CO ₂ (%)	43.44	43.73	43.83	43.85	34.11	35.08	0.70	0.71
H ₂ O (%)	0.12	0.04	0.03	0.03	1.18	1.04	19.10	17.65

Tableau 2-14 - Composition chimique des matériaux constitutifs des ciments de laboratoire

Avec : P.F. : Perte au Feu ; Na₂O équ : Na₂O équivalent = %Na₂O + 0,658 %K₂O ; RI : Résidu Insoluble ; / : analyse non effectuée

Le Tableau 2-14 montre avec le filler impur que les résultats obtenus à l'ULg et au CRIC sont très proches.

L'analyse chimique du filler impur met en évidence une présence importante de silice (14%). Les différents éléments autres que le CaO sont également présents en plus grande quantité que dans le cas du filler pur. Le CaO provient majoritairement du calcaire (CaCO₃) et la perte au feu relativement élevée (35%) est due également au dégagement du CO₂ du calcaire.

Le régulateur de prise utilisé pour ajuster la teneur en sulfates à 3,00% étant un gypse technique, il ne s'est pas avéré nécessaire d'effectuer une analyse chimique complète de celui-ci étant donné sa pureté. Sa teneur en sulfates a été toutefois mesurée afin d'effectuer

le calcul des compositions de ciment de laboratoire. L'évaluation de la teneur en $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ du gypse 2^{ème} lot effectuée par calcul sur base de sa teneur en sulfates est de 99,7%, ce qui est représentatif de sa pureté.

Différents lots de filler et de gypse ont été nécessaires pour la fabrication de l'entièreté des ciments du projet CEMCALC II. Le Tableau 2-14 montre que les différences entre les différents lots de filler calcaire pur et de gypse technique ne sont pas marquées. La composition chimique de ces lots n'influencera donc pas sur le comportement des ciments les contenant.

2.4.6 Analyse minéralogique

Les Figure 2-12, Figure 2-18 et Figure 2-13 présentent l'identification des phases minéralogiques faite au CRIC par DRX des matériaux constituant les ciments de laboratoire fabriqués et étudiés.

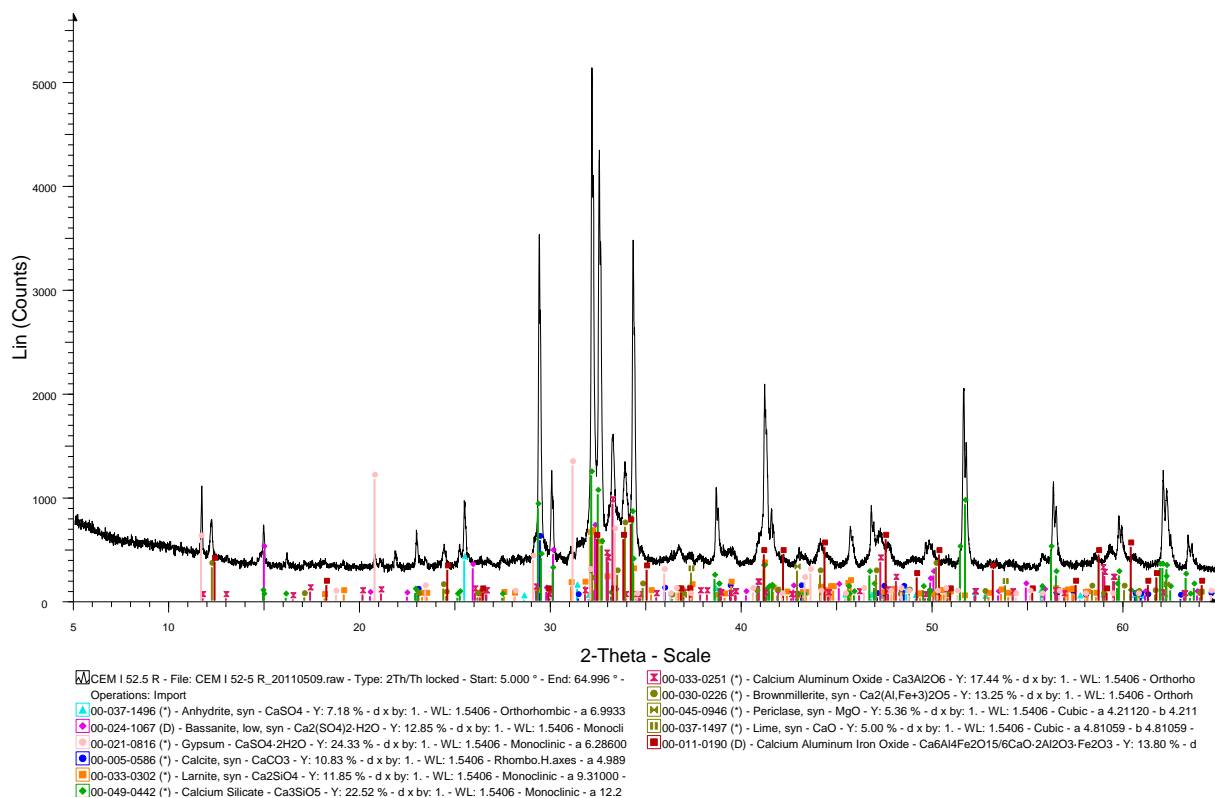


Figure 2-12 – Diffractogramme du CEM I 52,5 R

Comme déjà vu au point 2.2.3, l'analyse DRX (Figure 2-12) montre que le régulateur de prise utilisé dans le CEM I est un mélange de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), de bassanite ($\text{CaSO}_4 \cdot 1/2\text{H}_2\text{O}$) et d'anhydrite (CaSO_4). Les autres phases présentes dans ce ciment sont les phases classiques du clinker, à savoir C_3S , C_2S (larnite), C_3A et C_4AF (brownmillerite). Les phases mineures de ce ciment sont la chaux (CaO) et le périclase (MgO).

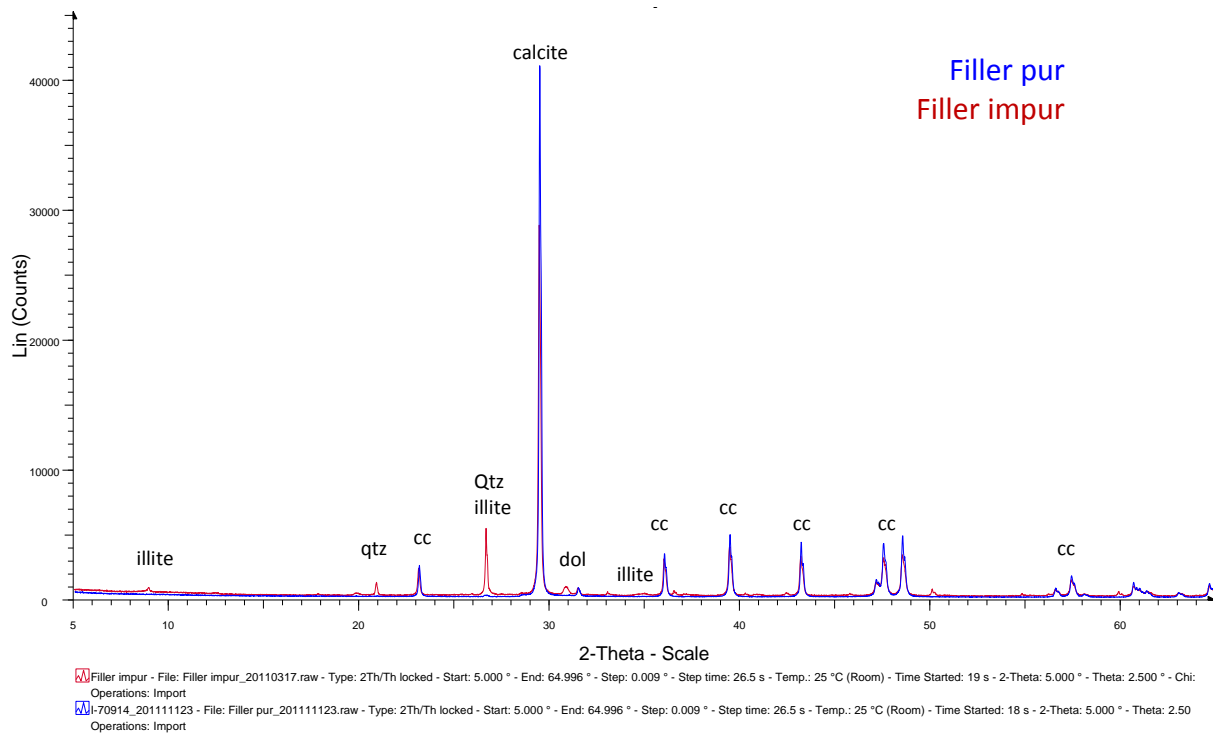


Figure 2-13 – Comparatif des diffractogrammes du filler pur et du filler impur (CRIC)

Avec : cc : calcite ; qtz : quartz ; dol : dolomite

La Figure 2-13 montre que le filler impur contient en effet d'autres phases mineures qui s'ajoutent à la calcite, unique phase du filler pur. Il s'agit de quartz (SiO_2), d'illite ($\text{K}(\text{Al}_4\text{Si}_2\text{O}_9(\text{OH})_3$) qui expliquent sa teneur en SiO_2 relativement élevée (Tableau 2-14) et de dolomite ($\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$) qui explique la teneur en MgO plus élevée que dans le cas du filler pur (Tableau 2-14).

Un dosage des phases minéralogiques par la méthode Rietveld, sur base du diffractogramme, a été effectué sur le filler impur. Au vu de sa composition chimique, on a considéré que le filler pur contient 100% de calcite. (Tableau 2-15)

Composition minéralogique	FP	FI
Calcite (%) CaCO_3	100,0	80,0
Dolomite (%) $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$	0,0	4,5
Quartz (%) SiO_2	0,0	11,1
Illite (%) $(\text{K},\text{H}_3\text{O})(\text{Al},\text{Mg},\text{Fe})_2(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}[(\text{OH})_2,(\text{H}_2\text{O})]$	0,0	2,7
Chlorite (%) $(\text{Fe},\text{Mg},\text{Al})_6(\text{Si},\text{Al})_4\text{O}_{10}(\text{OH})_8$	0,0	1,0
Pyrite (%) Fe_2S	0,0	0,8
TOTAL (%)	100,0	100,0

Tableau 2-15 – Dosage des phases minéralogiques des deux fillers calcaires étudiés par la méthode Rietveld

La valeur de bleu élevée du filler impur confirme la présence d'argiles dans ce filler. Il contient, d'autre part, sensiblement plus de matières organiques que le filler pur. (Tableau 2-16)

	FP	FI
Valeur de bleu (g/kg de filler)	1,1	6,9
Teneur en matières organiques (% en masse)	0,3	0,7

Tableau 2-16 – Comparaison de la valeur de bleu et de la teneur en matière organique des deux fillers calcaires étudiés

Les Figure 2-14 et Figure 2-15 présentent les diffractogrammes obtenus à l'ULg sur le filler pur et le filler impur. Les Figure 2-16 et Figure 2-17 sont les diffractogrammes obtenus sur le filler impur tamisé à différentes fractions granulométriques.

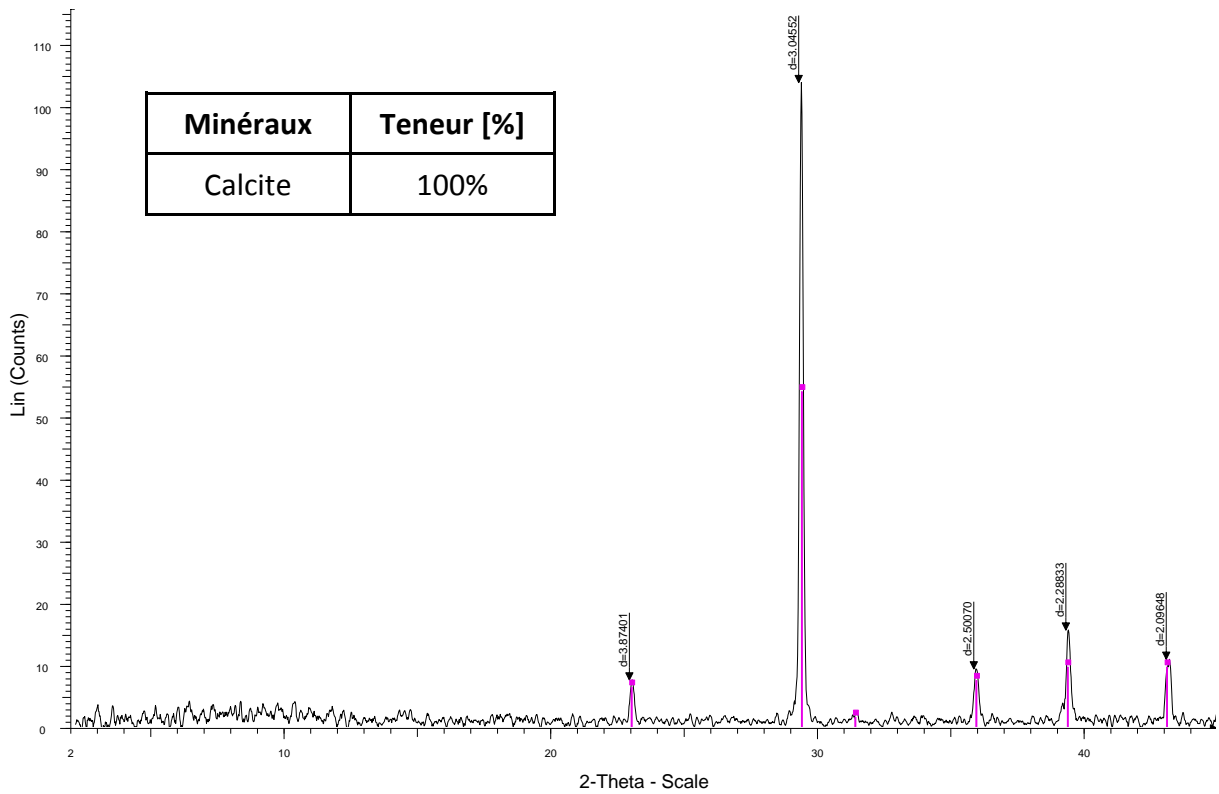


Figure 2-14 – Diffractogramme du filler pur (ULg)

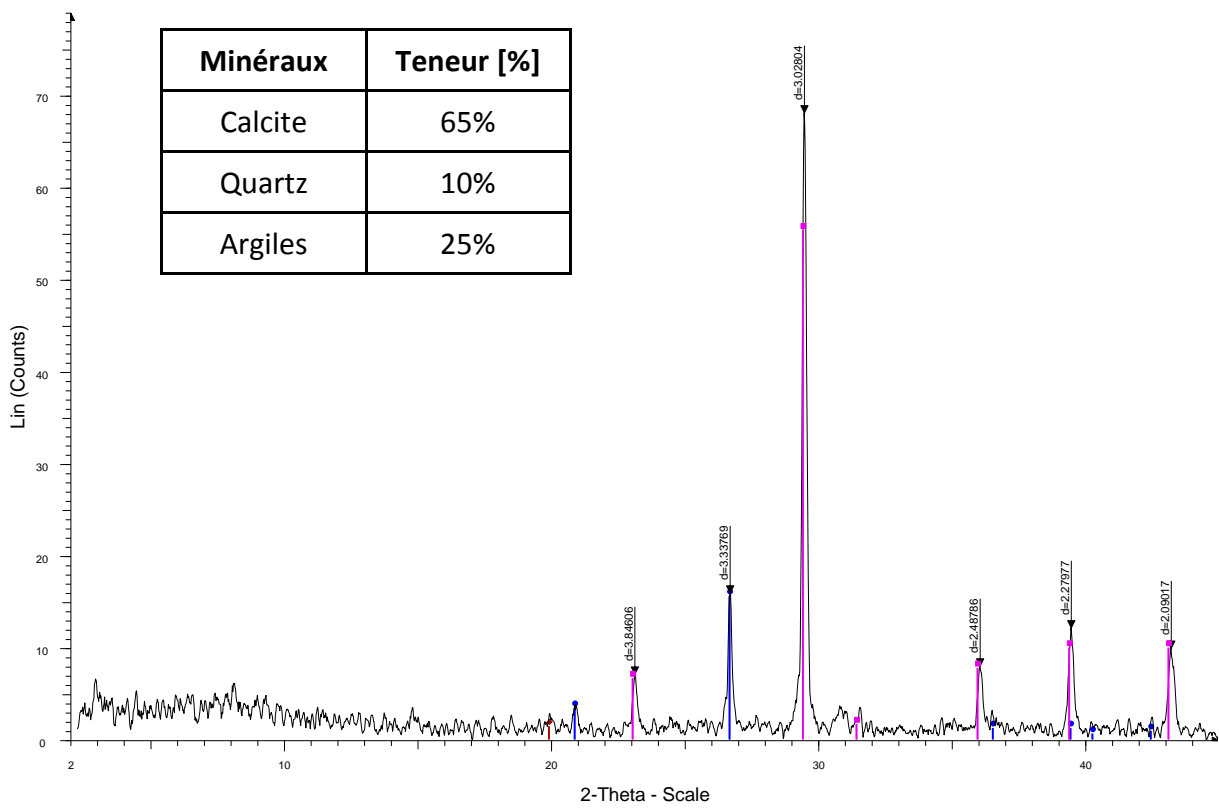


Figure 2-15 – Diffractogramme du filler impur (ULg)

Le diffractogramme des poudres du filler pur montre la présence de calcite, alors que celui du filler impur est caractérisé par l'association de calcite, de quartz et d'argiles, respectivement à 65, 10 et 25 %.

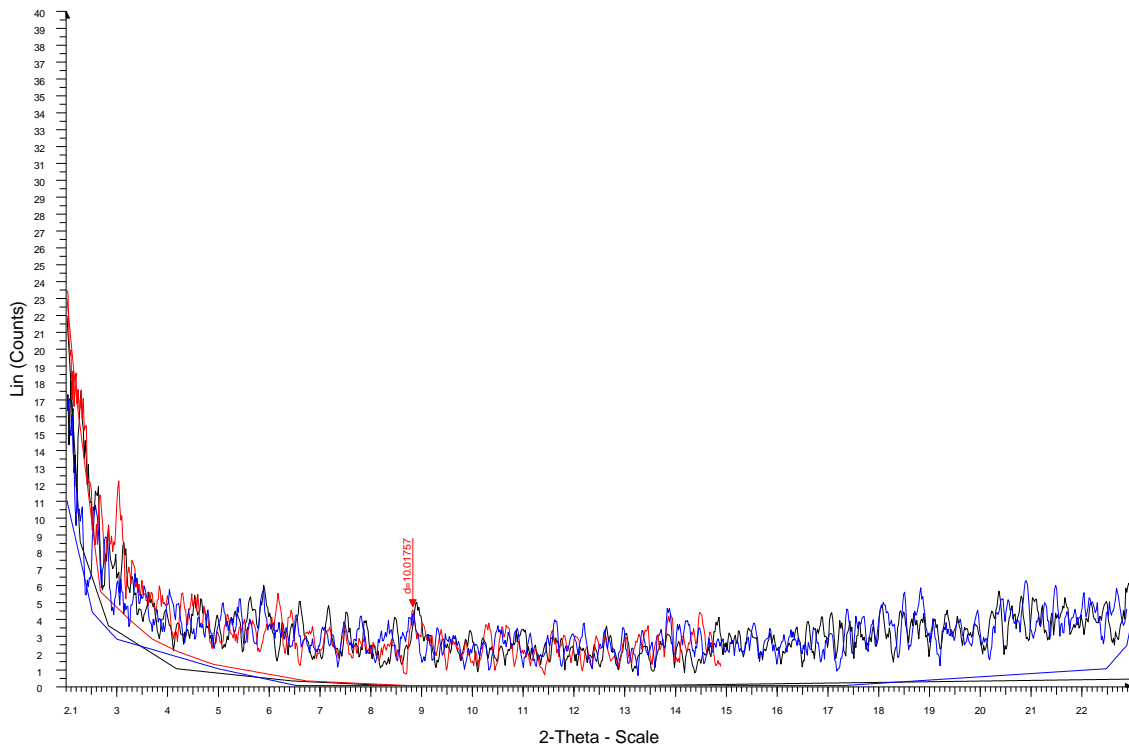


Figure 2-16 – Diffractogramme du passant à 2 µm de filler impur (ULg)
(conditions Normale, éthylène glycol et chauffage à 500°C)

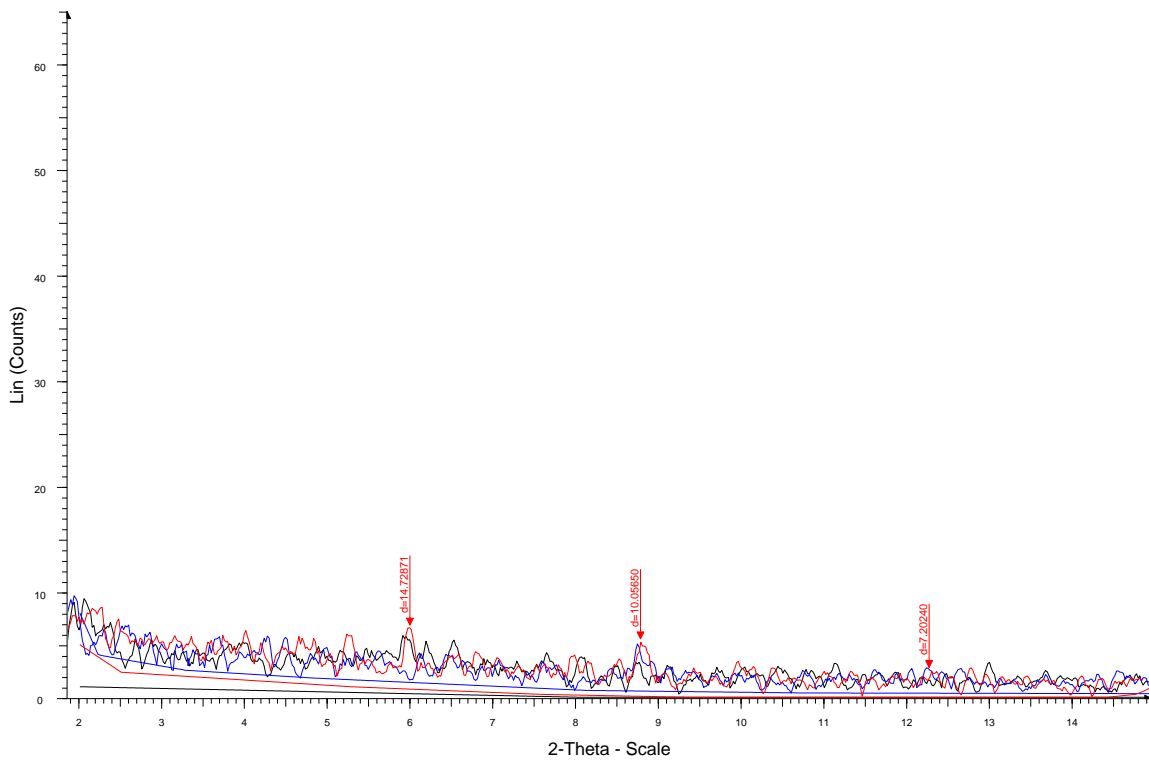


Figure 2-17 – Diffractogramme du passant à 63 µm de filler impur (ULg)
(conditions Normale, éthylène glycol et chauffage à 500°C)

Si le passant à 2 µm du filler impur ne contient pas d'argile, on peut observer de l'illite et de la chlorite dans la fraction comprise entre 2 et 63 µm. Aucun minéral argileux de type gonflant n'a été observé.

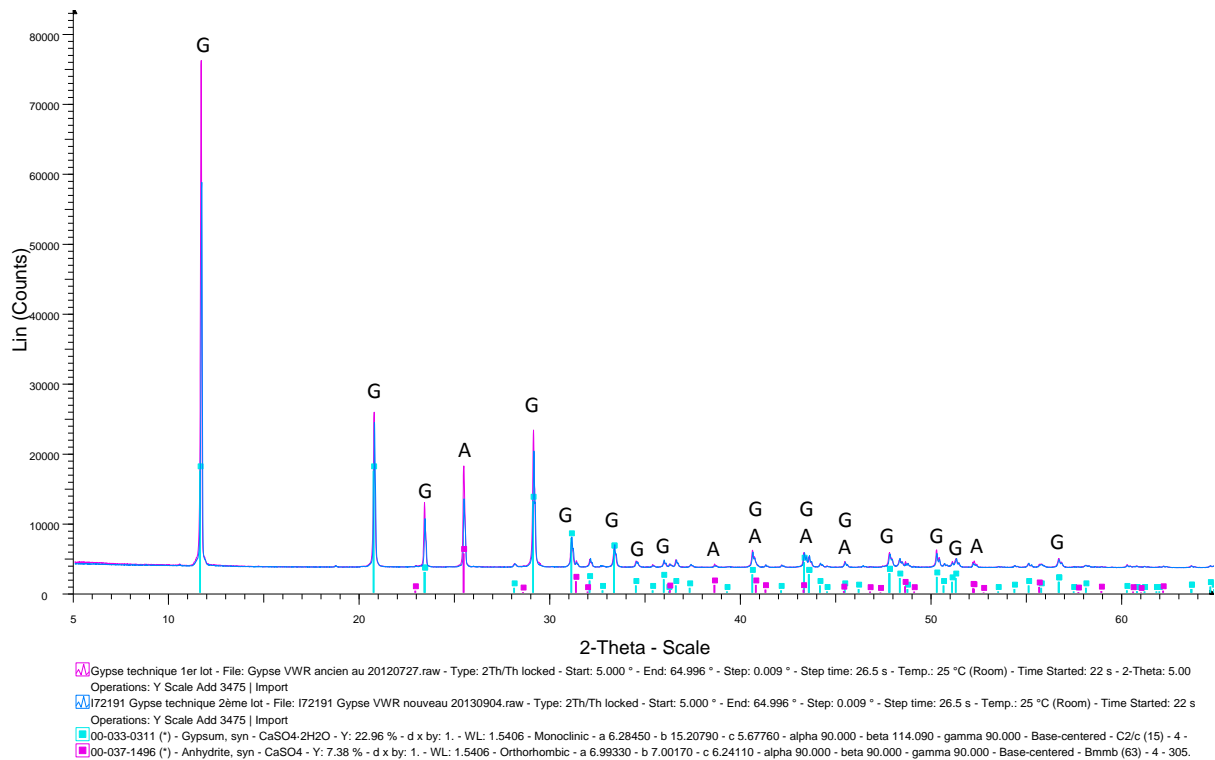


Figure 2-18 – Diffractogramme du gypse technique

Avec : G : gypse ; A : anhydrite

Le régulateur de prise utilisé pour ajuster la teneur en sulfates à 3,00% est un gypse technique. La Figure 2-18 montre qu'il est essentiellement constitué de gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) mais également d'un peu d'anhydrite (CaSO_4). Elle permet également de voir que les deux lots commandés de ce gypse technique sont bien identiques.

2.5 Caractérisation des ciments de laboratoire anhydres

Douze compositions de ciments ont été fabriquées en laboratoire pour 3 cendres volantes différentes comme expliqué au point 1. Ils sont constitués des matériaux suivants :

- deux cendres volantes de combustion classiques et une cendre de co-combustion ;
- du CEM I 52,5 R HES cité au point 2.2 ;
- d'un filler calcaire pur (provenant d'un fournisseur membre de la FEDIEX en Région wallonne) ;
- de gypse technique pour atteindre la teneur en sulfates visée de 3,00%.

Leurs compositions cibles sont présentées au Tableau 2-17.

	V (%)	K (%)	L (%)
CEM 1	30	65	5
CEM 2		55	15
CEM 3		45	25
CEM 12		35	35
CEM 4	20	70	10
CEM 5		60	20
CEM 6		50	30
CEM 7		40	40
CEM 8	10	75	15
CEM 9		65	25
CEM 10		55	35
CEM 11		45	45

Tableau 2-17 - Composition cibles des douze ciments de laboratoire

Avec « V » pour cendre volante, « K » pour clinker (contenu dans le CEM I) et « L » pour le filler calcaire

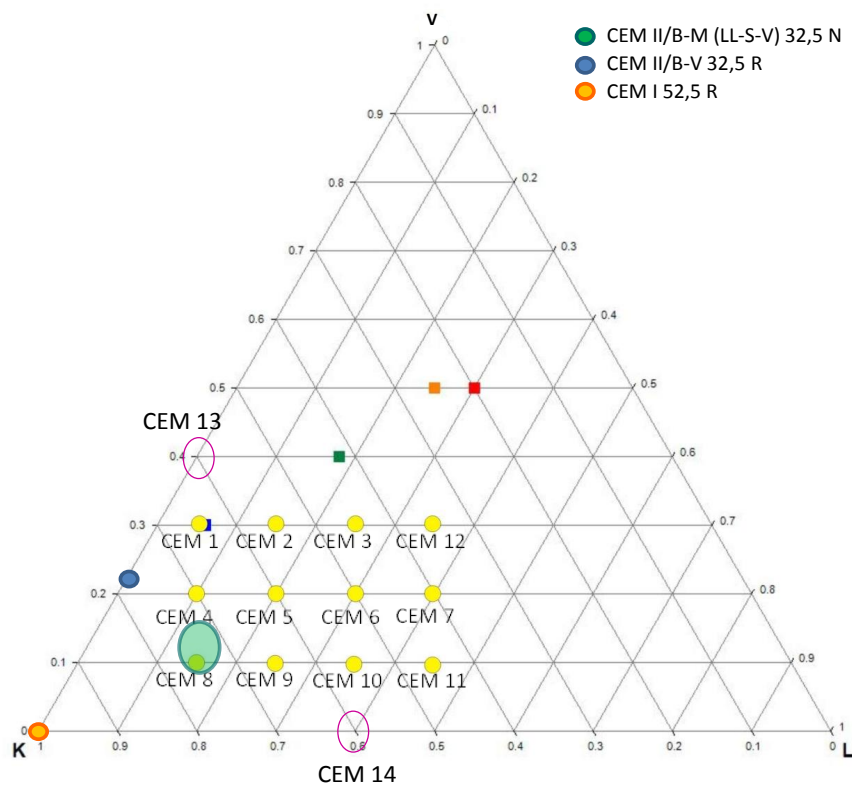


Figure 2-19 – Les douze compositions cibles de ciments étudiés situées dans le diagramme ternaire K-V-L

Avec : K : clinker ; V : cendre volante et L : filler calcaire

On voit que les formulations les plus proches du CEM II/B-V 32,5 R de référence sont les CEM 4 et CEM 1. Ce ciment de référence ne contient, cependant, pas de filler calcaire.

Les formulations se rapprochant du CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N sont les CEM 8, CEM 4 et CEM 9, exception fait que ces ciments ne contiennent pas de laitier contrairement au ciment de référence qui en contient 7% comme vu au Tableau 2-3 du point 2.2.2.

La formulation la plus proche du CEM I 52,5 R est le CEM 8 avec 75% de clinker contre 100% pour le ciment de référence.

Les formulations CEM 13 et CEM 14 ont été fabriquées avec la cendre de combustion CV1 pour effectuer des essais de calorimétrie Langavant supplémentaires. Ces essais ont été réalisés afin de mieux comprendre la contribution de la cendre volante et du filler calcaire dans les mécanismes d'hydratation des ciments les contenant. En effet, la formulation CEM 13 ne contient pas de filler calcaire et la formulation CEM 14 ne contient pas de cendre, ce qui permet de dissocier leurs effets.

Comme dans le cas de CEMCALC I, cinq compositions parmi les douze premières ont été sélectionnées pour l'étude de l'influence de la composition du filler et la phase d'étude sur bétons et de durabilité.

L'**influence de la composition du filler** est évaluée sur base d'un filler calcaire produit par voie sèche qui contient un nombre important d'impuretés, appelé dans le cadre de cette étude « filler impur ». Le choix de ce filler a été défini sur base de sa valeur au bleu élevée, ce qui signifie qu'il est riche en argile et/ou matière organique, mais qu'il reste dans les limites de la norme qui définit les ciments, la NBN EN 197-1 [ii].

2.6 Ciments à base de la cendre volante de combustion classique CV1

2.6.1 Détermination de la finesse

Le Tableau 2-18 reprend les mesures de finesse des douze ciments constitués en laboratoire avec la cendre CV1.

	Type de ciment	Masse volumique (g/cm ³)	Blaine ACMEI (cm ² /kg)	Granulométrie Laser	
				Résultats CRIC	
				<8µm (%)	<32µm (%)
30V 65K 5L	CEM 1 v1	2,74	4000	36,30	78,91
30V 55K 15L	CEM 2 v1	2,69	3940	37,53	79,66
30V 45K 25L	CEM 3 v1	2,65	3880	36,62	75,93
20V 70K 10L	CEM 4 v1	2,84	4200	37,54	86,08
20V 60K 20L	CEM 5 v1	2,78	4120	39,33	81,01
20V 50K 30L	CEM 6 v1	2,75	4100	39,25	78,73
20V 40K 40L	CEM 7 v1	2,70	4010	38,46	77,57
10V 75K 15L	CEM 8 v1	2,95	4370	42,80	87,22
10V 65K 25L	CEM 9 v1	2,94	4430	42,55	85,27
10V 55K 35L	CEM 10 v1	2,82	4240	40,97	84,10
10V 45K 45L	CEM 11 v1	2,79	4210	41,97	83,66
30V 35K 35L	CEM 12 v1	2,60	3810	35,65	76,30
30V 65K 5L	CEM 1 v1 broyeur oscillant	2,86	4450	28,99	86,58
30V 35K 35L	CEM 12 v1 broyeur oscillant	2,72	4320	26,20	79,82

Tableau 2-18 - Caractérisation de la finesse des ciments de laboratoire à base de la cendre CV1

La finesse des douze ciments est proche des critères de granulométrie laser visés dans CEMCALC I (voir point 2.1.1). Le passant à 8 µm minimum est celui du CEM 12 v1 avec 35,65% et le maximum est celui du CEM 8 v1 avec 42,80%. Le passant à 32 µm minimum est celui du CEM 3 v1 avec 75,93% et le maximum est celui du CEM 8 v1 avec 87,22%.

Les finesses Blaine des douze ciments sont proches et tournent autour de 4000 cm²/kg avec un minimum de 3810 cm²/kg pour le CEM 12 v1 et un maximum de 4430 cm²/kg pour le CEM 9 v1.

On peut dès lors considérer que le critère de la finesse ne sera pas prépondérant dans les différences de comportement des ciments à base de la cendre CV1.

2.6.2 Analyse chimique

Le Tableau 2-25 reprend l'analyse chimique des douze ciments de laboratoire constitués de la cendre CV1.

	30V 65K 5L	30V 55K 15L	30V 45K 25L	20V 70K 10L	20V 60K 20L	20V 50K 30L	20V 40K 40L	10V 75K 15L	10V 65K 25L	10V 55K 35L	10V 45K 45L	30V 30K 35L	40V 60K 0L	0V 60K 40L
	CEM 1 v1	CEM 2 v1	CEM 3 v1	CEM 4 v1	CEM 5 v1	CEM 6 v1	CEM 7 v1	CEM 8 v1	CEM 9 v1	CEM 10 v1	CEM 11 v1	CEM 12 v1	CEM 13 v1	CEM 14 v1
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	3.48	7.81	12.03	5.59	9.91	14.12	18.36	7.56	11.80	16.12	20.35	16.48	1.35	17.74
P.F. à l'air 950°C (%)	4.89	9.00	13.06	6.32	10.44	14.41	18.54	7.79	11.86	16.08	20.09	17.18	/	/
SiO₂ (%)	26.81	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Al₂O₃ (%)	11.05	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Fe₂O₃ (%)	4.71	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
CaO (%)	44.71	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SrO (%)	0.10	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Na₂O (%)	0.47	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
K₂O (%)	1.56	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
MgO (%)	1.13	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Mn₂O₃ (%)	0.08	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
TiO₂ (%)	0.49	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
P₂O₅ (%)	0.38	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
S²⁻ (%)	0.03	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SO₃ (%)	3.08	3.15	3.21	3.23	3.01	3.19	3.14	3.10	3.13	3.05	3.08	3.11	2.96	2.95
Cl⁻ (%)	0.019	0.018	0.014	0.021	0.019	0.016	0.012	0.023	0.020	0.017	0.014	0.011	/	/
TOTAL (%)	99.51	12.17	16.28	9.57	13.47	17.62	21.69	10.91	15.01	19.15	23.18	20.30	2.96	2.95
Na₂O équ (%)	1.50	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RI (%)	24.09	/	/	/	/	/	/	7.93	/	/	/	/	/	/
CaO libre (%)	0.50	0.35	0.31	0.57	0.51	0.38	0.24	0.59	0.44	0.38	0.34	0.19	/	/
CO₂ (%)	2.61	6.86	11.01	4.76	9.01	13.15	17.31	6.80	10.95	15.19	19.36	15.34	0.44	16.96
H₂O (%)	0.87	0.94	1.02	0.74	0.91	0.96	1.05	0.77	0.85	0.92	0.98	1.14	0.91	0.78

Tableau 2-19 - Composition chimique des ciments de laboratoire à base de CV1

Avec : P.F. : Perte au Feu ; Na₂O équ : Na₂O équivalent = %Na₂O + 0,658 %K₂O ; RI : Résidu Insoluble ; / : analyse non effectuée

Le Tableau 2-19 montre que les teneurs en sulfates (SO₃) des quatorze ciments sont bien proches de 3,00%, qui est, comme mentionné au point 2.4.5, la valeur visée pour le calcul des compositions des ciments. La teneur en chlorures des ciments est bien inférieure au seuil maximal de 0,10% imposé par la norme NBN B12-110 [xvi].

Les pertes au feu et teneurs en CO₂ augmentent avec la quantité de filler dans le ciment du fait de la présence de calcaire (CaCO₃).

Le Tableau 2-20 montre que les teneurs en constituants des ciments de laboratoire à base de la cendre CV1 respectent bien les proportions visées.

		Proportion Cendre (%)	Proportion Clinker (%)	Proportion Filler calcaire (%)	Proportion Laitier (%)	Total (%)
30V 65K 5L	CEM 1 v1	30.8	63.7	5.5	0.0	100.0
30V 55K 15L	CEM 2 v1	30.9	54.7	14.4	0.0	100.0
30V 45K 25L	CEM 3 v1	30.9	45.9	23.2	0.0	100.0
30V 35K 35L	CEM 12 v1	30.7	37.1	32.3	0.0	100.1
20V 70K 10L	CEM 4 v1	20.7	69.3	10.0	0.0	100.0
20V 60K 20L	CEM 5 v1	20.8	60.2	19.0	0.0	100.0
20V 50K 30L	CEM 6 v1	20.9	51.4	27.7	0.0	100.0
20V 40K 40L	CEM 7 v1	20.8	42.7	36.5	0.0	100.0
10V 75K 15L	CEM 8 v1	10.6	75.1	14.3	0.0	100.0
10V 65K 25L	CEM 9 v1	10.7	66.2	23.1	0.0	100.0
10V 55K 35L	CEM 10 v1	10.7	57.3	31.9	0.0	99.9
10V 45K 45L	CEM 11 v1	10.7	48.6	40.7	0.0	100.0
40V 60K 0L	CEM 13 v1	41.3	58.7	0.0	0.0	100.0
0V 60K 40L	CEM 14 v1	0.0	64.4	35.6	0.0	100.0

Tableau 2-20 – Détermination de la teneur en constituants des ciments de laboratoire à base de CV1

Les ciments plus riches en filler calcaire (CEM7, CEM 10 et CEM 11) s'éloignent un peu des teneurs en clinker et filler visées. Cela est probablement dû au fait que le facteur $\left(\frac{MMCaCO_3}{MMCO_2}\right)$ utilisé pour calculer la teneur en $CaCO_3$ selon la norme EN 196-4 est de 2 pour tenir compte du fait que les fillers contiennent parfois des impuretés alors que le filler utilisé dans cette étude n'en contient quasiment pas comme vu au Tableau 2-14. Le facteur devrait donc être de 2,273. La teneur en clinker étant obtenue par soustraction des teneurs en autres constituants, elle est automatiquement faussée lorsqu'une ou plusieurs teneurs des autres constituants ne sont pas correctes.

Les résultats obtenus restent cependant très proches des valeurs visées.

2.6.3 Analyse minéralogique

La Figure 2-20 permet une identification plus aisée des phases sur l'exemple du CEM 1 v1 et la Figure 2-21 compare les douze ciments à base de CV1 entre eux.

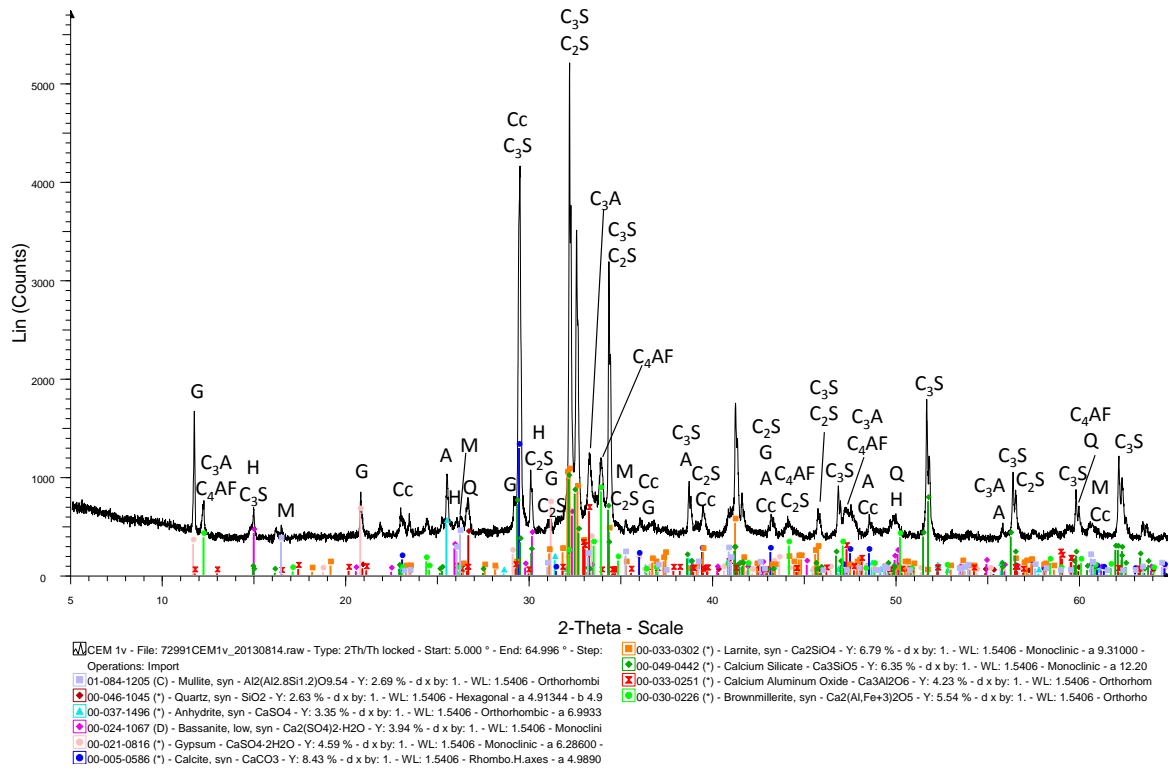


Figure 2-20 – Diffractogramme du CEM 1 v1 avec identification des raies
 Avec : G : gypse ; H : hemi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; M : mullite ; Q : quartz

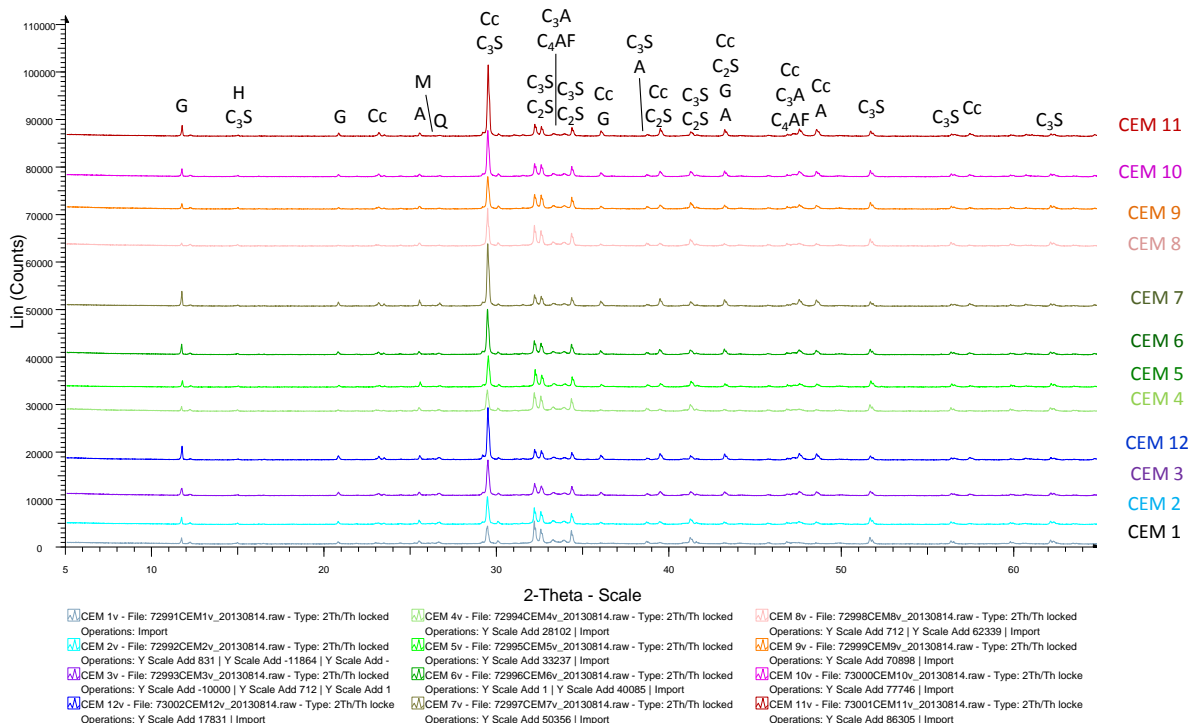


Figure 2-21 – Comparaison des diffractogrammes des douze ciments de laboratoire à base de la cendre CV1

Avec : G : gypse ; H : hemi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; M : mullite ; Q : quartz

La Figure 2-21 met en évidence que la raie majeure de la calcite est moins intense dans les cas des ciments aux compositions plus pauvres en filler calcaire et inversement. D'autre part, cette figure met en évidence qu'il n'y a pas eu de pollution lors des mélanges car les douze ciments contiennent exactement les mêmes phases ; la seule différence est la proportion de celles-ci qui varie en fonction de la teneur en constituants qui diffère selon les mélanges.

2.7 Ciments à base de la cendre volante de co-combustion CVco1

2.7.1 Détermination de la finesse

Le Tableau 2-18 reprend les mesures de finesse des douze ciments constitués en laboratoire avec la cendre de co-combustion CV co1.

	Type de ciment	Masse volumique (g/cm ³)	Blaine ACME (cm ² /kg)	Granulométrie Laser	
				Résultats CRIC	
				<8µm (%)	<32µm (%)
30V 65K 5L	CEM 1v co1	2.79	4190	36.34	83.04
30V 55K 15L	CEM 2v co1	2.75	4160	34.23	82.70
30V 45K 25L	CEM 3v co1	2.73	3970	34.32	81.42
20V 70K 10L	CEM 4v co1	2.86	4210	39.24	86.18
20V 60K 20L	CEM 5v co1	2.83	4160	39.48	84.46
20V 50K 30L	CEM 6v co1	2.78	4160	39.40	83.59
20V 40K 40L	CEM 7v co1	2.75	4180	37.85	82.14
10V 75K 15L	CEM 8v co1	2.94	4000	41.83	88.69
10V 65K 25L	CEM 9v co1	2.91	4260	42.26	87.17
10V 55K 35L	CEM 10v co1	2.86	4160	42.12	85.77
10V 45K 45L	CEM 11v co1	2.79	4240	40.79	83.70
30V 35K 35L	CEM 12v co1	2.62	3910	35.14	78.84

Tableau 2-21 - Caractérisation de la finesse des ciments de laboratoire à base de la cendre CV co1

La finesse des douze ciments est proche des critères de granulométrie laser visés dans CEMCALC I (voir point 2.1.1). Le passant à 8 µm minimum est celui du CEM 2v co1 avec 34,23% et le maximum est celui du CEM 9v co1 avec 42,26%. La finesse de ces ciments a donc tendance à être un peu plus faible que ce critère repère comme c'est le cas pour les deux CEM II de référence (Tableau 2-1). Le passant à 32 µm minimum est celui du CEM 12v co1 avec 78,84% et le maximum est celui du CEM 8v co1 avec 88,69%.

Comme dans le cas des ciments à base de la cendre de combustion CV1, la finesse Blaine des douze ciments tourne autour de 4000 cm²/kg dont la moins grande est celle du CEM 12 co1 avec 3910 cm²/kg et la plus grande, celle du CEM 9 co1 avec 4260 cm²/kg.

On peut dès lors considérer que le critère de la finesse ne sera pas prépondérant dans les différences de comportement des ciments à base de la cendre de co-combustion CVco1.

2.7.2 Analyse chimique

Le Tableau 2-22 reprend l'analyse chimique des douze ciments de laboratoire à base de la cendre de co-combustion CVco1.

	30V 65K 5L	30V 55K 15L	30V 45K 25L	20V 70K 10L	20V 60K 20L	20V 50K 30L	20V 40K 40L	10V 75K 15L	10V 65K 25L	10V 55K 35L	10V 45K 45L	30V 30K 35L
	CEM 1v co1	CEM 2v co1	CEM 3v co1	CEM 4v co1	CEM 5v co1	CEM 6v co1	CEM 7v co1	CEM 8v co1	CEM 9v co1	CEM 10v co1	CEM 11v co1	CEM 12v co1
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	3.50	7.93	10.65	5.73	10.17	14.32	17.44	7.76	11.84	14.97	20.71	16.55
P.F. à l'air 950°C (%)	4.24	8.33	11.05	5.98	10.12	14.15	16.94	7.71	11.72	14.47	19.65	16.19
SiO ₂ (%)	27.00	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Al ₂ O ₃ (%)	10.93	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Fe ₂ O ₃ (%)	5.27	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
CaO (%)	45.34	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SrO (%)	0.13	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Na ₂ O (%)	0.56	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
K ₂ O (%)	0.94	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
MgO (%)	1.02	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Mn ₂ O ₃ (%)	0.07	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
TiO ₂ (%)	0.63	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
P ₂ O ₅ (%)	0.43	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
S ⁻ (%)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SO ₃ (%)	2.95	2.93	3.03	2.95	3.06	2.92	3.01	2.99	2.73	3.10	2.94	2.80
Cl ⁻ (%)	0.021	0.018	0.015	0.022	0.019	0.017	0.014	0.024	0.021	0.019	0.014	0.012
TOTAL (%)	99.53	11.28	14.10	8.95	13.20	17.09	19.96	10.72	14.47	17.59	22.60	19.00
Na ₂ O équ (%)	1.18	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RI (%)	23.50	/	/	/	/	/	/	/	/	8.48	/	/
CaO libre (%)	0.59	0.45	0.35	0.68	0.50	0.43	0.34	0.64	0.59	0.49	0.33	0.29
CO ₂ (%)	2.69	7.05	9.70	4.94	9.23	13.46	16.40	7.01	0.74	14.11	19.83	15.64
H ₂ O (%)	0.81	0.88	0.95	0.79	0.94	0.86	1.04	0.75	11.10	0.86	0.88	0.91

Tableau 2-22 - Composition chimique des matériaux constitutifs des ciments de laboratoire

Avec : P.F. : Perte au Feu ; Na₂O équ : Na₂O équivalent = %Na₂O + 0,658 %K₂O ; RI : Résidu Insoluble ; / : analyse non effectuée

Le Tableau 2-22 montre que les teneurs en sulfates (SO₃) sont bien proches des 3,00% visés pour le calcul des compositions des ciments. La teneur en chlorures des ciments est bien inférieure au seuil maximal de 0,10% imposé par la norme NBN B12-110 [xvi].

Comme observé pour les ciments à base de CV1, les pertes au feu et teneurs en CO₂ augmentent avec la quantité de filler dans le ciment du fait de la présence de calcaire (CaCO₃).

Le Tableau 2-23 donne les proportions de constituants déterminées selon la norme EN 196-4 [xii]. Il montre que les proportions visées lors des mélanges sont bien respectées.

		Proportion Cendre (%)	Proportion Clinker (%)	Proportion Filler calcaire (%)	Proportion Laitier (%)	Total (%)
30V 65K 5L	CEM 1v co1	30.7	63.7	5.6	0.0	100.0
30V 55K 15L	CEM 2v co1	30.7	54.5	14.8	0.0	100.0
30V 45K 25L	CEM 3v co1	32.3	47.3	20.4	0.0	100.0
30V 35K 35L	CEM 12v co1	30.8	36.5	32.7	0.0	100.0
20V 70K 10L	CEM 4v co1	20.7	68.9	10.4	0.0	100.0
20V 60K 20L	CEM 5v co1	20.9	59.7	19.4	0.0	100.0
20V 50K 30L	CEM 6v co1	20.8	50.9	28.2	0.0	99.9
20V 40K 40L	CEM 7v co1	21.8	43.7	34.5	0.0	100.0
10V 75K 15L	CEM 8v co1	10.7	74.5	14.7	0.0	99.9
10V 65K 25L	CEM 9v co1	10.7	66.1	23.2	0.0	100.0
10V 55K 35L	CEM 10v co1	11.1	59.2	29.7	0.0	100.0
10V 45K 45L	CEM 11v co1	10.7	47.7	41.6	0.0	100.0

Tableau 2-23 – Détermination de la teneur en constituants des ciments à base de la cendre de co-combustion CVco1

Comme observé pour les ciments à base de la cendre CV1 (point 2.6.2), les ciments plus riches en filler calcaire ont des teneurs en filler et clinker qui s'éloignent un peu plus des teneurs visées.

2.7.3 Analyse minéralogique

La Figure 2-20 permet une identification plus aisée des phases sur l'exemple du CEM 1v co1 et la Figure 2-23 compare les douze ciments de laboratoire entre eux.

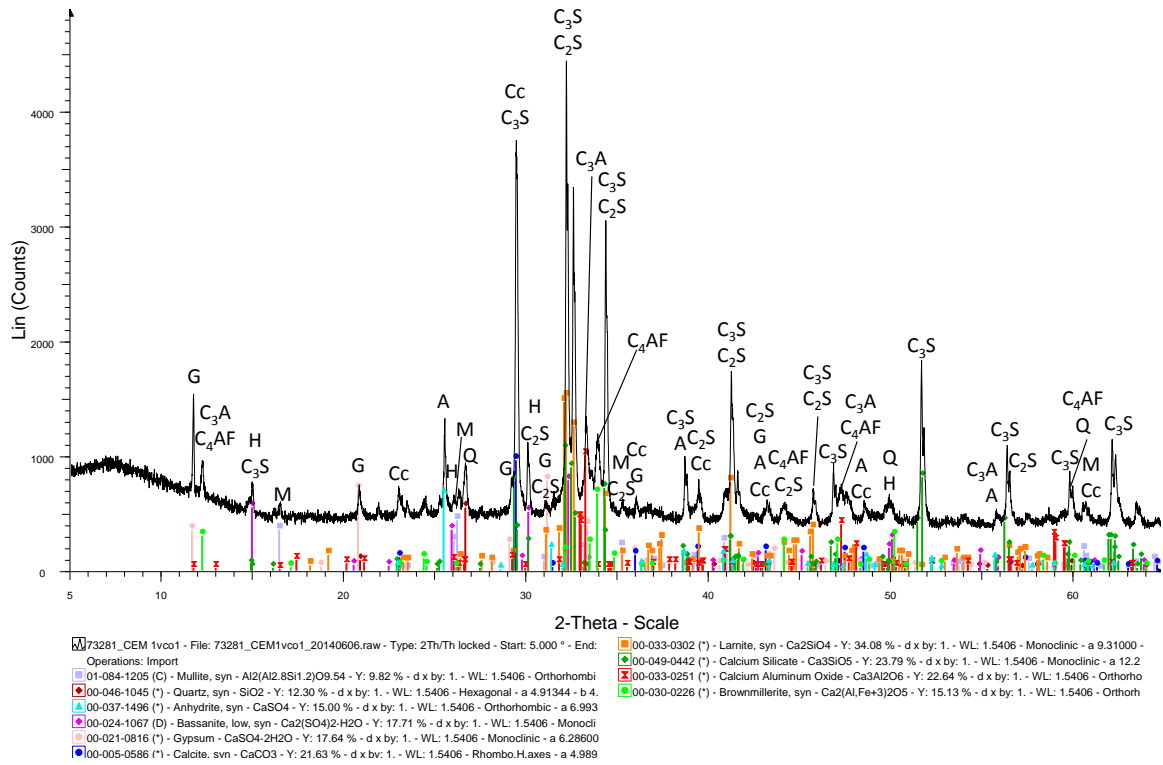


Figure 2-22 – Diffractogramme du CEM 1 co1 avec identification des raies
 Avec : G : gypse ; H : hemi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; M : mullite ; Q : quartz

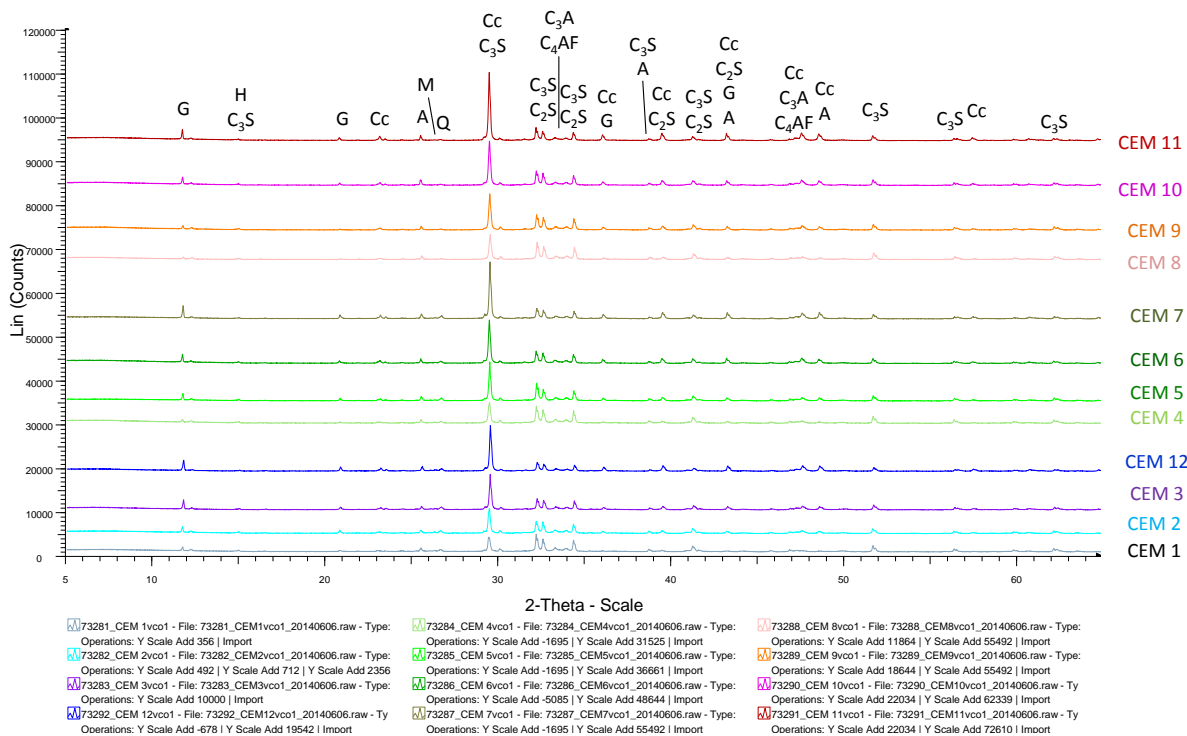


Figure 2-23 – Comparaison des diffractogrammes des douze ciments de laboratoire à base de la cendre de co-combustion CVco1
 Avec : G : gypse ; H : hemi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; M : mullite ; Q : quartz

La Figure 2-23 met en évidence que la raie majeure de la calcite est moins intense dans les cas des ciments aux compositions plus pauvres en filler calcaire et inversement. D'autre part, cette figure met en évidence qu'il n'y a pas eu de pollution lors des mélanges car les douze ciments contiennent exactement les mêmes phases ; la seule différence est la proportion de celles-ci qui varie en fonction de la teneur en constituants qui diffère selon les mélanges.

2.8 Ciments à base de la cendre volante de combustion classique CV2

2.8.1 Détermination de la finesse

Le Tableau 2-24 reprend les mesures de finesse des douze ciments constitués en laboratoire avec la cendre CV2.

	Type de ciment	Masse volumique (g/cm ³)	Blaine ACMEL (cm ² /kg)	Granulométrie Laser	
				Résultats CRIC	
				<8µm (%)	<32µm (%)
30V 65K 5L	CEM 1 v2	2.79	4110	39.31	83.90
30V 55K 15L	CEM 2 v2	2.77	4110	40.04	82.58
30V 45K 25L	CEM 3 v2	2.74	4120	39.50	80.45
20V 70K 10L	CEM 4 v2	2.88	4270	41.26	86.20
20V 60K 20L	CEM 5 v2	2.83	4240	39.91	85.89
20V 50K 30L	CEM 6 v2	2.80	4230	41.41	84.31
20V 40K 40L	CEM 7 v2	2.74	4160	40.89	81.85
10V 75K 15L	CEM 8 v2	2.97	4470	43.04	88.16
10V 65K 25L	CEM 9 v2	2.91	4380	43.43	86.64
10V 55K 35L	CEM 10 v2	2.83	4440	42.15	86.08
10V 45K 45L	CEM 11 v2	2.80	4280	43.35	83.27
30V 35K 35L	CEM 12 v2	2.65	3960	39.22	79.88

Tableau 2-24 - Caractérisation de la finesse des ciments de laboratoire à base de la cendre CV2

La comparaison des Tableau 2-18 et Tableau 2-24 montre que les ciments à base de la cendre CV2 sont un peu plus fins que les ciments constitués de la cendre CV1. Comme vu au Tableau 2-4, la CV1 est en effet moins fine.

La finesse des douze ciments reste proche des critères de granulométrie laser visés dans CEMCALC I (voir point 2.1.1). Le passant à 8 µm minimum est celui du CEM 12 v2 avec 39,22% et le maximum est celui du CEM 9 v2 avec 43,43%. Le passant à 32 µm minimum est celui du CEM 12 v2 avec 79,88% et le maximum est celui du CEM 8 v2 avec 88,16%.

Pour les CEM v2, la finesse Blaine des douze ciments tourne autour de 4200 cm²/kg dont la moins grande est celle du CEM 12 v2 avec 3960 cm²/kg et la plus grande, celle du CEM 8 v2 avec 4470 cm²/kg.

La différence de finesse n'est pas assez grande pour avoir un effet marqué sur l'évaluation des performances des ciments. On peut dès lors considérer que le critère de la finesse ne sera pas prépondérant dans les différences de comportement des ciments à base de la cendre de combustion CV2.

2.8.2 Analyse chimique

Le Tableau 2-25 reprend l'analyse chimique des douze ciments de laboratoire constitués de la cendre de combustion classique CV2.

	30V 65K 5L	30V 55K 15L	30V 45K 25L	20V 70K 10L	20V 60K 20L	20V 50K 30L	20V 40K 40L	10V 75K 15L	10V 65K 25L	10V 55K 35L	10V 45K 45L	30V 30K 35L
	CEM 1 v2	CEM 2 v2	CEM 3 v2	CEM 4 v2	CEM 5 v2	CEM 6 v2	CEM 7 v2	CEM 8 v2	CEM 9 v2	CEM 10 v2	CEM 11 v2	CEM 12 v2
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	3.40	7.63	11.87	5.45	9.60	14.12	17.55	7.71	11.74	15.92	20.31	16.31
P.F. à l'air 950°C (%)	3.98	8.21	12.21	5.73	9.57	13.66	18.34	7.58	11.60	15.42	19.51	16.01
SiO ₂ (%)	27.54	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Al ₂ O ₃ (%)	10.85	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Fe ₂ O ₃ (%)	5.14	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
CaO (%)	44.78	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SrO (%)	0.11	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Na ₂ O (%)	0.62	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
K ₂ O (%)	1.42	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
MgO (%)	1.27	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
Mn ₂ O ₃ (%)	0.08	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
TiO ₂ (%)	0.51	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
P ₂ O ₅ (%)	0.48	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
S ⁻ (%)	0.01	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
SO ₃ (%)	2.61	2.65	2.88	2.55	2.91	2.77	2.66	2.91	2.88	3.03	2.73	2.78
Cl ⁻ (%)	0.021	0.019	0.015	0.022	0.019	0.016	0.013	0.024	0.021	0.018	0.014	0.012
TOTAL (%)	99.42	10.88	15.11	8.30	12.50	16.45	21.01	10.51	14.50	18.47	22.25	18.80
Na ₂ O équ (%)	1.55	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
RI (%)	31.45	/	/	/	/	/	/	/	/	14.30	/	/
CaO libre (%)	0.50	0.43	0.32	0.57	0.47	0.40	0.29	0.67	0.53	0.45	0.29	0.24
CO ₂ (%)	2.62	6.65	11.08	4.74	8.85	13.34	16.75	7.05	11.02	15.18	19.50	15.34
H ₂ O (%)	0.78	0.98	0.79	0.71	0.75	0.78	0.79	0.66	0.72	0.74	0.80	0.97

Tableau 2-25 - Composition chimique des matériaux constitutifs des ciments de laboratoire à base de la cendre CV2

Avec : P.F. : Perte au Feu ; Na₂O équ : Na₂O équivalent = %Na₂O + 0,658 %K₂O ; RI : Résidu Insoluble ; / : analyse non effectuée

Le Tableau 2-25 montre que les teneurs en sulfates (SO₃) sont globalement proches des 3,00% visés pour le calcul des compositions des ciments. Dans le cas de certains ciments à base de CV2, notamment le CEM 4 v2 avec 2,55wt%, on constate cependant qu'elle s'éloigne un peu suite à un problème d'homogénéité. Cela n'a pas d'impact important sur les mesures de performances étant donné que pour les effectuer, les quantités utilisées sont nettement plus importantes que celle nécessaire pour la détermination de la teneur en sulfates.

La teneur en chlorures des ciments est bien inférieure au seuil maximal de 0,10% imposé par la norme NBN B12-110 [xvi].

Comme déjà constaté avec les CEM v1 et CEMv co1, les pertes au feu et teneurs en CO₂ augmentent avec la quantité de filler dans le ciment du fait de la présence de calcaire (CaCO₃).

Le Tableau 2-26 montre que les teneurs en constituants visées des CEM v2 sont globalement bien respectées.

		Proportion Cendre (%)	Proportion Clinker (%)	Proportion Filler calcaire (%)	Proportion Laitier (%)	Total (%)
30V 65K 5L	CEM 1 v2	29.9	64.6	5.5	0.0	100.0
30V 55K 15L	CEM 2 v2	30.8	55.3	13.9	0.0	100.0
30V 45K 25L	CEM 3 v2	30.5	46.3	23.2	0.0	100.0
30V 35K 35L	CEM 12 v2	29.4	38.5	32.1	0.0	100.0
20V 70K 10L	CEM 4 v2	20.3	69.8	9.9	0.0	100.0
20V 60K 20L	CEM 5 v2	21.2	60.2	18.6	0.0	100.0
20V 50K 30L	CEM 6 v2	21.7	50.4	27.9	0.0	100.0
20V 40K 40L	CEM 7 v2	20.6	44.4	35.0	0.0	100.0
10V 75K 15L	CEM 8 v2	10.8	74.4	14.8	0.0	100.0
10V 65K 25L	CEM 9 v2	10.6	66.3	23.1	0.0	100.0
10V 55K 35L	CEM 10 v2	10.7	57.3	31.9	0.0	99.9
10V 45K 45L	CEM 11 v2	10.5	48.8	40.8	0.0	100.1

Tableau 2-26 – Détermination de la teneur en constituants des ciments à base de la cendre CV2

Comme observé pour les ciments à base des cendres CV1 et CVco1 (points 2.6.2 et 2.7.2), les ciments plus riches en filler calcaire ont des teneurs en filler et clinker qui s'éloignent un peu plus des teneurs visées.

2.8.3 Analyse minéralogique

La Figure 2-24 permet une identification plus aisée des phases sur l'exemple du CEM 1 v2 et la Figure 2-25 compare les douze ciments de laboratoire entre eux.

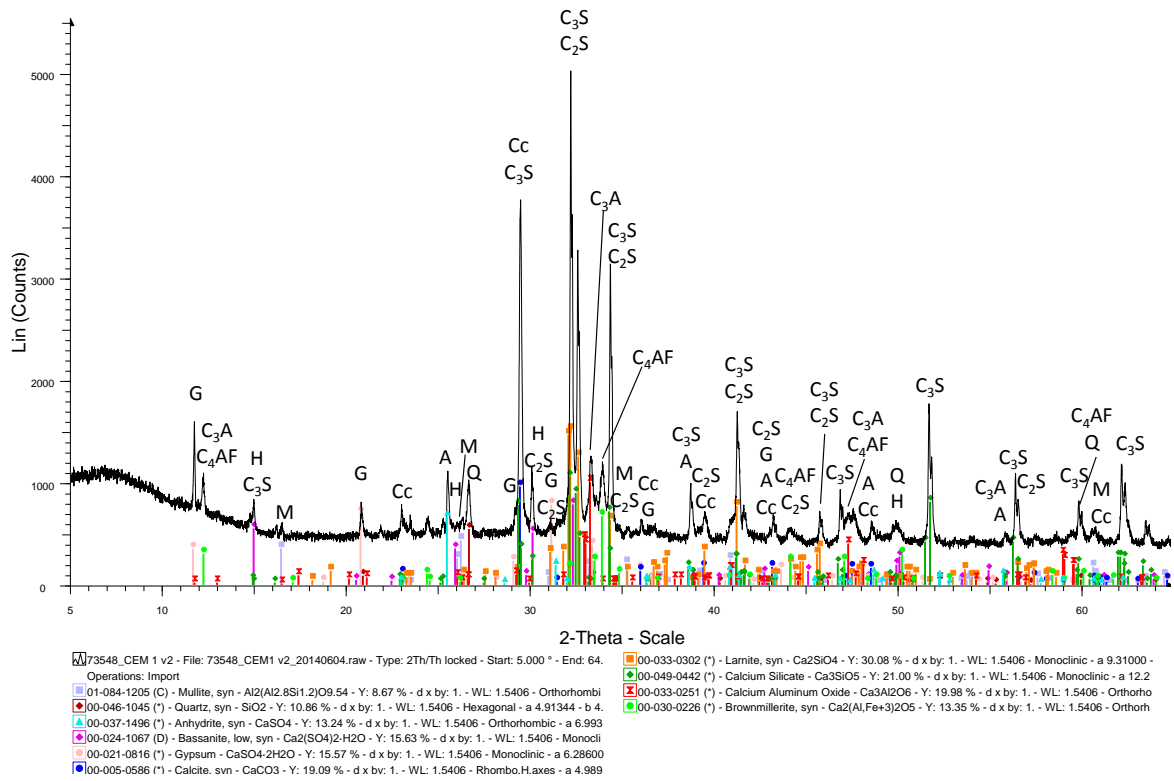


Figure 2-24 – Diffractogramme du CEM 1 v2 avec identification des raies
 Avec : G : gypse ; H : hemi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; M : mullite ; Q : quartz

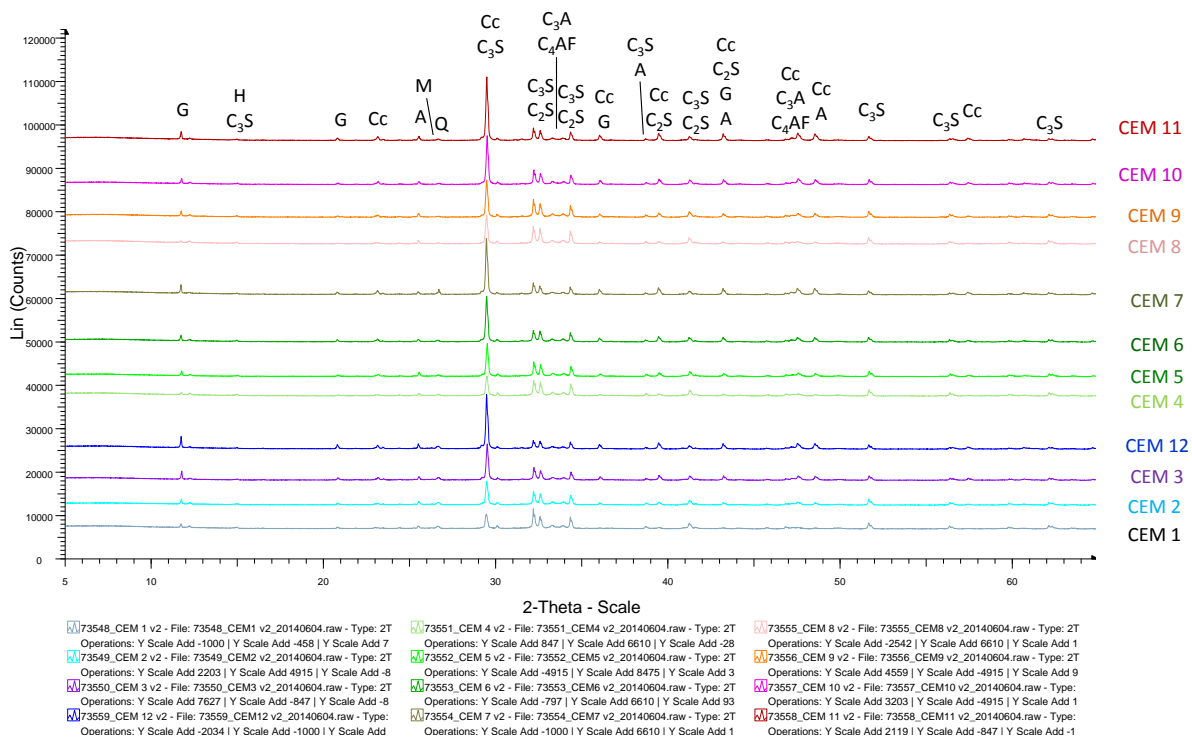


Figure 2-25 – Comparaison des diffractogrammes des douze ciments de laboratoire à base de la cendre CV2
 Avec : G : gypse ; H : hemi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; M : mullite ; Q : quartz

Les mêmes observations que pour les ciments à base de la cendre CV1 sont faites pour les ciments à base de la CV2 (voir point 2.6.3).

2.9 Etude de l'influence de la composition du filler calcaire

L'influence de la composition du filler est étudiée en comparant le filler principalement utilisé dans cette recherche, à savoir un filler appelé « pur » car constitué exclusivement de calcite avec un filler dit « impur » en raison des « impuretés » qu'il contient tels les argiles, quartz, etc. (voir point 2.4).

L'étude du comportement de ce filler impur est faite sur cinq compositions sélectionnées de ciment, à savoir les CEM 1, CEM 3, CEM 6, CEM 10 et CEM 12 et avec la cendre de combustion classique CV2. Il s'agit des compositions avec les mêmes proportions de constituants que celles sélectionnées dans le cadre du projet CEMCALC I où le laitier remplaçait la cendre volante.

2.9.1 Détermination de la finesse

Le Tableau 2-27 reprend la finesse des 5 ciments fabriqués avec le filler impur et la cendre de combustion classique CV2.

	Type de ciment	Masse volumique (g/cm ³)	Blaine ACME (cm ² /kg)	Granulométrie Laser	
				Résultats CRIC	
				<8µm (%)	<32µm (%)
30V 65K 5L	CEM 1 v2-FI	2.82	4240	30.73	80.11
30V 45K 25L	CEM 3 v2-FI	2.60	4050	38.20	81.72
20V 50K 30L	CEM 6 v2-FI	2.79	4580	39.21	83.78
10V 55K 35L	CEM 10 v2-FI	2.85	4770	40.01	86.30
30V 35K 35L	CEM 12 v2-FI	2.67	4420	37.48	80.93

Tableau 2-27 - Caractérisation de la finesse des 5 ciments de laboratoire à base de la cendre CV2 et du filler impur

La finesse des cinq ciments reste proche des critères de granulométrie laser visés dans CEMCALC I (voir point 2.1.1). Le passant à 8 µm minimum est celui du CEM 1 v2-FI avec 30,73% et le maximum est celui du CEM 10 v2-FI avec 40,01%. Le passant à 32 µm minimum est celui du CEM 1 v2-FI avec 80,11% et le maximum est celui du CEM 10 v2-FI avec 86,30%.

La finesse Blaine de ces ciments tourne autour de 4410 cm²/kg avec un minimum de 4050 cm²/kg pour le CEM 3 v2-FI et un maximum de 4580 cm²/kg pour le CEM 6 v2-FI.

Les finesses des CEM v2-FI sont suffisamment proches de celles des CEM v2-FP (Tableau 2-24) pour pouvoir comparer ces deux familles de ciments.

2.9.2 Analyse chimique

Le Tableau 2-28 reprend les données chimiques des ciments à base de filler impur.

	30V 65K 5L	30V 45K 25L	20V 50K 30L	10V 55K 35L	30V 30K 35L
	CEM 1 v2- FI	CEM 3 v2- FI	CEM 6 v2- FI	CEM 10 v2-FI	CEM 12 v2-FI
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	2.91	10.16	11.90	13.55	13.80
P.F. à l'air 950°C (%)	3.45	10.11	11.42	12.76	13.29
SiO₂ (%)	27.60	/	/	/	/
Al₂O₃ (%)	10.66	/	/	/	/
Fe₂O₃ (%)	5.14	/	/	/	/
CaO (%)	44.78	/	/	/	/
SrO (%)	0.12	/	/	/	/
Na₂O (%)	0.62	/	/	/	/
K₂O (%)	1.42	/	/	/	/
MgO (%)	1.27	/	/	/	/
Mn₂O₃ (%)	0.08	/	/	/	/
TiO₂ (%)	0.51	/	/	/	/
P₂O₅ (%)	0.48	/	/	/	/
S²⁻ (%)	0.01	/	/	/	/
SO₃ (%)	3.00	3.00	2.97	2.95	2.99
Cl⁻ (%)	0.021	0.015	0.017	0.020	0.013
TOTAL (%)	99.16	13.13	14.41	15.73	16.29
Na₂O équ (%)	1.55	/	/	/	/
RI (%)	23.72	/	/	13.71	/
CaO libre (%)	0.60	0.40	0.41	0.45	0.30
CO₂ (%)	2.15	9.23	11.00	12.68	12.77
H₂O (%)	0.76	0.93	0.90	0.87	1.03

Tableau 2-28 - Composition chimique des ciments à base de filler impur

Avec : P.F. : Perte au Feu ; Na₂O équ : Na₂O équivalent = %Na₂O + 0,658 %K₂O ; RI : Résidu Insoluble ; / : analyse non effectuée

Comme le montre le Tableau 2-28, la teneur en sulfates des ciments fabriqués est bien de 3%. Au vu des problèmes d'homogénéité constatés lors de la fabrication de ciments à base de la cendre CV2 (point 2.8.2), une amélioration a été apportée au mode de mélange afin d'optimiser l'homogénéité du produit final. Les différents constituants ont été dispersés d'une façon plus efficace dans le mélangeur et le gypse qui a tendance à s'agglomérer a été saupoudré à travers un tamis de 0,5 mm.

La perte au feu est toujours plus élevée pour les ciments plus riches en filler calcaire. En comparant les résultats du Tableau 2-28 avec ceux du Tableau 2-25, on constate que la perte au feu des ciments à base de filler impur est un peu plus faible que celle des ciments à base de filler pur. Cela s'explique par le fait qu'étant donné la présence d'« impuretés » dans le filler, il contient moins de calcite que le filler pur. En conséquence, le dégagement de CO₂ est moins important.

Le Tableau 2-29 donne les teneurs en constituants déterminées selon la norme EN 196-4 [xii].

		Proportion Cendre (%)	Proportion Clinker (%)	Proportion Filler calcaire (%)	Proportion Laitier (%)	Total (%)
	CEM II/B-V 32.5 R	22.3	77.7	0.0	0.0	100.0
	CEM II/B-M LL-S-V 32.5 N	9.1	70.4	13.3	7.2	100.0
	CEM I 52.5 R	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0
30V 65K 5L	CEM 1 v2-FI	30.8	64.7	4.5	0.0	100.0
30V 45K 25L	CEM 3 v2-FI	36.0	44.6	19.4	0.0	100.0
30V 35K 35L	CEM 12 v2-FI	37.4	34.4	26.8	1.4	100.0
20V 50K 30L	CEM 6 v2-FI	26.9	50.0	23.1	0.0	100.0
10V 55K 35L	CEM 10 v2-FI	17.9	55.4	26.6	0.0	99.9

Tableau 2-29 – Détermination de la teneur en constituants des ciments à base de filler impur et de la cendre CV2

On constate que dans le cas du CEM 12 v2-FI, la méthode détecte la présence de laitier alors qu'il n'y en n'a pas dans le mélange. Cela peut être dû à l'erreur analytique et/ou au fait qu'une petite quantité de cendre volante peut être dissoute et est alors considérée comme étant du laitier par la méthode.

Excepté pour le CEM 1 v2-FI, la quantité de cendre volante est un peu surestimée et la proportion de filler calcaire sous-estimée. Cela est dû au fait que le filler est impur et contient du quartz comme montré aux Tableau 2-28, Figure 2-26 et Figure 2-27. Ce quartz ne se dissout pas à l'attaque acide et est considéré comme provenant de la cendre volante. Dans le cas du CEM 1 v2-FI, cela est moins marqué du fait qu'il contient peu de filler (5%).

Le Tableau 2-30 donne les résultats après une correction tenant compte du fait que le filler calcaire n'est pas 100% du CaCO_3 . La proportion réelle de CaCO_3 contenue dedans est évaluée sur base de sa teneur en CO_2 . Elle est de 80% et il y a donc 20% d'impuretés. On prend l'hypothèse que ces impuretés sont insolubles à l'attaque HNO_3 (quartz) et donc considérées comme provenant de la cendre volante. La teneur en cendre doit donc également être corrigée en soustrayant ces impuretés.

		Proportion Cendre (%)	Proportion Clinker (%)	Proportion Filler calcaire (%)	Proportion Laitier (%)	Total (%)
	CEM I/B-V 32.5 R	22.3	77.7	0.0	0.0	100.0
	CEM I/B-M LL-S-V 32.5 N	9.1	70.4	13.3	7.2	100.0
	CEM I 52.5 R	0.0	100.0	0.0	0.0	100.0
30V 65K 5L	CEM 1 v2-FI	29.7	64.7	5.6	0.0	100.0
30V 45K 25L	CEM 3 v2-FI	31.2	44.6	24.3	0.0	100.0
30V 35K 35L	CEM 12 v2-FI	30.7	34.4	33.5	1.4	100.0
20V 50K 30L	CEM 6 v2-FI	21.1	50.0	28.9	0.0	100.0
10V 55K 35L	CEM 10 v2-FI	11.3	55.4	33.3	0.0	99.9

Tableau 2-30 – Teneur en constituants des ciments à base de filler impur et de la cendre CV2 après correction tenant compte du fait que le filler calcaire n’est pas pur

Le Tableau 2-30 montre que, après correction de la teneur en filler calcaire et en cendre volante, les teneurs en constituants des ciments fabriqués avec le filler impur sont bien celles visées.

2.9.3 Analyse minéralogique

La Figure 2-26 permet une identification plus aisée des phases sur l’exemple du CEM 1 v2-FI et la Figure 2-27 compare les cinq ciments à base de du filler impur entre eux.

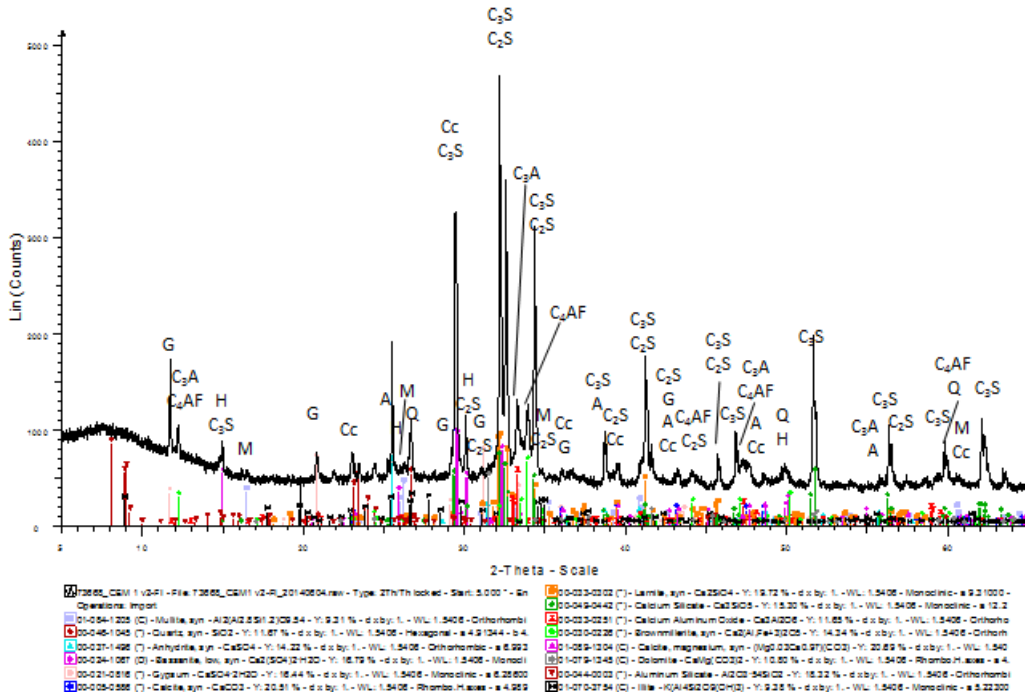


Figure 2-26 – Diffractogramme du CEM 1 v2-FI avec identification des raies
Avec : G : gypse ; H : hemi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; M : mullite ; Q : quartz

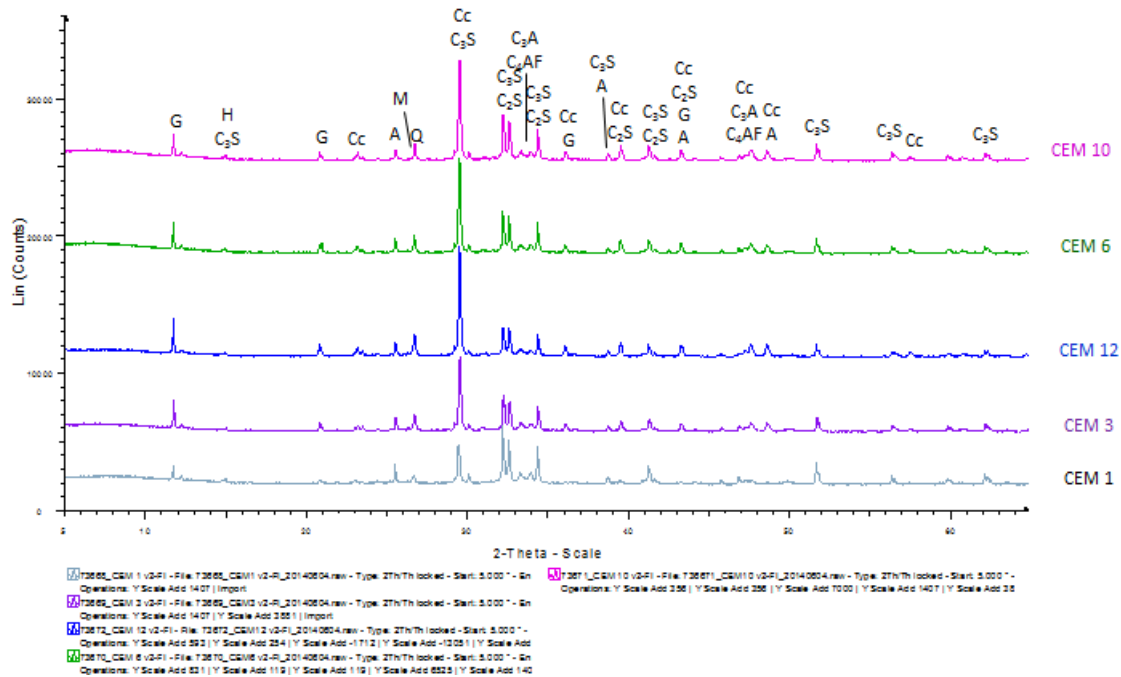
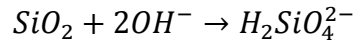


Figure 2-27 – Comparaison des diffractogrammes des cinq ciments à base de filler impur
 Avec : G : gypse ; H : hemi-hydrate ; A : anhydrite ; Cc : calcite ; Qtz : quartz ; I : illite

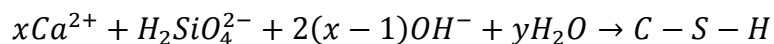
Les phases minéralogiques des ciments à base de filler impur sont proches de celles des ciments de départ à la différence près que ces ciments contiennent également de la dolomite et de l’illite apportées par le filler impur (Figure 2-13). Celles-ci ne sont pas reprises sur les diffractogrammes des ciments car leur proportion est trop faible que pour être nettement observables dans ceux-ci (Figure 2-26 et Figure 2-27).

3 Tâche 3 : Evaluation des performances des nouveaux ciments ternaires

Les cendres volantes silico-alumineuses étant riches en silice et pauvres en oxyde de calcium, elles sont très peu solubles dans l'eau. La production de portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) générée par l'hydratation du clinker dans un ciment augmente le pH jusque 13,2 ce qui permet d'attaquer la silice amorphe des cendres :



La présence d'ions calcium dans la solution permet aux silicates de calcium hydratés (C-S-H), moins solubles, de précipiter selon la même réaction que dans les cas de silicates de calcium :



En présence de silice solide, le rapport C/S des C-S-H est plus faible que celui obtenu par la dissolution des silicates calciques. La réaction pouzzolanique est le nom donné à l'équation bilan de ces réactions de dissolution et précipitation. [xvii]

L'hydratation des cendres volantes mène à la formation des minéraux secondaires suivants [xviii] :

- Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) ;
- Calcite (CaCO_3) ;
- Gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) ;
- Ettringite ($3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3 \cdot 3\text{CaSO}_4 \cdot 32\text{H}_2\text{O}$) ;
- Brucite ($\text{Mg}(\text{OH})_2$).

Suite à leur sphéricité et à leur petite taille, les cendres volantes influent sur la rhéologie des pâtes de ciment. Elles diminuent le besoin en eau pour une maniabilité égale et peuvent donc jouer un rôle de plastifiant. (L'utilisation des cendres volantes dans le béton, 2014, <http://doc.lerm.fr/lutilisation-cendres-volantes-beton/>)

D'autre part, les cendres retardent le début prise des ciments car elles ralentissent l'hydratation du ciment. Cela peut être un avantage par temps chaud et pour les ouvrages de masse car elles permettent d'éviter la fissuration par retrait thermique. [xix]

Du fait de leur réaction tardive, les cendres volantes augmentent les résistances mécaniques à long terme des mortiers et bétons.

La formation de C-S-H ultérieure mène également à une structure plus compacte qui permet d'en améliorer la durabilité.

Le filler calcaire quant à lui est un matériau inerte. Il a donc principalement un rôle de remplissage de la structure. Il présente cependant la faculté de favoriser la formation de carbo-aluminates et de germes de cristallisation, ce qui accélère l'hydratation de l'aluminate tricalcique (C_3A) et du silicate tricalcique (C_3S), et par l'augmentation du nombre de sites de nucléation engendrant une accélération de l'hydratation du ciment par germination activée des silicates de calcium (C-S-H).

3.1 Méthodologie

3.1.1 Caractérisation physico-mécanique

La détermination de la **consistance**, des **temps de prise** et de la **stabilité « Le Châtelier »** sont réalisées sur pâtes de ciment selon la *norme EN 196-3* [xx].

La détermination de la consistance du ciment consiste à déterminer la quantité d'eau, exprimée en pourcentage, nécessaire pour atteindre la consistance désirée qui correspond à une profondeur de pénétration de 6 ± 2 mm.

La mesure de début et fin de prise est effectuée à l'aide de l'aiguille de Vicat. Les valeurs minimales de début de prise exigées en fonction des classes de résistance des ciments sont présentées au Tableau 3-1.

Classe de résistance	Temps de début prise (min)
32.5 N	≥ 75
32.5 R	≥ 75
42.5 N	≥ 60
42.5 R	≥ 60
52.5 N	≥ 45
52.5 R	≥ 45

Tableau 3-1 - Seuils minimaux des temps de début de prise en fonction des classes de résistance des ciments selon la norme EN 196-3 [xx]

La stabilité « Le Châtelier » est une mesure d'expansion du ciment dont le but est d'évaluer le risque possible d'expansion tardive due à l'hydratation des oxydes de calcium et/ou magnésium libres. Sa valeur doit être inférieure à 10 mm sur pâte pure pour tout type de ciment.

Les **résistances** à la compression et à la flexion sont réalisées sur des prismes de mortier de dimension $4*4*16$ cm³ à 20°C selon la *norme EN 196-1* [xxi]. Les seuils sont présentés dans le Tableau 3-2.

Classe de résistance	Rc (MPa)			
	2 j	7 j	28 j	
32.5 N	-	≥ 16.0	≥ 32.5	≤ 52.5
32.5 R	≥ 10.0	-	≥ 32.5	≤ 52.5
42.5 N	≥ 10.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5
42.5 R	≥ 20.0	-	≥ 42.5	≤ 62.5
52.5 N	≥ 20.0	-	≥ 52.5	-
52.5 R	≥ 30.0	-	≥ 52.5	-

Tableau 3-2 - Seuils des résistances à la compression en fonction des classes de résistance des ciments selon la norme EN 196-1 [xxi]

3.1.1 Détermination des résistances mécaniques (flexion et compression)

Les résistances mécaniques (flexion et compression) ont été réalisées selon la norme NBN 196-1 [xxi].

Trois éprouvettes de mortier, issus d'un même mélange, ont été réalisées selon le protocole décrit précédemment. Il en résulte donc 3 mesures de flexion et 6 mesures de compression, pour chaque temps de maturation (2, 7, 28 et 91 jours).

3.2 Ciments industriels de référence

3.2.1 Calorimétrie Langavant

La Figure 3-1 reprend les courbes de dégagement de chaleur des trois ciments industriels et le Tableau 3-3 fournit les valeurs numériques des flux dégagés à différentes échéances.

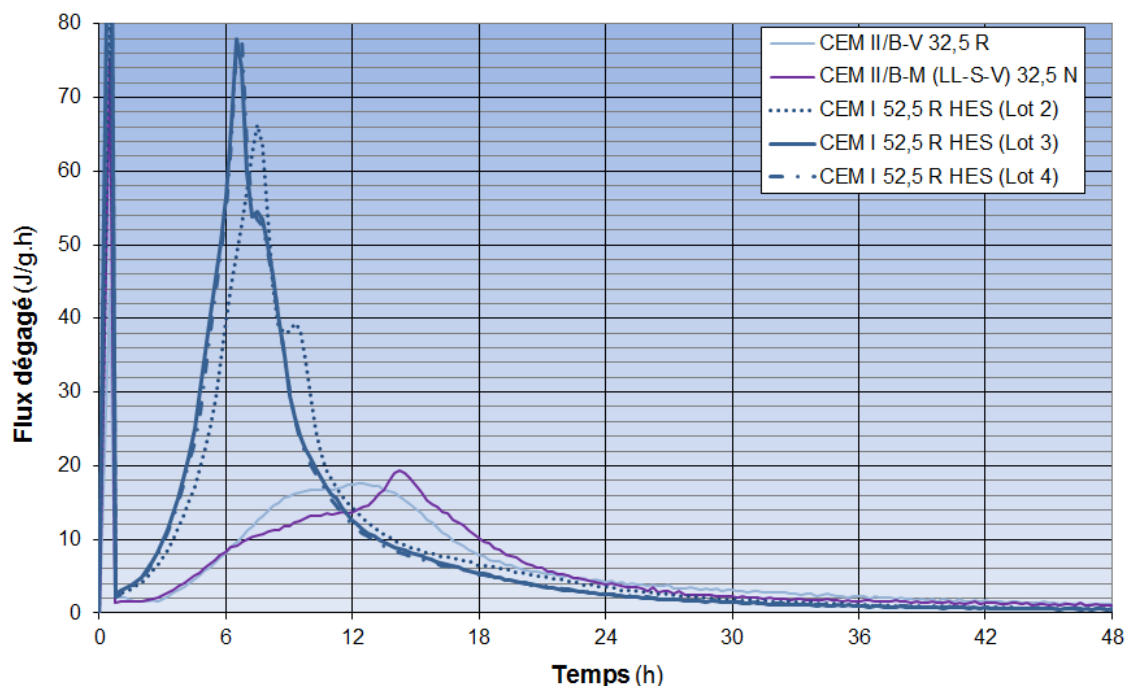


Figure 3-1 – Comparaison des flux de chaleur dégagee lors de l’hydratation des ciments de laboratoire (Calorimétrie Langavant)

Ciment	12 h	24 h	36h	41 h	48 h	72 h
	Chaleur dégagee (J/g)					
CEM II/B-V 32.5 R	119	233	270	280	290	307
CEM II/B-M LL-S-V 32.5 N	111	238	267	275	283	302
CEM I 52.5 R HES 2ème lot	318	402	426	431	436	445
CEM I 52.5 R HES 3ème lot	350	421	438	443	447	455
CEM I 52.5 R HES 4ème lot	340	409	428	432	437	446

Tableau 3-3 - Comparaison des quantités de chaleur dégagees à différentes échéances lors de l’hydratation des cinq ciments de laboratoire sélectionnés (Calorimétrie Langavant)

La Figure 3-1 et le Tableau 3-3 mettent en évidence une hydratation nettement plus rapide et un dégagement de chaleur beaucoup plus important pour le CEM I 52,5 R en comparaison aux deux CEM II/B. Cela est dû au fait que les CEM II/B contiennent, pour l’un (CEM II/B-V 32,5 R), cendre volante et, pour l’autre (CEM II/B-M 32,5 N), cendre, filler calcaire et laitier. Les cendres et laitiers réagissent tardivement par rapport au clinker et le filler est inerte.

Les deux CEM II/B dégagent, quant à eux, une quantité de chaleur similaire.

Dans le cas du CEM II/B-M 32,5 N, on distingue un deuxième pic de dégagement de chaleur correspondant à l’hydratation du laitier qu’il contient. En effet, le laitier, qui est un matériau hydraulique latent, nécessite la présence d’un activateur pour s’hydrater. Dans le cas des ciments, il s’agit de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) formée par l’hydratation du clinker. Pour rappel, les ciments constitués dans le cadre de CEMCALC II ne contiennent pas de laitier.

Les trois lots de CEM I 52,5 R utilisés dans le projet CEMCALC II ont des quantités de chaleur dégagée quasiment similaires (Tableau 3-3) et leurs profils de flux dégagé sont très proches (Figure 3-1).

3.2.2 Temps de prise,...

Le Tableau 3-4 reprend les caractéristiques mécaniques des trois ciments industriels déterminées sur pâte de ciment et la Figure 3-2 illustre leurs temps de prise.

	Consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Stabilité Le Châtelier (mm)
CEM I 52.5 R	33.0	235	255	0.0
CEM II/B-V 32.5 R	27.5	285	315	0.0
CEM II/B-M LL-S-V 32.5 N	26.5	325	360	1.0

Tableau 3-4 - Caractéristiques physico-mécaniques des ciments industriels de référence sur pâte de ciment

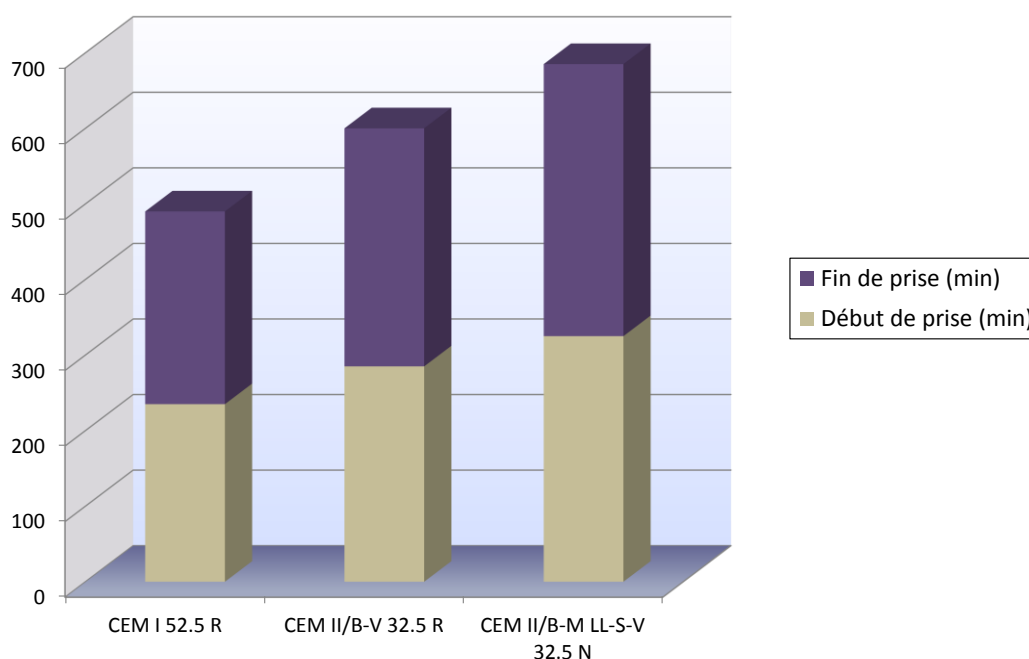


Figure 3-2 - Temps de prise des trois ciments industriels de référence

Le Tableau 3-4 et la Figure 3-2 mettent en évidence que le CEM II/B-M 32,5 N fait prise plus lentement que les deux autres ciments industriels. Ce qui est en accord avec son qualificatif « N » signifiant prise normale alors que le CEM I 52,5 R et le CEM II/B-V 32,5 R sont tous deux qualifiés de prise rapide « R ». Cela est dû au fait que le CEM II/B-M 32,5 N contient moins de clinker comme vu au point 2.2 (Tableau 2-2) et non à une différence de finesse (Tableau 2-1 au point 2.2.1).

Les débuts de prise sont bien supérieurs aux 45 et 75 minutes exigées, respectivement pour le CEM I 52,5 R et pour les deux CEM II 32,5, suivant la norme EN 196-3 (Tableau 3-1). Aucun des trois ciments ne présente d'expansion comme le montrent les mesures de stabilité « Le Châtelier ».

3.2.3 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques déterminées sur mortier des ciments industriels sont illustrées aux Figure 3-3 et Figure 3-4.

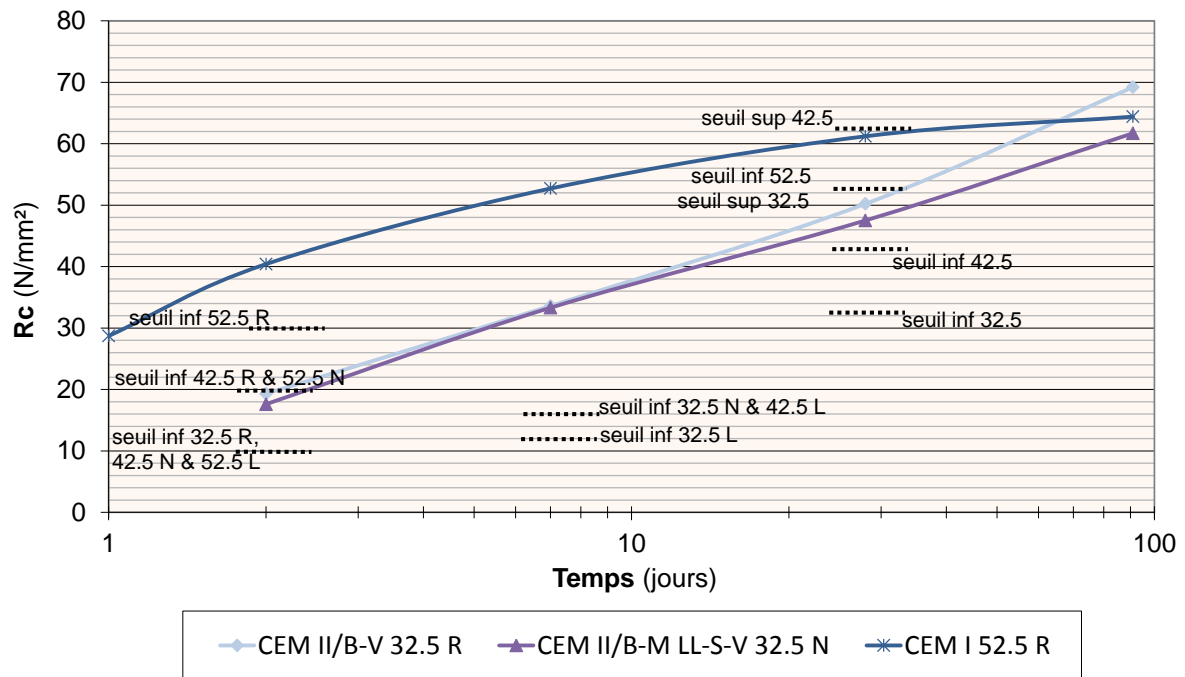


Figure 3-3 - Résistances à la compression des trois ciments industriels de référence

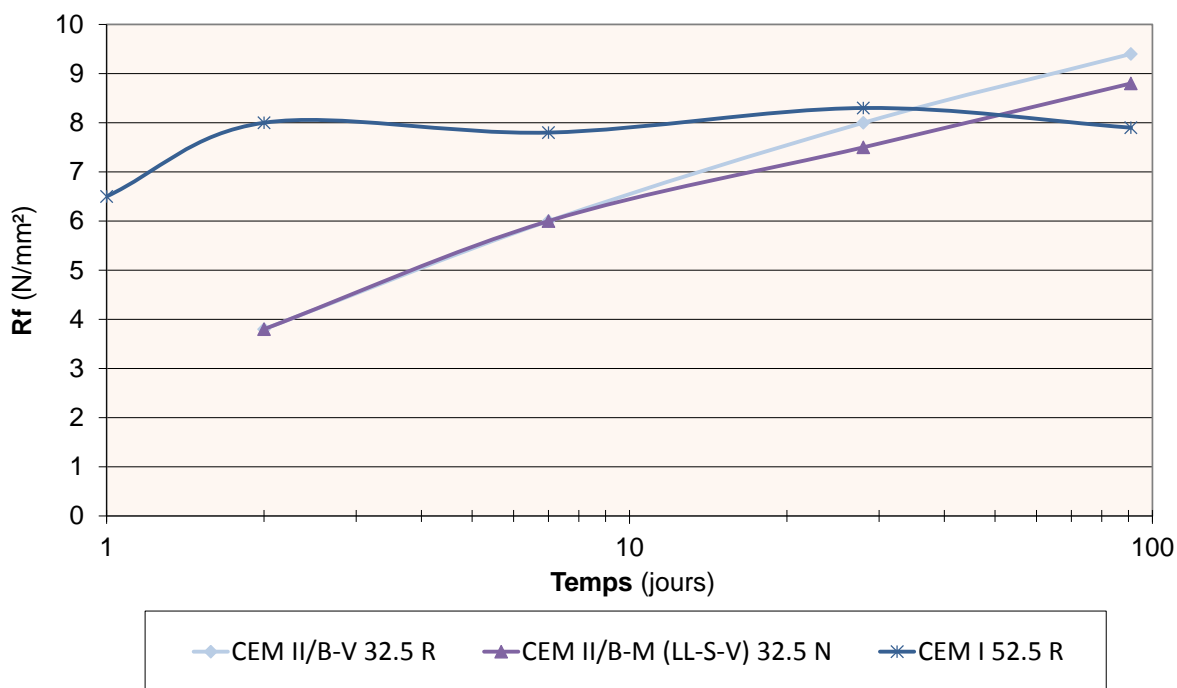


Figure 3-4 - Résistances à la flexion des trois ciments industriels de référence

Comme le montre la Figure 3-3, les trois ciments sont conformes à la définition de leur classe de résistance.

Les Figure 3-3 et Figure 3-4 montrent que le CEM I présente les meilleures résistances à jeune âge mais qu'à 91 jours le CEM II/B-V 32,5 R le rattrape. Cela est dû à l'action plus tardive de la cendre volante contenue dans ce ciment qui permet un développement des résistances à plus longue échéance. Les résistances du CEM II/B-V 32,5 R et du CEM II/B-M 32,5 N sont similaires jusqu'à 28 jours où le CEM II/B-V 32,5 R devient un peu plus résistant. Cela peut s'expliquer par le fait que le CEM II/B-M contient 13wt% de filler calcaire qui est un matériau inerte et que la proportion de 7wt% de laitier n'est pas suffisante pour compenser la différence de 13wt% en cendre volante entre les deux ciments (22wt% de cendre volante dans le CEM II/B-V contre 9wt% dans le CEM II/B-M) (Tableau 2-3 au point 2.2.2).

3.3 Ciments à base de la cendre volante de combustion classique CV1

3.3.1 Calorimétrie Langavant

La Figure 3-5 reprend les courbes de dégagement de chaleur des douze ciments de laboratoire et le Tableau 3-5 fournit les valeurs numériques des flux dégagés à différentes échéances.

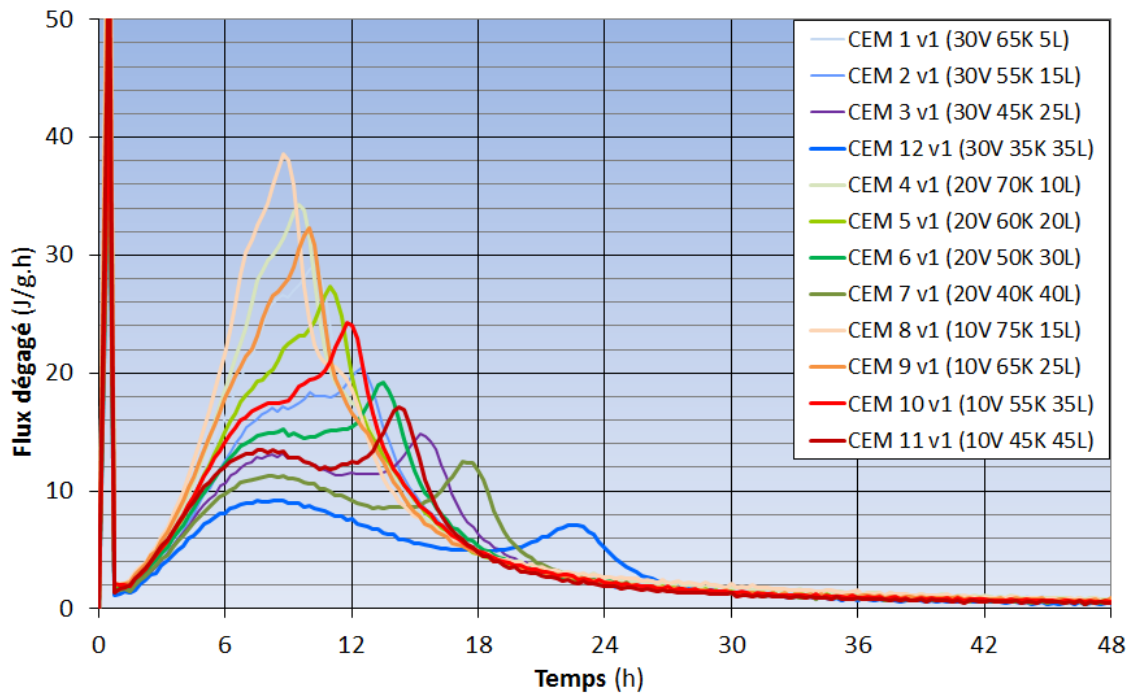


Figure 3-5 – Comparaison des flux de chaleur dégagée lors de l’hydratation des ciments de laboratoire à base de CV1 (Calorimétrie Langavant)

La Figure 3-5 met en évidence une hydratation plus rapide des ciments plus riches en clinker. Cela s’explique par l’hydratation différée de la cendre qui ne s’hydrate qu’à partir du moment où de la portlandite est produite par l’hydratation du clinker ; l’hydratation des ciments à base de cendre est donc plus longue que celle des CEM I.

D’autre part, le premier dégagement de chaleur dure plus longtemps (premier pic) dans le cas des ciments plus riches en filler calcaire et en cendre, et donc plus pauvres en clinker.

Il n’y a pas de nette tendance concernant l’influence de la cendre volante ou du filler calcaire. Pour une même teneur en clinker (CEM 1 – CEM 9, CEM 2 – CEM 10 et CEM 3 – CEM 11), on constate cependant qu’une quantité en cendre plus importante diminue un peu l’intensité des pics de dégagement de chaleur.

Plusieurs courbes présentent un épaulement entre le premier et dernier pic (CEM 4, CEM 9, CEM 1, CEM 5, CEM 10, CEM 2, CEM 6, CEM 11 et CEM 3).

		(J/g)				
		12 h	24 h	41 h	48 h	72 h
S30 K65 L5	CEM 1 - CEMCALC I	189	312	359	367	383
V30 K65 L5	CEM 1 v1	198	274	300	307	320
	Différence	9	-38	-59	-60	-63
S30 K55 L15	CEM 2 - CEMCALC I	149	267	311	320	337
V30 K55 L15	CEM 2 v1	147	231	251	255	265
	Différence	-2	-36	-60	-65	-72
S30 K45 L25	CEM 3 - CEMCALC I	112	230	273	282	301
V30 K45 L25	CEM 3 v1	116	206	228	231	241
	Différence	4	-24	-45	-51	-60
S20 K70 L10	CEM 4 - CEMCALC I	209	317	356	364	377
V20 K70 L10	CEM 4 v1	216	294	322	329	342
	Différence	7	-23	-34	-35	-35
S20 K60 L20	CEM 5 - CEMCALC I	177	278	315	323	338
V20 K60 L20	CEM 5 v1	183	260	282	288	299
	Différence	6	-18	-33	-35	-39
S20 K50 L30	CEM 6 - CEMCALC I	134	242	276	283	298
V20 K50 L30	CEM 6 v1	133	224	246	250	259
	Différence	-1	-18	-30	-33	-39
S20 K40 L40	CEM 7 - CEMCALC I	92	196	231	239	255
V20 K40 L40	CEM 7 v1	102	188	208	212	222
	Différence	10	-8	-23	-27	-33
S10 K75 L15	CEM 8 - CEMCALC I	230	321	353	359	369
V10 K75 L15	CEM 8 v1	236	310	340	346	358
	Différence	6	-11	-13	-13	-11
S10 K65 L25	CEM 9 - CEMCALC I	206	289	318	324	336
V10 K65 L25	CEM 9 v1	207	280	303	309	320
	Différence	1	-9	-15	-15	-16
S10 K55 L35	CEM 10 - CEMCALC I	164	249	276	281	293
V10 K55 L35	CEM 10 v1	162	245	267	272	282
	Différence	-2	-4	-9	-9	-11
S10 K45 L45	CEM 11 - CEMCALC I	112	208	232	237	248
V10 K45 L45	CEM 11 v1	126	211	229	233	242
	Différence	14	3	-3	-4	-6
S30 K35 L35	CEM 12 - CEMCALC I	74	163	213	223	243
V30 K35 L35	CEM 12 v1	87	157	181	185	192
	Différence	13	-6	-32	-38	-51

Tableau 3-5 - Comparaison des quantités de chaleur dégagées à différentes échéances lors de l'hydratation des douze ciments de laboratoire à base de CV1 par rapport aux ciments de CEMCALC I (Calorimétrie Langavant)

Le Tableau 3-5 montre le ciment dégageant le plus de chaleur est le plus pauvre en cendre et le plus riche en clinker (CEM 8). En général, les ciments contenant plus de filler calcaire dégagent moins de chaleur. C'est le ciment le plus riche en cendre et filler (CEM 12) qui dégage le moins de chaleur tout au long de la mesure.

La Figure 3-6 et le Tableau 3-6 présentent les résultats calorimétriques obtenus pour deux compositions réalisées avec cendre et sans filler et inversement afin de mieux cerner l'influence respective de ces constituants sur l'hydratation des ciments.

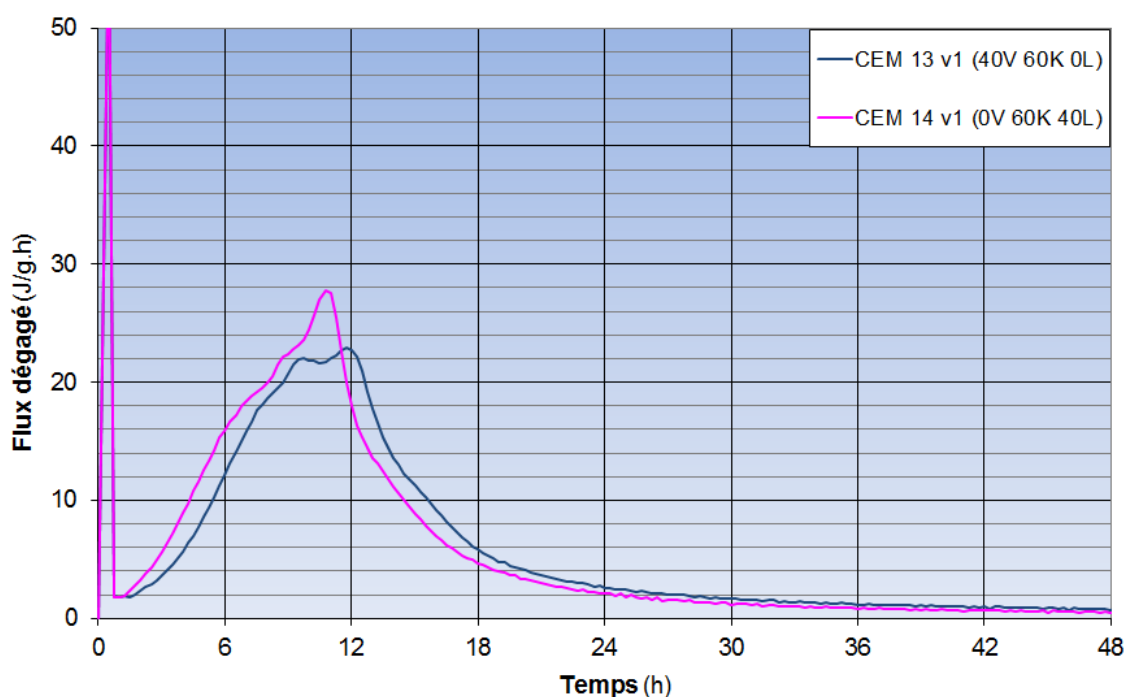


Figure 3-6 – Comparaison des flux de chaleur dégagée lors de l'hydratation d'un ciment contenant de la cendre CV1 et du clinker (CEM 13 v1) et d'un ciment contenant du filler calcaire et du clinker (CEM 14 v1) (Calorimétrie Langavant)

Les deux ciments présentent, comme pour les douze ciments de la Figure 3-5, trois bosses de dégagement de chaleur. Dans le cas du ciment sans cendre (CEM 14 v1), le troisième pic est plus intense et il dégage de la chaleur un peu plus rapidement que le ciment à base de cendre (CEM 13 v1).

		(J/g)					
		12 h	24 h	36h	41 h	48 h	72 h
V40 K60 L0	CEM 13 v1	162	256	277	282	289	302
V0 K60 L40	CEM 14 v1	187	261	277	281	285	294
	Différence	25	5	0	-1	-4	-8

Tableau 3-6 - Comparaison des quantités de chaleur dégagées à différentes échéances lors de l'hydratation des deux ciments CEM 13 v1 et CEM 14 v1 (Calorimétrie Langavant)

La différence de quantité de chaleur dégagée pour les deux ciments n'est pas significative. Cela indique que c'est principalement la quantité de clinker, et non de cendre ou de filler calcaire, dans le ciment qui est déterminante pour la quantité de chaleur dégagée.

3.3.2 Temps de prise,...

Le Tableau 3-7 reprend les caractéristiques physico-mécaniques obtenues sur pâte de ciment pour les douze ciments fabriqués en laboratoire à partir de la cendre de combustion CV1.

		Consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Stabilité Le Châtelier (mm)
30V 65K 5L	CEM 1 v1	29.2	170	240	0.0
30V 55K 15L	CEM 2 v1	28.5	175	210	0.0
30V 45K 25L	CEM 3 v1	28.0	180	225	0.0
30V 35K 35L	CEM 12 v1	27.5	180	240	0.0
20V 70K 10L	CEM 4 v1	29.0	165	225	0.0
20V 60K 20L	CEM 5 v1	28.5	170	225	0.0
20V 50K 30L	CEM 6 v1	28.0	170	210	0.5
20V 40K 40L	CEM 7 v1	27.0	165	225	0.0
10V 75K 15L	CEM 8 v1	29.5	165	225	0.0
10V 65K 25L	CEM 9 v1	28.5	165	210	0.0
10V 55K 35L	CEM 10 v1	27.5	160	195	0.0
10V 45K 45L	CEM 11 v1	27.0	150	195	0.0

Tableau 3-7 - Caractéristiques physico-mécaniques des douze ciments de laboratoire à base de CV1 sur pâte de ciment (rouge : valeur maximale ; bleu : valeur minimale)

Les consistances des douze ciments sont très proches les unes des autres avec un écart maximal de 2,5%. Une légère tendance de diminution de la consistance avec l'augmentation de la quantité filler pour une même teneur en cendre est observée. Les douze ciments ne présentent pas d'expansion significative ; en effet, les mesures de stabilité « Le Châtelier » sont bien en-deçà du maximum de 10 mm.

La Figure 3-7 illustre les résultats des temps de prise obtenus pour les douze ciments de laboratoire à base de la cendre CV1.

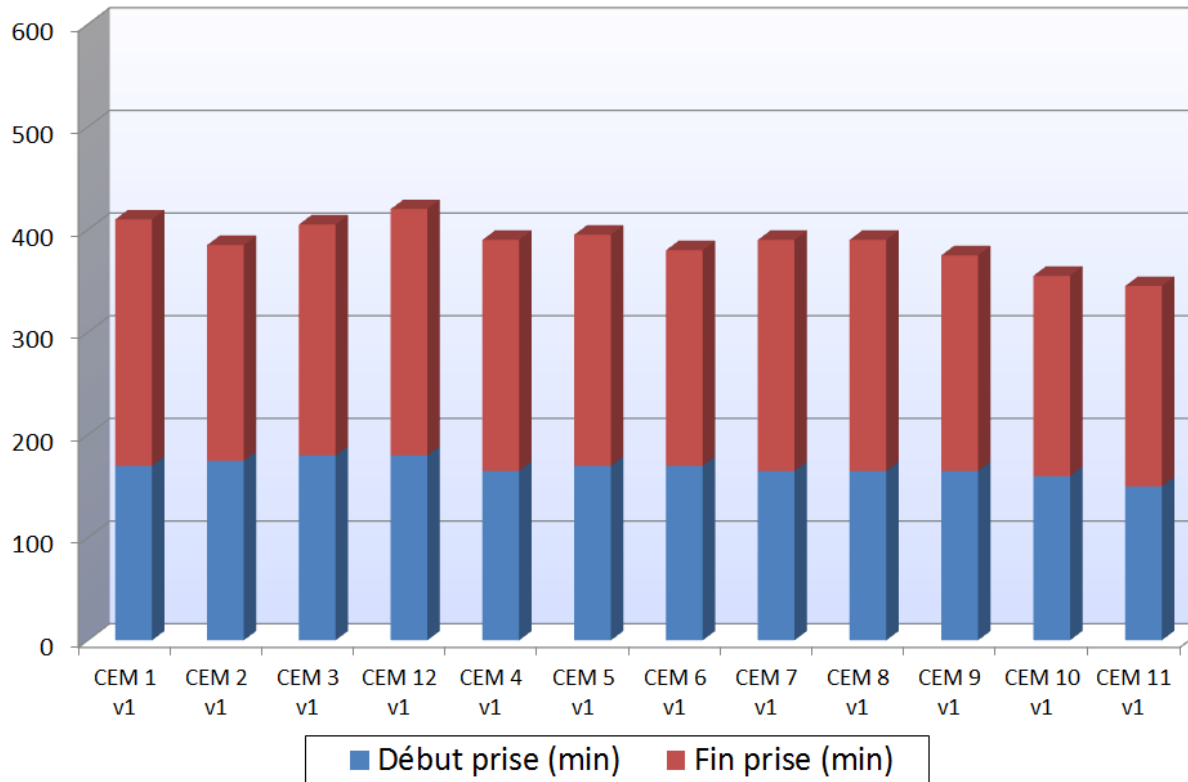


Figure 3-7 - Temps de prise des douze ciments de laboratoire à base de CV1

Globalement, les temps de prise diminuent avec la teneur en cendre. L'influence de la teneur en filler, quant à elle, n'est pas constante.

Le CEM 11 présente les temps de début et de fin de prise les plus courts ; il possède peu de cendre et beaucoup de filler. Ce ne sont donc pas nécessairement les ciments les plus riches en clinker qui font prise le plus rapidement. Le CEM 12, quant à lui, présente les temps de prise les plus longs ; il possède beaucoup de cendre et de filler.

3.3.3 Résistances mécaniques

Les Figure 3-8 et Figure 3-9 présentent les résistances mécaniques mesurées sur mortier.

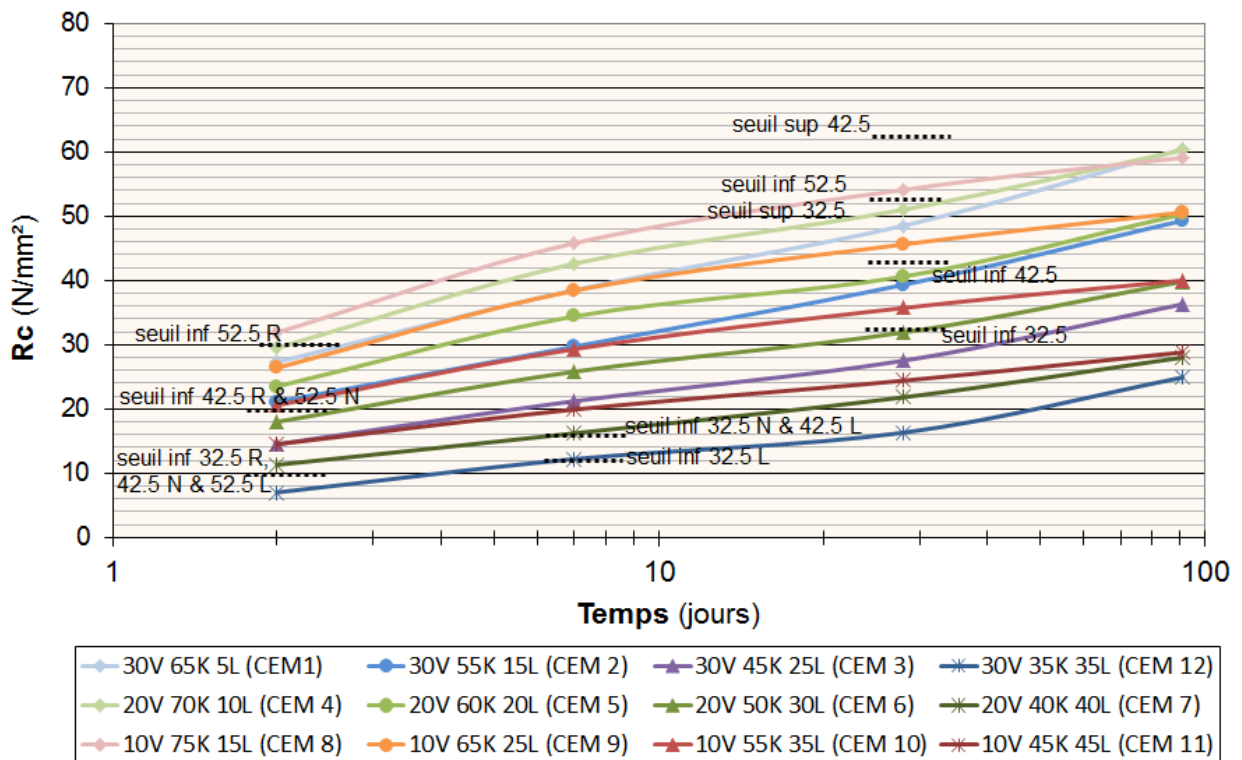


Figure 3-8 - Résistances à la compression des douze ciments de laboratoire à base de CV1

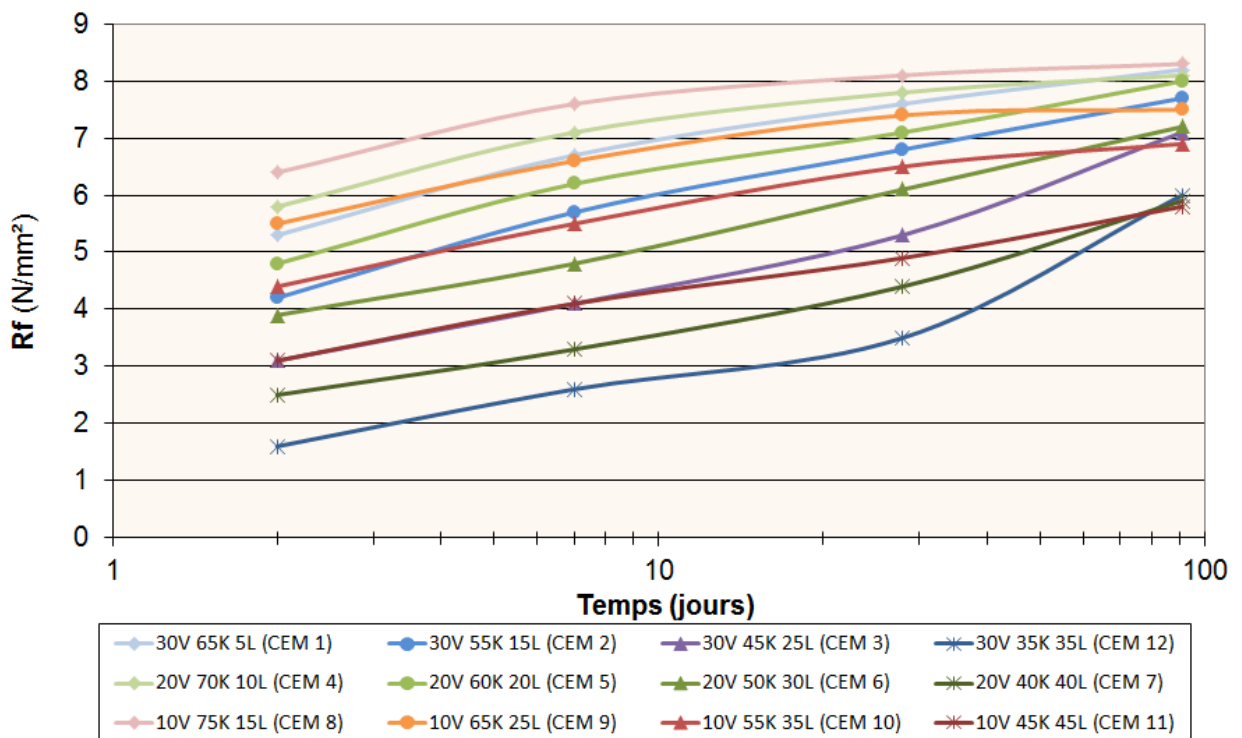


Figure 3-9 - Résistances à la flexion des douze ciments de laboratoire à base de CV1

Les ciments les plus riches en clinker ont les résistances mécaniques les plus élevées et inversement. A partir de 28 jours, pour une même teneur en clinker, ce sont les compositions plus riches en cendre par rapport au filler qui sont les plus résistantes.

A jeune âge, c'est la composition la plus riche en filler par rapport au laitier qui présente les résistances les plus élevées (CEM 8). La composition donnant les résistances les moins élevées pour toutes les échéances est celle riche en cendre et filler (CEM 12).

Les résistances à la flexion (Figure 3-9) montrent globalement les mêmes tendances que les résistances à la compression (Figure 3-8).

Le Tableau 3-8 donne les valeurs numériques des résistances à la compression et à la flexion des douze ciments de laboratoire à base de la cendre CV1 et les compare aux résistances obtenues dans le cadre du projet CEMCALC I avec les mêmes formulations dans lesquelles le laitier remplace la cendre.

			30S 65K 5L	30S 55K 15L	30S 45K 25L	30S 35K 35L	20S 70K 10L	20S 60K 20L	20S 50K 30L	20S 40K 40L	10S 75K 15L	10S 65K 25L	10S 55K 35L	10S 45K 45L
20°C			30V 65K 5L	30V 55K 15L	30V 45K 25L	30V 35K 35L	20V 70K 10L	20V 60K 20L	20V 50K 30L	20V 40K 40L	10V 75K 15L	10V 65K 25L	10V 55K 35L	10V 45K 45L
Rc		jours	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 12	CEM 4	CEM 5	CEM 6	CEM 7	CEM 8	CEM 9	CEM 10	CEM 11
(N/mm ²)	CEMCALC I	2	27.5	23.2	16.6	10.1	29.1	24.1	18.6	12.6	30.7	27.0	20.8	15.3
	CEM v1		27.3	21.1	14.5	7.0	29.5	23.5	18.0	11.3	31.9	26.4	20.6	14.5
	Différence		-0.2	-2.1	-2.1	-3.1	0.4	-0.6	-0.6	-1.3	1.2	-0.6	-0.2	-0.8
	CEMCALC I	7	43.9	38.3	31.3	24.5	44.5	38.7	30.9	25.2	45.4	38.6	31.1	22.8
	CEM v1		38.5	29.7	21.2	12.2	42.6	34.4	25.8	16.2	45.8	38.4	29.3	19.9
	Différence		-5.4	-8.6	-10.1	-12.3	-1.9	-4.3	-5.1	-9.0	0.4	-0.2	-1.8	-2.9
	CEMCALC I	28	62.7	58.2	49.3	39.9	60.3	56.0	48.3	38.1	57.8	51.5	45.0	33.0
	CEM v1		48.5	39.3	27.5	16.3	51.0	40.6	31.9	21.8	54.1	45.6	35.7	24.4
	Différence		-14.2	-18.9	-21.8	-23.6	-9.3	-15.4	-16.4	-16.3	-3.7	-5.9	-9.3	-8.6
	CEMCALC I	91	77.8	68.5	61.4	49.5	68.7	67.4	57.7	47.7	63.4	57.9	50.1	39.0
	CEM v1		60.4	49.3	36.3	24.9	60.3	50.3	39.8	28.0	59.1	50.6	40.0	28.8
	Différence		-17.4	-19.2	-25.1	-24.6	-8.4	-17.1	-17.9	-19.7	-4.3	-7.3	-10.1	-10.2
Rf		jours	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 12	CEM 4	CEM 5	CEM 6	CEM 7	CEM 8	CEM 9	CEM 10	CEM 11
(N/mm ²)	CEMCALC I	2	5.9	5.6	4.4	3.0	6.2	5.7	4.6	3.5	6.5	5.7	5.0	3.9
	CEM v1		5.3	4.2	3.1	1.6	5.8	4.8	3.9	2.5	6.4	5.5	4.4	3.1
	Différence		-0.6	-1.4	-1.3	-1.4	-0.4	-0.9	-0.7	-1.0	-0.1	-0.2	-0.6	-0.8
	CEMCALC I	7	7.5	7.3	6.8	5.7	7.6	6.8	6.4	5.7	7.7	7.0	6.4	5.3
	CEM v1		6.7	5.7	4.1	2.6	7.1	6.2	4.8	3.3	7.6	6.6	5.5	4.1
	Différence		-0.8	-1.6	-2.7	-3.1	-0.5	-0.6	-1.6	-2.4	-0.1	-0.4	-0.9	-1.2
	CEMCALC I	28	9.5	9.1	8.8	7.6	8.8	8.5	8.7	7.7	8.3	8.2	8.0	7.0
	CEM v1		7.6	6.8	5.3	3.5	7.8	7.1	6.1	4.4	8.1	7.4	6.5	4.9
	Différence		-1.9	-2.3	-3.5	-4.1	-1.0	-1.4	-2.6	-3.3	-0.2	-0.8	-1.5	-2.1
	CEMCALC I	91	8.9	9.0	8.5	8.2	8.1	9.2	9.2	8.5	7.6	7.6	7.8	7.2
	CEM v1		8.2	7.7	7.1	6.0	8.1	8.0	7.2	5.9	8.3	7.5	6.9	5.8
	Différence		-0.7	-1.3	-1.4	-2.2	0.0	-1.2	-2.0	-2.6	0.7	-0.1	-0.9	-1.4

Tableau 3-8 - Comparaison des résistances mécaniques des douze ciments de laboratoire à base de CV1 par rapport aux ciments de CEMCALC I

On constate par rapport à CEMCALC I (Tableau 3-8) que les valeurs des résistances sont moins élevées lorsqu'on utilise une cendre à la place du laitier, principalement après 7 jours d'hydratation. D'autre part, le développement des résistances est moins important. En effet, c'est seulement à partir de 91 jours, contre 28 jours avec le laitier, que les ciments plus riches en cendre commencent à rattraper ceux ayant plus ou moins la même quantité de clinker. Il est, de fait, connu que les cendres contribuent au développement des résistances surtout à partir de 91 jours.

Le Tableau 3-9 montre que certains ciments de laboratoire à base de la cendre CV1 ne rentrent pas dans minimum une classe de résistance et ce principalement pour les critères à 28 jours qui ne sont pas atteints. Seul le ciment riche en cendre et filler (CEM 12) n'atteint

aucun critère à jeune âge (Figure 3-8). Ce sont les ciments contenant beaucoup de filler calcaire qui ne parviennent pas à remplir tous les critères de classes de résistance (CEM 7, CEM 11, CEM 12) ainsi que le ciment à teneur en filler calcaire intermédiaire mais riche en cendre (CEM 3).

	Classe de résistance					
	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R	52,5 N	52,5 R
CEM 1 v1 (30V 65K 5L)	X	X	X	X	—	—
CEM 2 v1 (30V 55K 15L)	X	X	—	—	—	—
CEM 3 v1 (30V 45K 25L)	—	—	—	—	—	—
CEM 4 v1 (20V 70K 10L)	X	X	X	X	—	—
CEM 5 v1 (20V 60K 20L)	X	X	—	—	—	—
CEM 6 v1 (20V 50K 30L)	—	—	—	—	—	—
CEM 7 v1 (20V 40K 40L)	—	—	—	—	—	—
CEM 8 v1 (10V 75K 15L)	—	—	X	X	X	X
CEM 9 v1 (10V 65K 25L)	X	X	X	X	—	—
CEM 10 v1 (10V 55K 35L)	X	X	—	—	—	—
CEM 11 v1 (10V 45K 45L)	—	—	—	—	—	—
CEM 12 v1 (30V 35K 35L)	—	—	—	—	—	—

Tableau 3-9 – Classes de résistance des douze ciments de laboratoire à base de la CV1

3.4 Ciments à base de la cendre volante de co-combustion CVco1

3.4.1 Calorimétrie Langavant

La Figure 3-10 reprend les courbes de dégagement de chaleur des douze ciments de laboratoire et le Tableau 3-10 fournit les valeurs numériques des flux dégagés à différentes échéances.

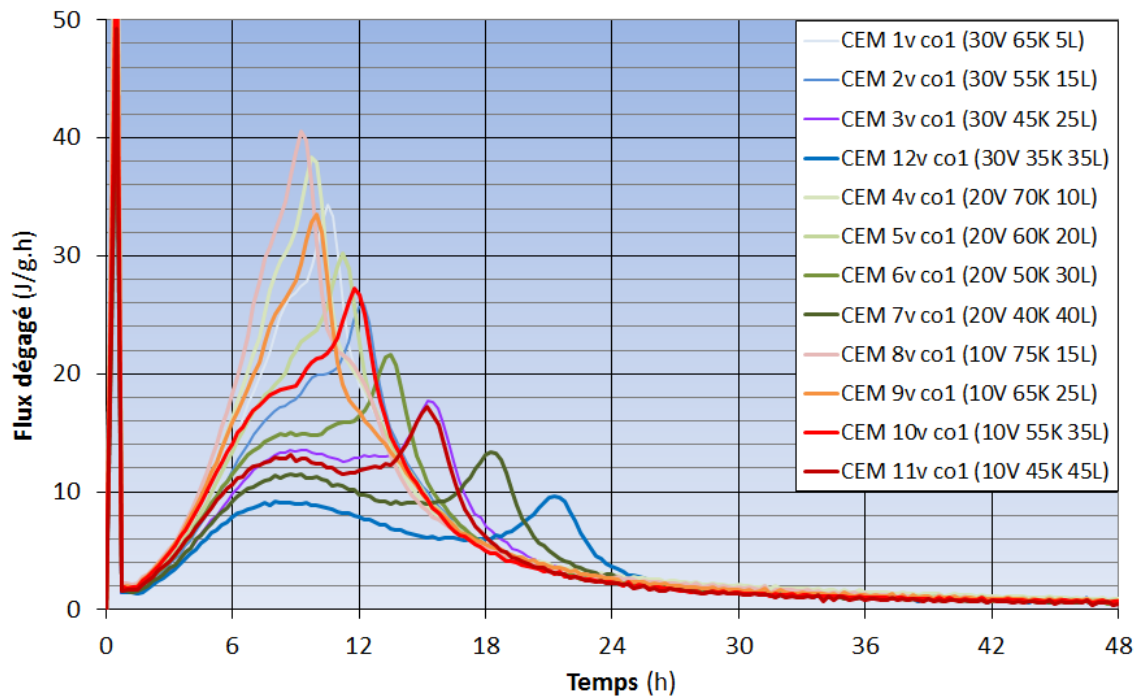


Figure 3-10 – Comparaison des flux de chaleur dégageé lors de l’hydratation des douze ciments à base de CVco1 (Calorimétrie Langavant)

La Figure 3-10 montre que les courbes des ciments à base de la cendre de co-combustion CVco1 sont un peu moins étalées que celles des ciments à base de la cendre de combustion CV1.

L’ordre de vitesse de dégagement de chaleur est globalement le même que pour les ciments contenant la cendre CV1.

Dans le cas des ciments contenant la cendre de co-combustion CVco1, contrairement au ciment à base de la CV1, il n’y a pas de différence marquée pour les ciments ayant la même teneur en clinker (CEM 1 – CEM 9, CEM 2 – CEM 10 et CEM 3 – CEM 11). Les courbes des ciments CEM 3v co1 et CEM 11v co1 sont d’ailleurs quasiment identiques ; leur point commun étant une teneur en clinker intermédiaire de 45%wt. Cela est probablement dû à une réactivité plus importante de la cendre de co-combustion par rapport à la cendre CV1.

		(J/g)					
		12 h	24 h	36h	41 h	48 h	72 h
V30 K65 L5	CEM 1 v1	198	274	294	300	307	320
	CEM 1v co1	198	286	309	316	323	338
	Différence	0	12	15	16	16	18
V30 K55 L15	CEM 2 v1	147	231	247	251	255	265
	CEM 2v co1	158	252	274	279	286	298
	Différence	11	21	27	28	31	33
V30 K45 L25	CEM 3 v1	116	206	223	228	231	241
	CEM 3v co1	117	220	240	245	251	262
	Différence	1	14	17	17	20	21
V20 K70 L10	CEM 4 v1	216	294	316	322	329	342
	CEM 4v co1	217	303	328	335	342	357
	Différence	1	9	12	13	13	15
V20 K60 L20	CEM 5 v1	183	260	278	282	288	299
	CEM 5v co1	181	268	288	294	300	314
	Différence	-2	8	10	12	12	15
V20 K50 L30	CEM 6 v1	133	224	241	246	250	259
	CEM 6v co1	134	232	250	254	259	270
	Différence	1	8	9	8	9	11
V20 K40 L40	CEM 7 v1	102	188	204	208	212	222
	CEM 7v co1	134	203	217	221	225	235
	Différence	32	15	13	13	13	13
V10 K75 L15	CEM 8 v1	236	310	340	340	346	358
	CEM 8v co1	230	312	335	340	346	358
	Différence	-6	2	-5	0	0	0
V10 K65 L25	CEM 9 v1	207	280	299	303	309	320
	CEM 9v co1	198	282	302	308	314	327
	Différence	-9	2	3	5	5	7
V10 K55 L35	CEM 10 v1	162	245	262	267	272	282
	CEM 10v co1	172	259	277	281	287	299
	Différence	10	14	15	14	15	17
V10 K45 L45	CEM 11 v1	126	211	226	229	233	242
	CEM 11v co1	115	209	226	230	235	245
	Différence	-11	-2	0	1	2	3
V30 K35 L35	CEM 12 v1	87	157	178	181	185	192
	CEM 12v co1	88	168	189	193	198	209
	Différence	1	11	11	12	13	17

Tableau 3-10 - Comparaison des quantités de chaleur dégagées à différentes échéances lors de l'hydratation des douze ciments à base de CVco1 par rapport à ceux à base de CV1 (Calorimétrie Langavant)

Le Tableau 3-10 montre que les ciments à base de la cendre de co-combustion CVco1 libèrent légèrement plus de chaleur que les ciments à base de la cendre CV1 dans le cas des ciments contenant 20 et 30%wt de cendre volante.

3.4.2 Temps de prise,...

Le Tableau 3-11 reprend les caractéristiques physico-mécaniques obtenues sur pâte de ciment pour les douze ciments fabriqués en laboratoire à base de la cendre de co-combustion CVco1.

		Consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Stabilité Le Châtelier (mm)
30V 65K 5L	CEM 1v co1	30.5	190	240	1.0
30V 55K 15L	CEM 2v co1	30.0	220	270	0.0
30V 45K 25L	CEM 3v co1	30.0	240	300	0.0
30V 35K 35L	CEM 12v co1	29.0	245	315	0.0
20V 70K 10L	CEM 4v co1	30.0	185	225	0.0
20V 60K 20L	CEM 5v co1	29.0	185	225	0.5
20V 50K 30L	CEM 6v co1	29.0	200	240	0.0
20V 40K 40L	CEM 7v co1	28.5	210	255	1.0
10V 75K 15L	CEM 8v co1	30.0	185	210	0.0
10V 65K 25L	CEM 9v co1	29.0	175	210	0.0
10V 55K 35L	CEM 10v co1	28.5	170	240	0.0
10V 45K 45L	CEM 11v co1	27.5	170	210	0.0

Tableau 3-11 - Caractéristiques physico-mécaniques des douze ciments à base de CVco1 sur pâte de ciment (rouge : valeur maximale ; bleu : valeur minimale)

Les consistances des douze ciments sont très proches les unes des autres avec un écart maximal de 3%. Comme observé pour les CEMv1, la consistance tend à diminuer sensiblement avec l'augmentation de la quantité filler pour une même teneur en cendre. Aucun des douze ciments ne présentent d'expansion ; leur stabilité « Le Châtelier » sont bien en-deçà du maximum autorisé de 10 mm.

La Figure 3-11 illustre les résultats des temps de prise obtenus pour les douze ciments de laboratoire à base de la cendre de co-combustion CVco1.

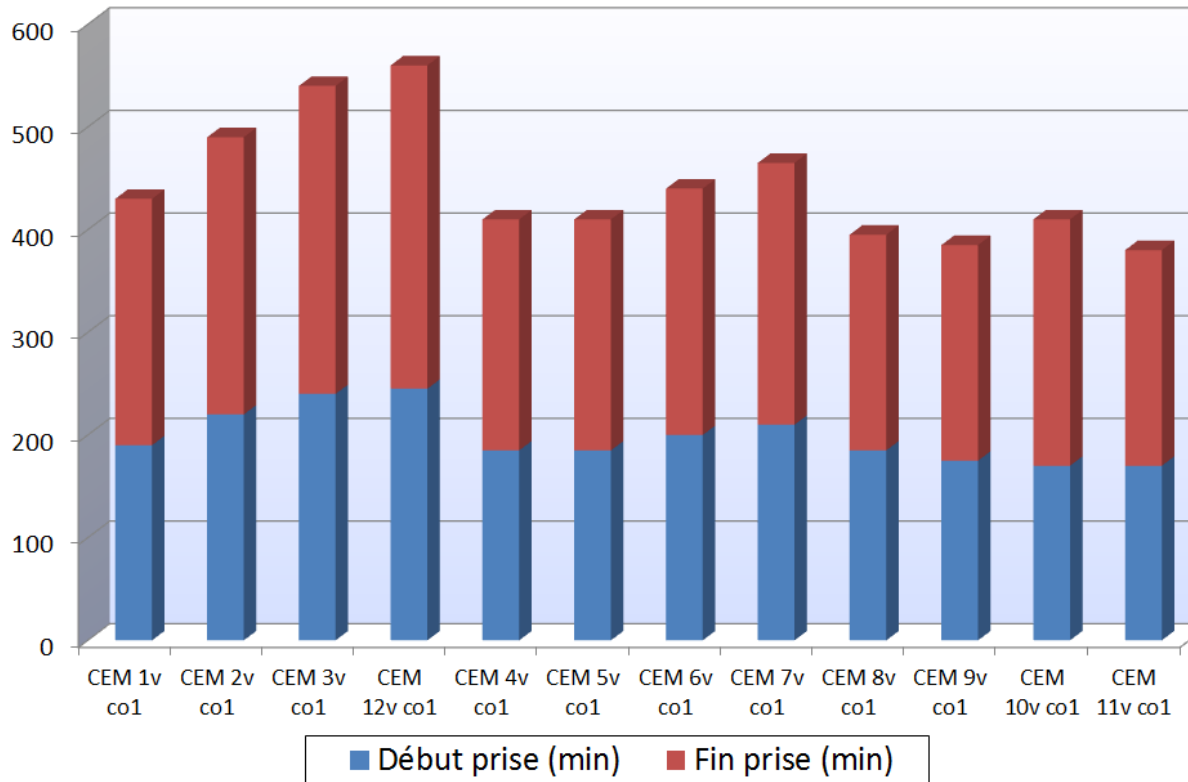


Figure 3-11 - Temps de prise des douze ciments à base de CVco1

Les ciments contenant moins de cendre donnent les temps de prise les plus courts. Les différences de temps de prise se marquent plus que pour les ciments à base de CV1. D'autre part, les temps de prise notamment des ciments plus riches en cendre ont tendances à être plus longs qu'avec CV1.

On ne note pas d'effet du filler calcaire sur les temps de prise. Ceux-ci semblent plus affectés par les teneurs en clinker et cendre volante. Ils ont tendance à augmenter avec une diminution de la teneur en clinker et une augmentation de la teneur en cendre volante.

Le CEM 11 présente les temps de début et de fin de prise les plus courts ; il possède peu de cendre (10%) et beaucoup de filler (45%). Les ciments CEM 4, CEM 5, CEM 8, CEM 9 et CEM10 présentent également des temps prise courts.

Le CEM 12, quant à lui, présente les temps de prise les plus longs ; il possède beaucoup de cendre (30%) et de filler (35%). Les temps de prise des CEM 2 et CEM 3 sont également longs.

3.4.3 Résistances mécaniques

Les Figure 3-12 et Figure 3-13 présentent les résistances mécaniques mesurées sur mortier des douze ciments à base de la cendre de co-combustion CVco1.

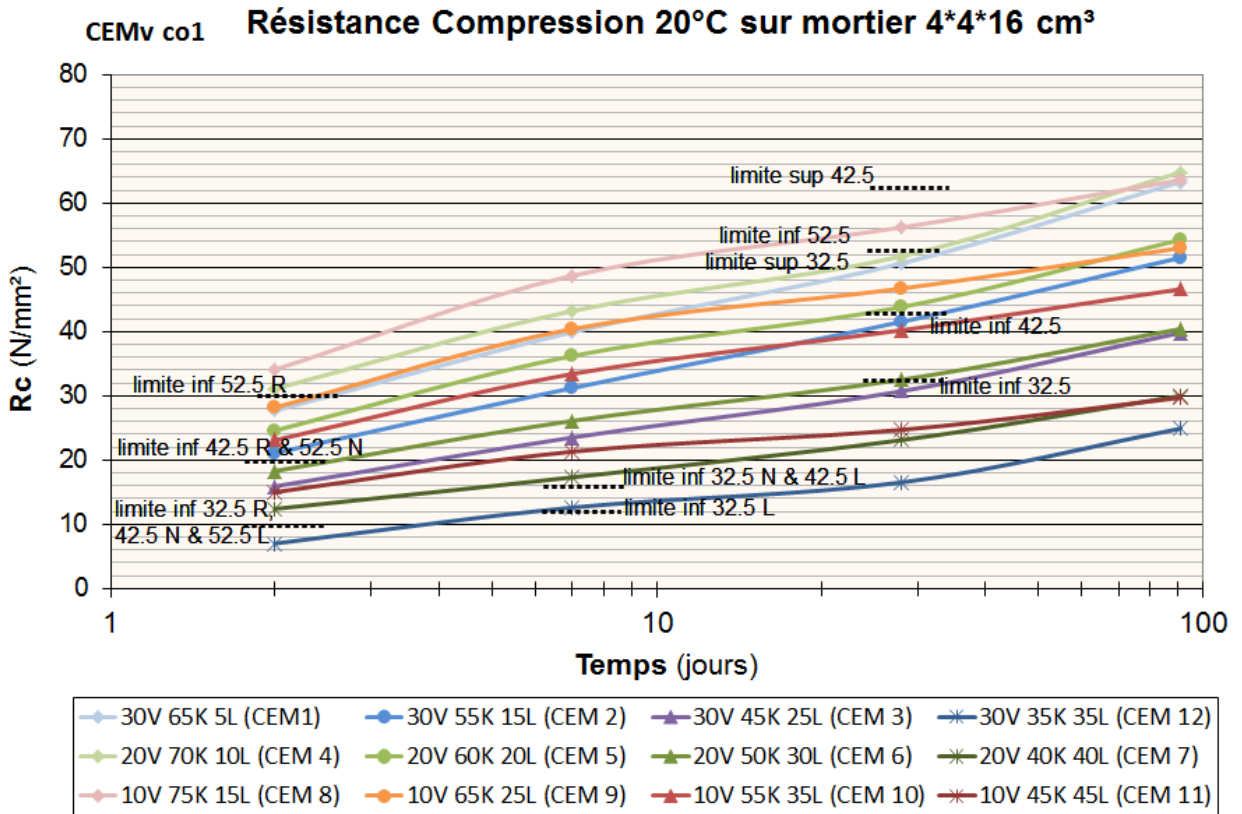


Figure 3-12 - Résistances à la compression des douze ciments de laboratoire à base de CVco1

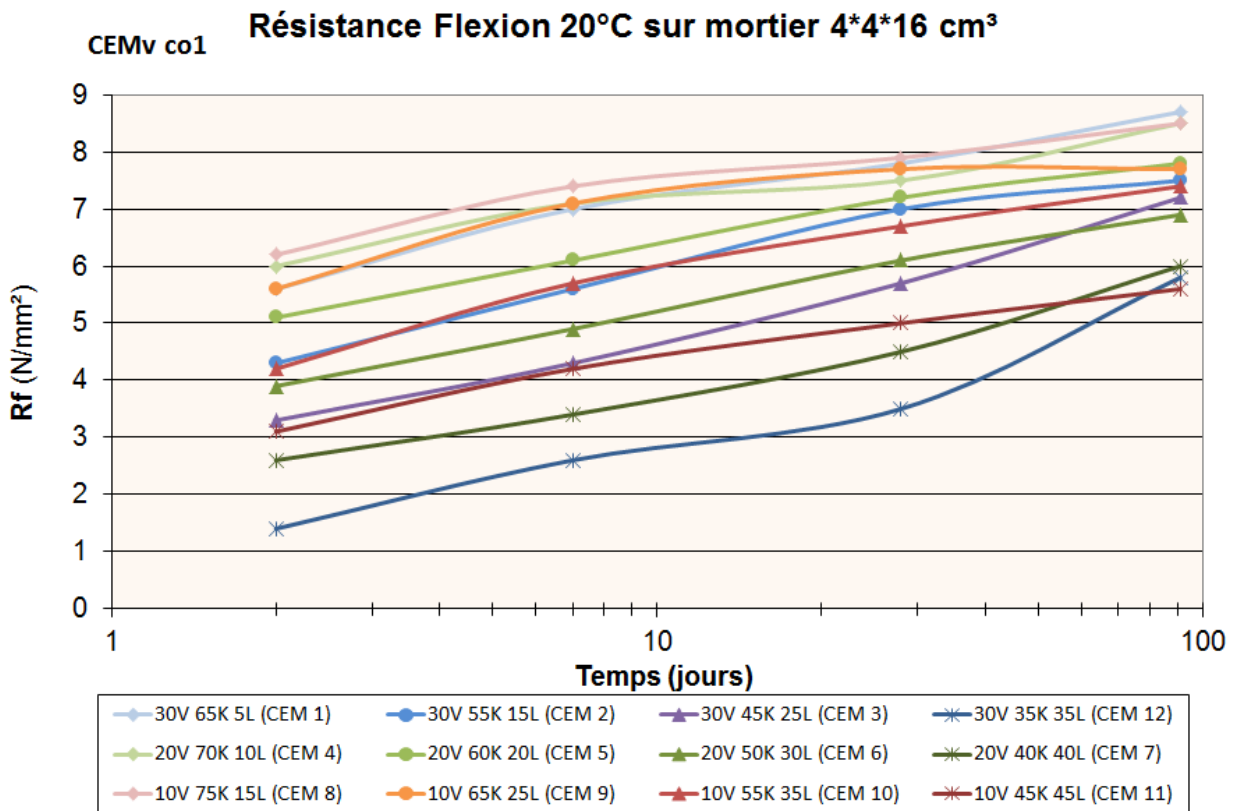


Figure 3-13 - Résistances à la flexion des douze ciments de laboratoire à base de CVco1

Les résistances mécaniques des ciments à base de la cendre de co-combustion (Figure 3-12 et Figure 3-13) suivent les mêmes tendances que les ciments à base de la CV1 (Figure 3-8 et Figure 3-9).

20°C			30V 65K 5L	30V 55K 15L	30V 45K 25L	30V 35K 35L	20V 70K 10L	20V 60K 20L	20V 50K 30L	20V 40K 40L	10V 75K 15L	10V 65K 25L	10V 55K 35L	10V 45K 45L
Rc		jours	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 12	CEM 4	CEM 5	CEM 6	CEM 7	CEM 8	CEM 9	CEM 10	CEM 11
(N/mm ²)	CEM v1	2	27.3	21.1	14.5	7.0	29.5	23.5	18.0	11.3	31.9	26.4	20.6	14.5
	CEM v co1		27.7	21.1	15.9	7.0	31.1	24.6	18.3	12.4	34.1	28.2	23.1	15.0
	Différence		0.4	0.0	1.4	0.0	1.6	1.1	0.3	1.1	2.2	1.8	2.5	0.5
	CEM v1	7	38.5	29.7	21.2	12.2	42.6	34.4	25.8	16.2	45.8	38.4	29.3	19.9
	CEM v co1		39.9	31.2	23.5	12.6	43.2	36.2	26.1	17.3	48.7	40.4	33.4	21.3
	Différence		1.4	1.5	2.3	0.4	0.6	1.8	0.3	1.1	2.9	2.0	4.1	1.4
	CEM v1	28	48.5	39.3	27.5	16.3	51.0	40.6	31.9	21.8	54.1	45.6	35.7	24.4
	CEM v co1		50.6	41.5	30.7	16.5	51.7	43.8	32.5	23.1	56.2	46.7	40.2	24.7
	Différence		2.1	2.2	3.2	0.2	0.7	3.2	0.6	1.3	2.1	1.1	4.5	0.3
	CEM v1	91	60.4	49.3	36.3	24.9	60.3	50.3	39.8	28.0	59.1	50.6	40.0	28.8
	CEM v co1		63.3	51.5	39.8	24.9	64.8	54.3	40.4	30.0	63.6	53.0	46.6	29.7
	Différence		2.9	2.2	3.5	0.0	4.5	4.0	0.6	2.0	4.5	2.4	6.6	0.9
	Rf													
(N/mm ²)	CEM v1	2	5.3	4.2	3.1	1.6	5.8	4.8	3.9	2.5	6.4	5.5	4.4	3.1
	CEM v co1		5.6	4.3	3.3	1.4	6.0	5.1	3.9	2.6	6.2	5.6	4.2	3.1
	Différence		0.3	0.1	0.2	-0.2	0.2	0.3	0.0	0.1	-0.2	0.1	-0.2	0.0
	CEM v1	7	6.7	5.7	4.1	2.6	7.1	6.2	4.8	3.3	7.6	6.6	5.5	4.1
	CEM v co1		7	5.6	4.3	2.6	7.1	6.1	4.9	3.4	7.4	7.1	5.7	4.2
	Différence		0.3	-0.1	0.2	0.0	0.0	-0.1	0.1	0.1	-0.2	0.5	0.2	0.1
	CEM v1	28	7.6	6.8	5.3	3.5	7.8	7.1	6.1	4.4	8.1	7.4	6.5	4.9
	CEM v co1		7.8	7.0	5.7	3.5	7.5	7.2	6.1	4.5	7.9	7.7	6.7	5.0
	Différence		0.2	0.2	0.4	0.0	-0.3	0.1	0.0	0.1	-0.2	0.3	0.2	0.1
	CEM v1	91	8.2	7.7	7.1	6.0	8.1	8.0	7.2	5.9	8.3	7.5	6.9	5.8
	CEM v co1		8.7	7.5	7.2	5.8	8.5	7.8	6.9	6.0	8.5	7.7	7.4	5.6
	Différence		0.5	-0.2	0.1	-0.2	0.4	-0.2	-0.3	0.1	0.2	0.2	0.5	-0.2

Tableau 3-12 - Comparatif des résistances mécaniques des douze ciments à base de CVco1 par rapport aux ciments à base de CV1

Le Tableau 3-12 montre que les résistances à la compression des ciments contenant la cendre de co-combustion tendent à être plus élevées que celles des ciments à base de CV1 mais ce n'est pas systématiquement le cas.

Concernant les résistances à la flexion, il n'y a pas de différence significative entre les deux familles de ciments.

Le Tableau 3-15 donne les classes de résistance auxquelles répondent les douze ciments à base de la cendre de co-combustion CVco1.

	Classe de résistance					
	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R	52,5 N	52,5 R
CEM 1 co1 (30V 65K 5L)	X	X	X	X	—	—
CEM 2 co1 (30V 55K 15L)	X	X	—	—	—	—
CEM 3 co1 (30V 45K 25L)	—	—	—	—	—	—
CEM 4 co1 (20V 70K 10L)	X	X	X	X	—	—
CEM 5 co1 (20V 60K 20L)	X	X	—	—	—	—
CEM 6 co1 (20V 50K 30L)	X	X	—	—	—	—
CEM 7 co1 (20V 40K 40L)	—	—	—	—	—	—
CEM 8 co1 (10V 75K 15L)	—	—	X	X	X	X
CEM 9 co1 (10V 65K 25L)	X	X	X	X	—	—
CEM 10 co1 (10V 55K 35L)	X	X	—	—	—	—
CEM 11 co1 (10V 45K 45L)	—	—	—	—	—	—
CEM 12 co1 (30V 35K 35L)	—	—	—	—	—	—

Tableau 3-13 – Classes de résistance des douze ciments de laboratoire à base de la CVco1

Le Tableau 3-15 montre en comparaison avec le Tableau 3-9 que les ciments à base de la cendre de co-combustion donnent les mêmes classes de résistance que les ciments à base de la cendre CV1, exception faite du CEM 6 qui pour la CVco1 entrent dans les classes de résistance 32,5.

3.5 Ciments à base de la cendre volante de combustion classique CV2

3.5.1 Calorimétrie Langavant

La Figure 3-14 reprend les courbes de dégagement de chaleur des douze ciments de laboratoire à base de la cendre CV2 et le Tableau 3-14 fournit les valeurs numériques des flux dégagés à différentes échéances en comparaison à celles obtenues avec la cendre CV1.

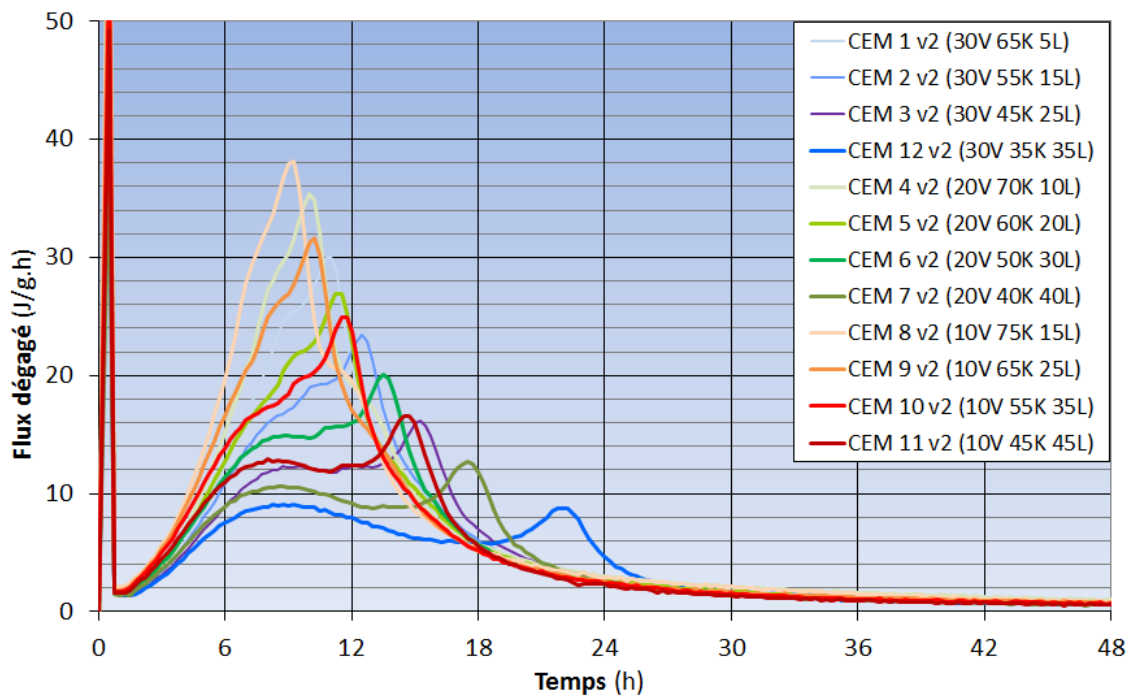


Figure 3-14 – Comparaison des flux de chaleur dégagée lors de l’hydratation des douze ciments de laboratoire à base de CV2 (Calorimétrie Langavant)

Le profil des courbes calorimétriques obtenues pour les ciments à base de la cendre CV2 (Figure 3-14) sont similaires aux courbes des ciments à base de la cendre CV1 (Figure 3-5).

		(J/g)					
		12 h	24 h	36h	41 h	48 h	72 h
V30 K65 L5	CEM 1 v1	198	274	294	300	307	320
	CEM 1 v2	182	272	294	300	307	321
	Différence	-16	-2	0	0	0	1
V30 K55 L15	CEM 2 v1	147	231	247	251	255	265
	CEM 2 v2	142	242	264	270	276	290
	Différence	-5	11	17	19	21	25
V30 K45 L25	CEM 3 v1	116	206	223	228	231	241
	CEM 3 v2	104	202	223	228	234	246
	Différence	-12	-4	0	0	3	5
V20 K70 L10	CEM 4 v1	216	294	316	322	329	342
	CEM 4 v2	207	297	323	330	338	354
	Différence	-9	3	7	8	9	12
V20 K60 L20	CEM 5 v1	183	260	278	282	288	299
	CEM 5 v2	169	257	323	284	290	304
	Différence	-14	-3	45	2	2	5
V20 K50 L30	CEM 6 v1	133	224	241	246	250	259
	CEM 6 v2	131	227	246	251	256	268
	Différence	-2	3	5	5	6	9
V20 K40 L40	CEM 7 v1	102	188	204	208	212	222
	CEM 7 v2	95	185	203	207	212	222
	Différence	-7	-3	-1	-1	0	0
V10 K75 L15	CEM 8 v1	236	310	340	340	346	358
	CEM 8 v2	231	312	338	344	351	365
	Différence	-5	2	-2	4	5	7
V10 K65 L25	CEM 9 v1	207	280	299	303	309	320
	CEM 9 v2	202	282	303	308	314	327
	Différence	-5	2	4	5	5	7
V10 K55 L35	CEM 10 v1	162	245	262	267	272	282
	CEM 10 v2	166	248	267	272	277	289
	Différence	4	3	5	5	5	7
V10 K45 L45	CEM 11 v1	126	211	226	229	233	242
	CEM 11 v2	117	207	224	228	233	243
	Différence	-9	-4	-2	-1	0	1
V30 K35 L35	CEM 12 v1	87	157	178	181	185	192
	CEM 12 v2	84	164	186	199	195	206
	Différence	-3	7	8	18	10	14

Tableau 3-14 - Comparaison des quantités de chaleur dégagées à différentes échéances lors de l'hydratation des douze ciments à base de CV2 par rapport à ceux à base de CV1 (Calorimétrie Langavant)

Le Tableau 3-14 montre qu'il n'y a pas de différence significative dans la quantité de chaleur dégagée entre les deux cendres de combustion CV1 et CV2.

3.5.2 Temps de prise, ...

Le Tableau 3-15 reprend les caractéristiques physico-mécaniques obtenues sur pâte de ciment pour les douze ciments fabriqués en laboratoire à base de la cendre CV2.

		Consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Stabilité Le Châtelier (mm)
30V 65K 5L	CEM 1 v2	30.0	220	270	0.0
30V 55K 15L	CEM 2 v2	29.0	210	255	0.0
30V 45K 25L	CEM 3 v2	28.5	215	285	1.0
30V 35K 35L	CEM 12 v2	28.0	225	270	1.0
20V 70K 10L	CEM 4 v2	29.5	190	240	0.0
20V 60K 20L	CEM 5 v2	28.0	185	240	1.5
20V 50K 30L	CEM 6 v2	27.5	180	210	1.0
20V 40K 40L	CEM 7 v2	28.0	200	270	0.0
10V 75K 15L	CEM 8 v2	30.0	180	210	1.0
10V 65K 25L	CEM 9 v2	28.5	165	210	1.0
10V 55K 35L	CEM 10 v2	28.0	170	210	0.0
10V 45K 45L	CEM 11 v2	27.5	170	210	0.0

Tableau 3-15 - Caractéristiques physico-mécaniques des douze ciments de laboratoire à base de CV2 sur pâte de ciment (rouge : valeur maximale ; bleu : valeur minimale)

Les consistances des douze ciments sont très proches les unes des autres avec un écart maximal de 3%. Une légère tendance de diminution de la consistance avec l'augmentation de la quantité filler pour une même teneur en cendre est observée. Les douze ciments ne présentent pas d'expansion significative ; en effet, les mesures de stabilité « Le Châtelier » sont bien en-deçà du maximum de 10 mm.

La Figure 3-15 illustre les résultats des temps de prise obtenus pour les douze ciments de laboratoire à base de la cendre CV2.

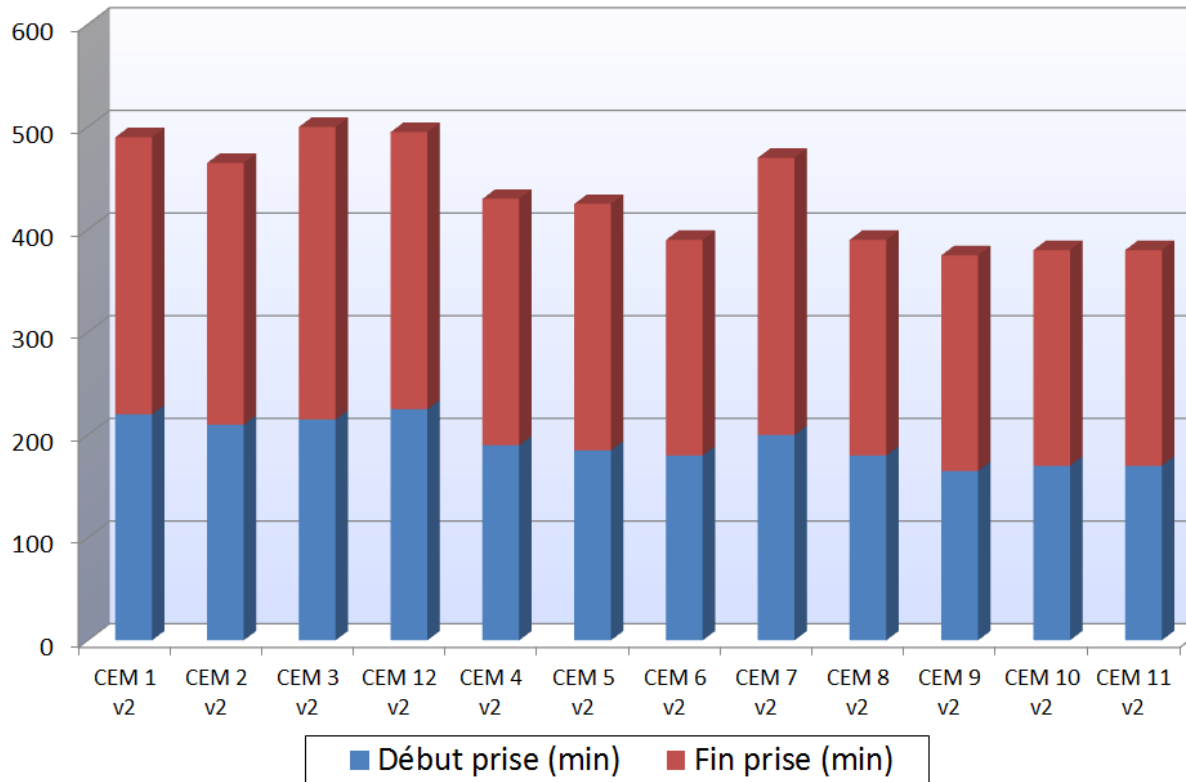


Figure 3-15 - Temps de prise des douze ciments de laboratoire à base de CV2

Comme dans le cas des ciments à base de la cendre de combustion CV1 et ceux à base de la cendre de co-combustion CVco1, les temps de prises sont plus courts pour les ciments plus pauvres en cendre volante (CEM 8, CEM 9, CEM 10 et CEM 11). Les différences de temps de prise se marquent plus que pour les ciments à base de CV1 et les temps de prise notamment des ciments plus riches en cendre ont tendances à être un peu plus longs qu’avec CV1.

Ce sont les ciments contenant 10%wt de la CV2 (CEM 8, CEM 9, CEM 10 et CEM 11) présentent les temps de début et de fin de prise les plus courts. Les ciments contenant 30% de cette cendre (CEM 1, CEM 2, CEM 3, CEM 12) mais également le CEM 7 (20V 40K 40L, riche en filler) présentent les temps de prise les plus longs.

3.5.3 Résistances mécaniques

Les Figure 3-16 et Figure 3-17 présentent les résistances mécaniques mesurées sur mortier des douze ciments de laboratoire à base de CV2.

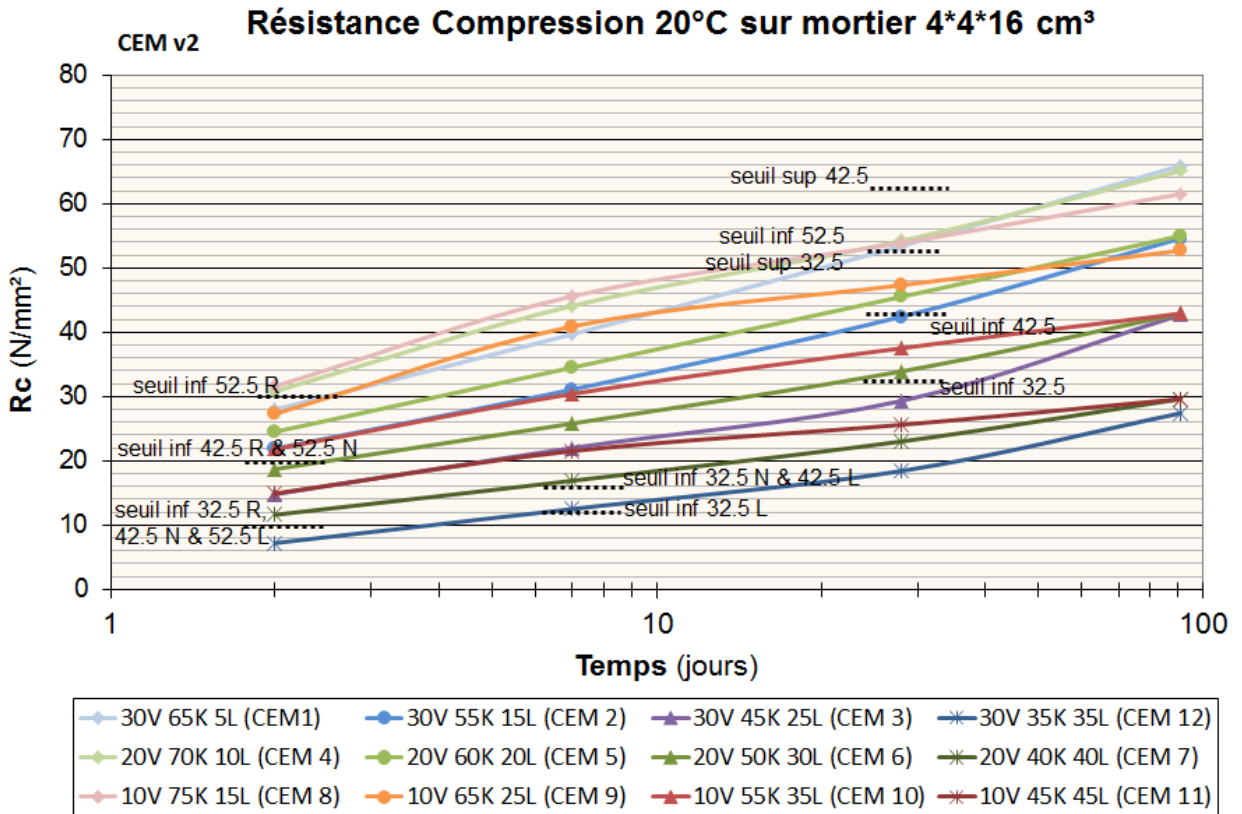


Figure 3-16 - Résistances à la compression des douze ciments de laboratoire à base de CV2

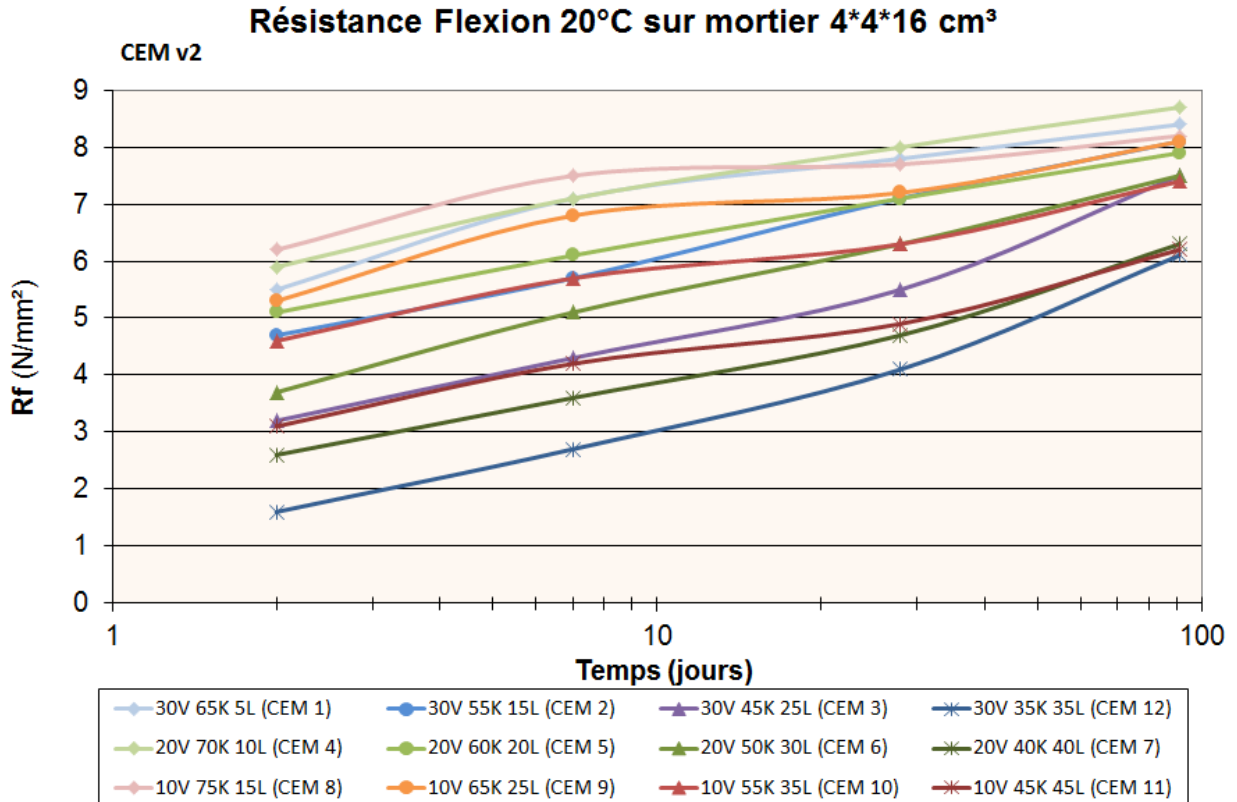


Figure 3-17 - Résistances à la flexion des douze ciments de laboratoire à base de CV2

Le Tableau 3-16 permet de comparer les résistances mécaniques obtenues des ciments à base de la cendre de combustion CV2 avec ceux contenant la cendre de combustion CV1.

20°C			30V 65K 5L	30V 55K 15L	30V 45K 25L	30V 35K 35L	20V 70K 10L	20V 60K 20L	20V 50K 30L	20V 40K 40L	10V 75K 15L	10V 65K 25L	10V 55K 35L	10V 45K 45L
Rc		jours	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 12	CEM 4	CEM 5	CEM 6	CEM 7	CEM 8	CEM 9	CEM 10	CEM 11
(N/mm ²)	CEM v1	2	27.3	21.1	14.5	7.0	29.5	23.5	18.0	11.3	31.9	26.4	20.6	14.5
	CEM v2		28.0	21.9	14.8	7.2	30.8	24.5	18.7	11.6	31.6	27.3	21.8	14.9
	Différence		0.7	0.8	0.3	0.2	1.3	1.0	0.7	0.3	-0.3	0.9	1.2	0.4
	CEM v1	7	38.5	29.7	21.2	12.2	42.6	34.4	25.8	16.2	45.8	38.4	29.3	19.9
	CEM v2		39.7	31.1	22.0	12.5	44.1	34.5	25.8	16.9	45.6	40.9	30.4	21.5
	Différence		1.2	1.4	0.8	0.3	1.5	0.1	0.0	0.7	-0.2	2.5	1.1	1.6
	CEM v1	28	48.5	39.3	27.5	16.3	51.0	40.6	31.9	21.8	54.1	45.6	35.7	24.4
	CEM v2		53.4	42.4	29.3	18.4	54.2	45.5	33.9	23.0	53.9	47.3	37.5	25.6
	Différence		4.9	3.1	1.8	2.1	3.2	4.9	2.0	1.2	-0.2	1.7	1.8	1.2
	CEM v1	91	60.4	49.3	36.3	24.9	60.3	50.3	39.8	28.0	59.1	50.6	40.0	28.8
	CEM v2		65.9	54.6	42.7	27.4	65.1	55.0	42.9	29.6	61.5	52.7	42.9	29.6
	Différence		5.5	5.3	6.4	2.5	4.8	4.7	3.1	1.6	2.4	2.1	2.9	0.8
Rf		jours	CEM 1	CEM 2	CEM 3	CEM 12	CEM 4	CEM 5	CEM 6	CEM 7	CEM 8	CEM 9	CEM 10	CEM 11
(N/mm ²)	CEM v1	2	5.3	4.2	3.1	1.6	5.8	4.8	3.9	2.5	6.4	5.5	4.4	3.1
	CEM v2		5.5	4.7	3.2	1.6	5.9	5.1	3.7	2.6	6.2	5.3	4.6	3.1
	Différence		0.2	0.5	0.1	0.0	0.1	0.3	-0.2	0.1	-0.2	-0.2	0.2	0.0
	CEM v1	7	6.7	5.7	4.1	2.6	7.1	6.2	4.8	3.3	7.6	6.6	5.5	4.1
	CEM v2		7.1	5.7	4.3	2.7	7.1	6.1	5.1	3.6	7.5	6.8	5.7	4.2
	Différence		0.4	0.0	0.2	0.1	0.0	-0.1	0.3	0.3	-0.1	0.2	0.2	0.1
	CEM v1	28	7.6	6.8	5.3	3.5	7.8	7.1	6.1	4.4	8.1	7.4	6.5	4.9
	CEM v2		7.8	7.1	5.5	4.1	8.0	7.1	6.3	4.7	7.7	7.2	6.3	4.9
	Différence		0.2	0.3	0.2	0.6	0.2	0.0	0.2	0.3	-0.4	-0.2	-0.2	0.0
	CEM v1	91	8.2	7.7	7.1	6.0	8.1	8.0	7.2	5.9	8.3	7.5	6.9	5.8
	CEM v2		8.4	8.1	7.5	6.1	8.7	7.9	7.5	6.3	8.2	8.1	7.4	6.2
	Différence		0.2	0.4	0.4	0.1	0.6	-0.1	0.3	0.4	-0.1	0.6	0.5	0.4

Tableau 3-16 - Comparatif des résistances mécaniques des douze ciments à base de CV2 par rapport aux ciments à base de CV1

Le Tableau 3-16 montre que les ciments à base de la cendre CV2 présentent des résistances à la compression globalement plus élevées à partir de 28 jours.

Il n'y a pas de différence significative des résistances à la flexion par rapport aux ciments à base de la cendre CV1.

Le Tableau 3-17 donne les classes de résistance auxquelles répondent les douze ciments à base de la cendre de combustion CV2.

	Classe de résistance					
	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R	52,5 N	52,5 R
CEM 1 v2 (30V 65K 5L)	—	—	X	X	X	—
CEM 2 v2 (30V 55K 15L)	X	X	—	—	—	—
CEM 3 v2 (30V 45K 25L)	—	—	—	—	—	—
CEM 4 v2 (20V 70K 10L)	—	—	X	X	X	X
CEM 5 v2 (20V 60K 20L)	X	X	X	X	—	—
CEM 6 v2 (20V 50K 30L)	X	X	—	—	—	—
CEM 7 v2 (20V 40K 40L)	—	—	—	—	—	—
CEM 8 v2 (10V 75K 15L)	—	—	X	X	X	X
CEM 9 v2 (10V 65K 25L)	X	X	X	X	—	—
CEM 10 v2 (10V 55K 35L)	X	X	—	—	—	—
CEM 11 v2 (10V 45K 45L)	—	—	—	—	—	—
CEM 12 v2 (30V 35K 35L)	—	—	—	—	—	—

Tableau 3-17 – Classes de résistance des douze ciments de laboratoire à base de la CV2

Le Tableau 3-17 montre en comparaison avec les Tableau 3-9 et Tableau 3-15 que plusieurs des ciments à base de la cendre de combustion CV2 entrent dans des classes de résistance supérieures à celles des ciments à base des cendres CV1 et CVco1.

Les différences par rapport aux ciments à base de la cendre de co-combustion CVco1 sont l'appartenance :

- du ciment à teneur intermédiaire en cendre et faible teneur en filler (CEM 4) aux classes 52,5 ;
- du ciment riche en cendre et pauvre en filler (CEM 1) à la classe 52,5 N.

Nous constatons, dès lors, que la nature et la finesse de la cendre peut intervenir sur les performances des ciments à base de celle-ci.

3.6 Sélection de cinq compositions

Les compositions sélectionnées pour l'étude de l'influence de la composition des fillers et la phase béton sont les mêmes que celles du projet CEMCALC I afin de pouvoir notamment en comparer les résultats.

Il s'agit des cinq compositions suivantes :

- ❖ **CEM 1** (30V 65K 5L) comme référence
 - Elle correspond à la limite des CEM II/B-M, elle est donc proche de ciments déjà normalisés.
 - Elle est riche en cendre et pauvre en filler calcaire.

- ❖ **CEM 3** (30V 45K 25L)
 - Elle est riche en cendre et avec une teneur en filler calcaire intermédiaire.
- ❖ **CEM 12** (30V 35K 35L)
 - Elle est riche en cendre et filler calcaire.
- ❖ **CEM 6** (20V 50K 30L)
 - Elle a une teneur intermédiaire en cendre et filler calcaire.
- ❖ **CEM 10** (10V 55K 35L)
 - Elle est pauvre en cendre et riche en filler calcaire.

La plupart de celles-ci sont assez riches en filler calcaire étant donné que le but de cette recherche est d'étudier les ciments ternaires à haute teneur en filler calcaire. Le CEM 1 qui, lui, est pauvre en filler calcaire avec 5wt% sert de référence car il est proche de ciments déjà présents sur le marché.

La fabrication de ces ciments en quantité suffisante pour la phase béton et durabilité a été effectuée avec la méthode de mélange optimisée en dispersant mieux les constituants afin d'éviter tout problème d'homogénéité.

3.7 Etude de l'influence de la composition du filler calcaire

3.7.1 Calorimétrie Langavant

La Figure 3-18 et le Tableau 3-18 permettent de comparer les dégagements de chaleur des ciments à base de filler impur avec ceux réalisés à base de filler pur.

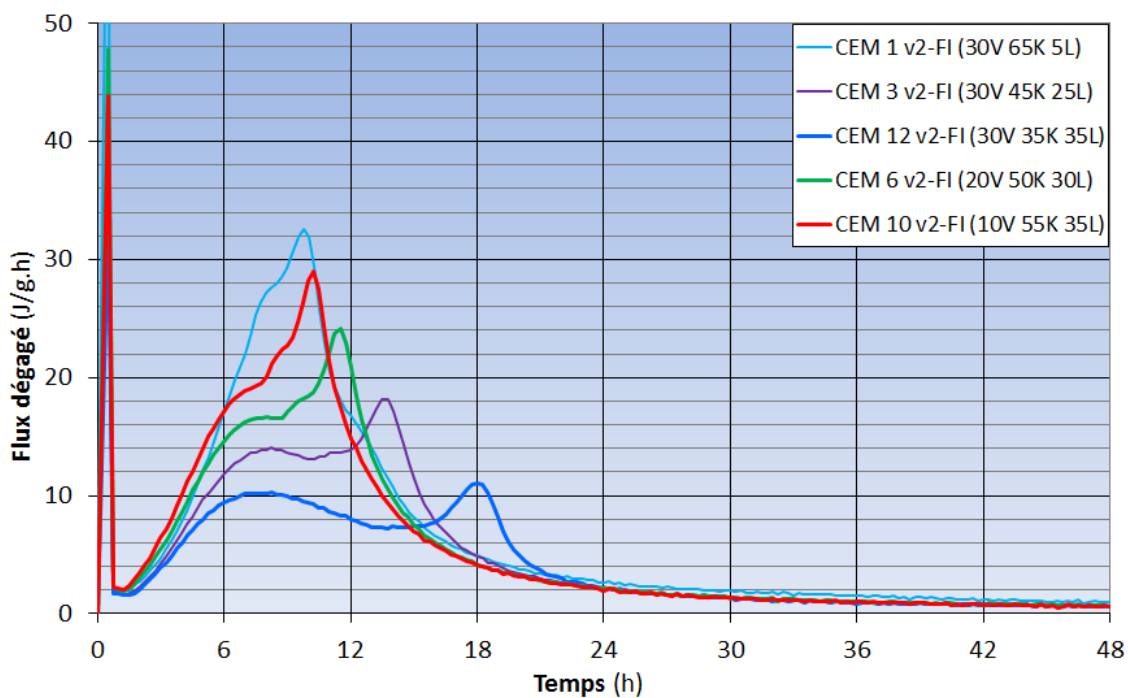


Figure 3-18 – Comparaison des flux de chaleur dégagée lors de l'hydratation des ciments à base de filler pur et impur (Calorimétrie Langavant)

La comparaison des Figure 3-14 et Figure 3-18 montrent que la présence de filler impur dans le ciment entraîne une accélération du dégagement de chaleur. La quantité relativement importante de SiO₂ (13,98%) dans le filler impur pourrait être la cause de cette accélération.

		(J/g)					
		12 h	24 h	36h	41 h	48 h	72 h
V30 K65 L5	CEM 1 v2-FP	182	272	294	300	307	321
	CEM 1 v2-FI	205	281	304	311	319	334
	Différence	23	9	10	11	12	13
V30 K45 L25	CEM 3 v2-FP	104	202	223	228	234	246
	CEM 3 v2-FI	123	209	226	231	236	248
	Différence	19	7	3	3	2	2
V20 K50 L30	CEM 6 v2-FP	131	227	246	251	256	268
	CEM 6 v2-FI	162	231	248	253	258	270
	Différence	31	4	2	2	2	2
V10 K55 L35	CEM 10 v2-FP	166	248	267	272	277	289
	CEM 10 v2-FI	185	248	265	269	274	285
	Différence	19	0	-2	-3	-3	-4
V30 K35 L35	CEM 12 v2-FP	84	164	186	199	195	206
	CEM 12 v2-FI	93	170	186	190	195	206
	Différence	9	6	0	-9	0	0

Tableau 3-18 - Comparaison des flux de chaleur dégagée lors de l'hydratation des ciments à base de filler pur et impur (Calorimétrie Langavant)

Par contre, le Tableau 3-18 ne met pas en évidence de différence significative dans la quantité de chaleur dégagée excepté à 12 heures où ils dégagent un peu plus de chaleur suite à la légère accélération d'hydratation observée à la Figure 3-18.

3.7.2 Temps de prise, ...

Le Tableau 3-19 reprend les caractéristiques physico-mécaniques des ciments à base du filler impur en comparaison avec les ciments à base de filler pur. Les temps de prise sont également illustrés à la Figure 3-19.

		Consistance (%)	Début de prise (min)	Fin de prise (min)	Stabilité Le Châtelier (mm)
30V 65K 5L	CEM 1 v2-FI	29.0	185	225	0.0
30V 45K 25L	CEM 3 v2-FI	29.0	205	315	1.0
30V 35K 35L	CEM 12 v2-FI	28.5	175	270	0.0
20V 50K 30L	CEM 6 v2-FI	29.0	165	255	0.0
10V 55K 35L	CEM 10 v2-FI	29.0	225	300	0.5

Tableau 3-19 – Comparaison des caractéristiques physico-mécaniques sur pâte de ciment des ciments à base de filler pur et impur (rouge : valeur maximale ; bleu : valeur minimale)

Les Tableau 3-15 et Tableau 3-19 montre qu'il n'y a pas de différence significative de la consistance entre les ciments à base de filler pur et les ciments à base de filler impur. D'autre part, le filler impur ne provoque pas de problème d'expansion comme le montrent les résultats de stabilité Le Châtelier.

Au niveau des temps de prise, il n'y a pas de tendance constante.

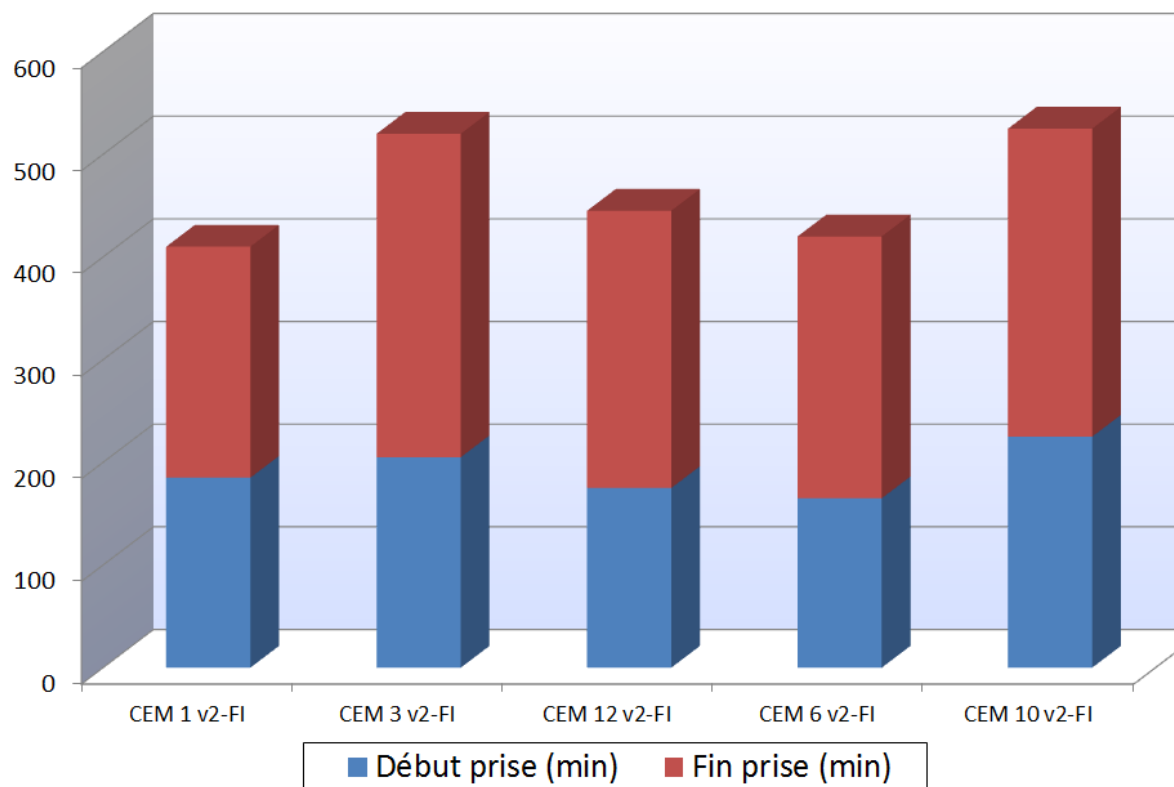


Figure 3-19 – Comparaison des temps de prise des ciments contenant le filler impur avec les ciments correspondant à base de filler pur

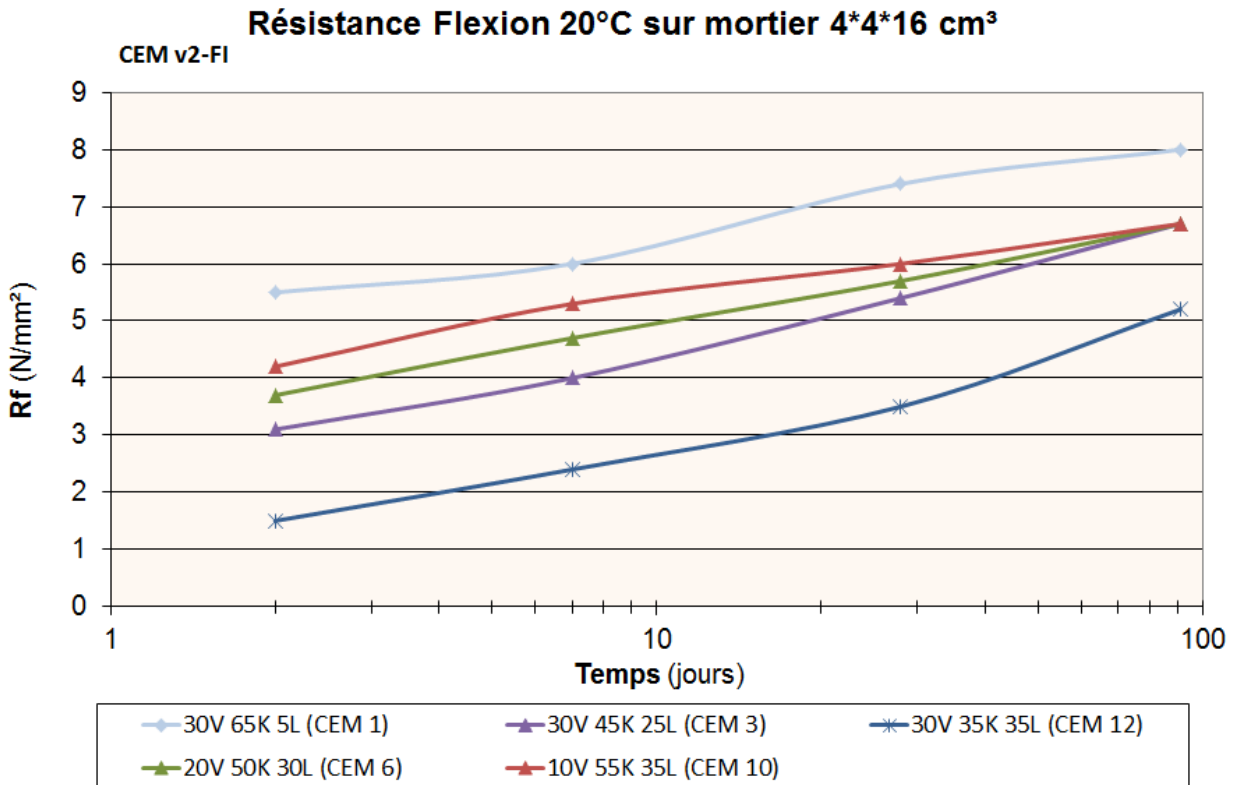
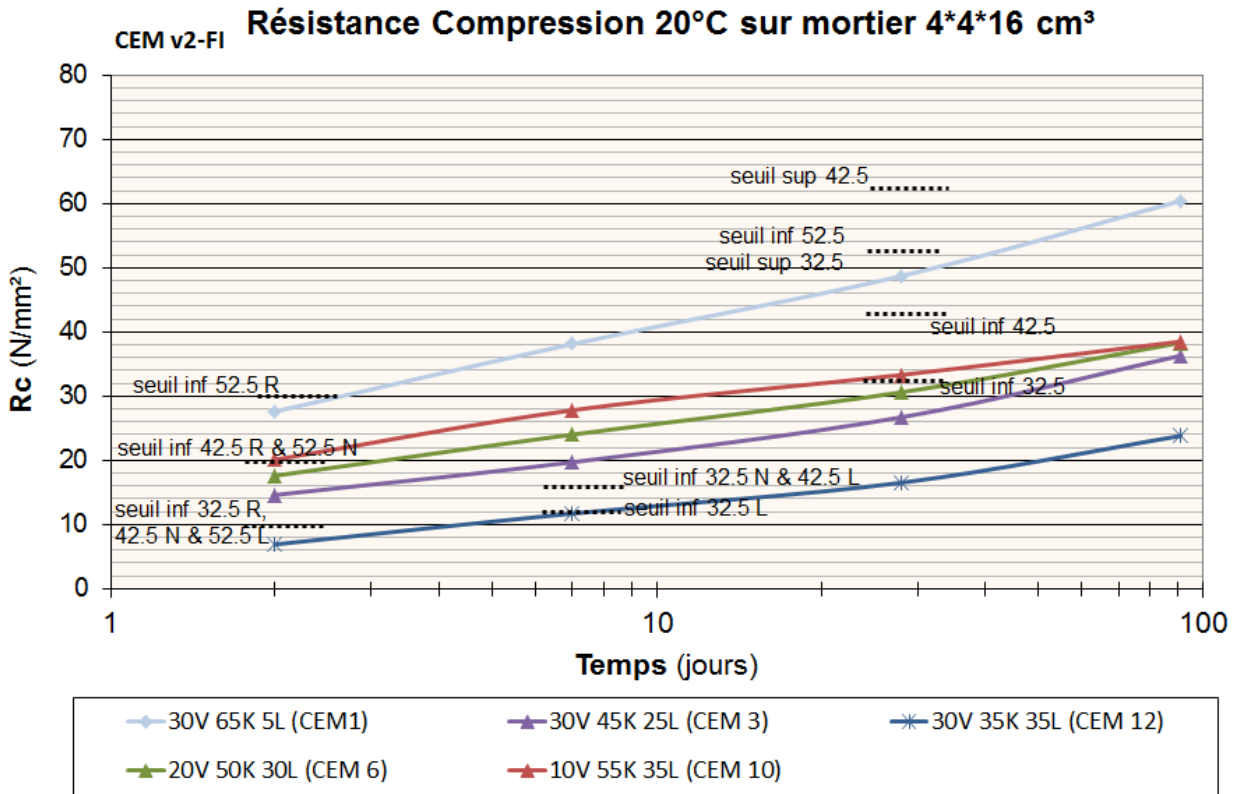
Les deux ciments qui font prise le plus lentement sont les CEM 3 v2-FI (30V 45K 25L) et CEM 10 v2-FI (10V 55K 35L). On ne voit pas de nette tendance liée à la présence de cendre volante et/ou de filler.

3.7.3 Résistances mécaniques

Les résistances mécaniques déterminées sur mortier des ciments à base de filler impur sont illustrées aux Figure 3-20 et Figure 3-21.

Les résistances à la compression et à la flexion des CEM 3 v2-FI, CEM 6 v2-FI et CEM 10 v2-FI deviennent similaires à 91 jours. A jeune âge, la composition CEM 10 est plus résistante, suivie par le CEM 6 puis par le CEM 3. Cela met bien en évidence l'action bénéfique à longue échéance de la cendre volante.

Le CEM 1 v2-FI, qui est riche en cendre et pauvre en filler, reste le plus résistant aux quatre échéances et le CEM 12 v2-FI, qui est riche en filler et cendre volante, est le moins résistant.



20°C			30V 65K 5L	30V 45K 25L	30V 35K 35L	20V 50K 30L	10V 55K 35L
Rc		jours	CEM 1	CEM 3	CEM 12	CEM 6	CEM 10
(N/mm ²)	CEM v2-FP	2	28.0	14.8	7.2	18.7	21.8
	CEM v2-FI		27.6	14.6	6.9	17.6	20.1
	Différence		-0.4	-0.2	-0.3	-1.1	-1.7
	CEM v2-FP	7	39.7	22.0	12.5	25.8	30.4
	CEM v2-FI		38.1	19.7	11.7	24.0	27.8
	Différence		-1.6	-2.3	-0.8	-1.8	-2.6
	CEM v2-FP	28	53.4	29.3	18.4	33.9	37.5
	CEM v2-FI		48.7	26.7	16.5	30.6	33.3
	Différence		-4.7	-2.6	-1.9	-3.3	-4.2
	CEM v2-FP	91	65.9	42.7	27.4	42.9	42.9
	CEM v2-FI		60.4	36.3	23.8	38.3	38.5
	Différence		-5.5	-6.4	-3.6	-4.6	-4.4
Rf		jours	CEM 1	CEM 3	CEM 12	CEM 6	CEM 10
(N/mm ²)	CEM v2-FP	2	5.5	3.2	1.6	3.7	4.6
	CEM v2-FI		5.5	3.1	1.5	3.7	4.2
	Différence		0.0	-0.1	-0.1	0.0	-0.4
	CEM v2-FP	7	7.1	4.3	2.7	5.1	5.7
	CEM v2-FI		6.0	4.0	2.4	4.7	5.3
	Différence		-1.1	-0.3	-0.3	-0.4	-0.4
	CEM v2-FP	28	7.8	5.5	4.1	6.3	6.3
	CEM v2-FI		7.4	5.4	3.5	5.7	6.0
	Différence		-0.4	-0.1	-0.6	-0.6	-0.3
	CEM v2-FP	91	8.4	7.5	6.1	7.5	7.4
	CEM v2-FI		8.0	6.7	5.2	6.7	6.7
	Différence		-0.4	-0.8	-0.9	-0.8	-0.7

Tableau 3-20 – Comparatif des résistances mécaniques des ciments à base de filler impur par rapport aux ciments à base de filler pur

Le Tableau 3-20 montre qu'il n'y a pas de différences significatives des résistances à la flexion entre les ciments à base du filler impur et ceux à base du filler pur. Concernant les résistances à la compression, il y a une tendance à une diminution des résistances particulièrement à 28 et 91 jours.

Le développement des résistances de ces ciments suit les mêmes tendances que les ciments à base de filler pur (Figure 3-20, Figure 3-21, Figure 3-16 et Figure 3-17).

Le Tableau 3-21 donne les classes de résistances auxquelles appartiennent les ciments à base de filler impur.

	Classe de résistance					
	32,5 N	32,5 R	42,5 N	42,5 R	52,5 N	52,5 R
CEM 1 v2 (30V 65K 5L)	X	X	X	X	—	—
CEM 3 v2 (30V 45K 25L)	—	—	—	—	—	—
CEM 6 v2 (20V 50K 30L)	—	—	—	—	—	—
CEM 10 v2 (10V 55K 35L)	X	X	—	—	—	—
CEM 12 v2 (30V 35K 35L)	—	—	—	—	—	—

Tableau 3-21 – Classes de résistance des douze ciments de laboratoire à base de la CV2-FI

En comparaison aux ciments à base de filler pur (Tableau 3-17), le CEM 1 v2-FI n’atteint plus le seuil inférieur des 52,5 et le CEM 6 ne répond plus à aucun critère.

3.8 Conclusions

Sur base des résistances à la compression obtenues sur les mortiers à base des douze nouveaux ciments ternaires étudiés dans le cadre de CEMCALC II, des teneurs en filler calcaire maximales acceptables ont été définies (Tableau 3-22). Nous constatons que la somme des teneurs en addition - cendres volantes et filler calcaire dans ce cas-ci – dépassent le seuil maximal de 35% actuellement de vigueur dans la norme EN 197-1 (ii).

Pour une teneur en cendres volantes de (%)		Teneur en filler calcaire maximale acceptable (%)		Quantité totale d'addition (%)	Ciment correspondant
30 V	⇒	15 L	=	45	CEM 2
20 V	⇒	30 L	=	50	CEM 6 (ne passe pas pour CV1)
10 V	⇒	35 L	=	45	CEM 10

Tableau 3-22 – Teneurs en filler calcaire maximales acceptables pour une teneur en cendres volantes donnée définies sur base des résistances à la compression obtenues sur mortier avec les nouveaux ciments ternaires CEMCALC II

4 Tâche 4: Etude de l'activation chimique des ciments

4.1 Méthodologie

La préparation des éprouvettes de mortier a été réalisée sur base de la norme NBN 196-1 [xxi], avec, toutefois, certains écarts.

En effet, la NBN 196-1 [xxi] prévoit de mélanger 450 gr de ciment avec 1250 gr de sable normalisé et 225 gr d'eau. La présence d'additif (comme un activateur) n'est donc pas prévue. Afin d'avoir un maximum d'homogénéité et de réactivité entre le ciment et l'activateur, il a été décidé que ce dernier serait incorporé, dans la mesure du possible, dans l'eau de gâchage (eau déminéralisée).

Trois activateurs chimiques ont, à ce jour, été étudiés : un sulfate (CaSO_4), un alcali (NaOH) et un hybride (Na_2SO_4). Alors que les deux derniers composés se solubilisent assez aisément, l'anhydrite, quant à elle, est assez peu soluble. La présence de diverses proportions de Na_2SO_4 ou NaOH dans l'eau de gâchage change la densité de la solution. Il a donc été décidé de travailler sur 225 ml de liquide (volume) et non sur 225 gr de liquide (masse). Il est important de se rendre compte que le rapport E/C en sera donc changé.

Dans le cas du Na_2SO_4 , 3 solutions ont été réalisées. La concentration de chacune de ces solutions a été calculée de manière à avoir 1, 3 et 5 % en masse d'activateur (p.r. au ciment) dans 225 ml de solution.

Pour NaOH , une seule solution de 8 molaires a été réalisée. Afin d'obtenir 15 % de NaOH , on prélève 15 % en masse de cette solution de NaOH dans une burette graduée. De l'eau déminéralisée est ensuite ajoutée jusqu'à 225 ml.

L'anhydrite CaSO_4 , en raison de sa trop lente et faible solubilité, a été ajoutée sous forme de poudre. Dans ce cas précis, on a procédé à un mélange manuel à la spatule du ciment et de l'activateur (avant l'ajout du sable normalisé), afin de permettre au maximum une bonne réactivité entre deux composants.

Le deuxième écart à la norme est la conservation des éprouvettes. La NBN 196-1 [xxi] prévoit la résidence des éprouvettes, pendant leur temps de maturation, dans un bac d'eau avec toujours au moins 5 mm d'eau autour de l'éprouvette ($T = 20,0 \pm 1,0^\circ\text{C}$). Toutefois, afin de ne pas créer un gradient de concentration entre l'éprouvette de mortier et le milieu aqueux, ce qui risquerait d'entraîner une migration des éléments chimiques (dont l'activateur) vers le milieu aqueux, il a été décidé de ne pas conserver les éprouvettes dans l'eau. Les éprouvettes sont donc conservées dans la chambre humide, sous une caisse retournée, afin de ne pas mettre en contact direct ces éprouvettes et les jets d'eau permettant de maintenir la chambre à plus de 90 % d'humidité relative.

4.2 Introduction

Bien que favorable à l'environnement, le remplacement partiel du clinker par des cendres volantes entraîne une diminution des résistances mécaniques initiales des bétons. Cela est dû à la réaction pouzzolanique tardive des cendres volantes qui s'opère suite à la libération des hydroxydes de calcium $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$ lors de la réaction d'hydratation du clinker.

Afin de croître cette résistance mécanique aux jeunes âges, une activation des cendres volantes est donc nécessaire. La littérature recense différentes manières menant à l'activation de ces composés : chimique, physique, thermique et mécanique. Ainsi, l'utilisation des fillers calcaires dans les ciments permet, du moins en partie, de compenser ce phénomène. En effet, la présence de fines particules de calcaire tend à multiplier le nombre de sites de nucléation préférentiels (activation physique). Cela a pour effet d'accélérer la vitesse d'hydratation du clinker et, par conséquent, la production des $\text{Ca}(\text{OH})_2$ nécessaires à la réaction pouzzolanique des cendres volantes.

L'étude menée lors de la présente biennale a porté exclusivement sur l'activation chimique des cendres volantes. La littérature nous apprend que cette activation est souvent alcaline et/ou sulfatique. On recense également l'utilisation de chlorures (ex : CaCl_2) comme activateur chimique. Toutefois, l'incorporation de ce type de composés dans les bétons ne sera pas étudiée ici, en raison des dommages que cet anion pourrait engendrer dans une hypothétique utilisation de ces nouveaux ciments dans la production de béton armé.

De nombreux auteurs ont essayé de comprendre les mécanismes permettant d'activer les cendres volantes. Ceux-ci, comme par exemple Quian *et al.*¹, Poon *et al.*² et Shi *et al.*³, s'accordent sur le fait que :

- Le milieu **alcalin** induit une augmentation du pH, ce qui accélère la décomposition, entre autre, de la phase vitreuse aluminosilicatée des cendres volantes.
- La disponibilité des **sulfates** pour réagir avec les oxydes d'aluminium (provenant de la phase vitreuse des cendres volantes) permet la production de plus d'ettringite, ce qui entraîne donc l'augmentation de la résistance aux jeunes âges.

4.3 Phase 1

4.3.1 Choix des matériaux (activateurs et ciments ternaires)

Comme relaté précédemment, une étude bibliographique préliminaire a montré que les composés les plus utilisés pour activer chimiquement des cendres volantes sont de trois types : alcalins, sulfates et hybrides (alcali-sulfates). Il va de soi que l'incorporation de sulfates ou encore d'alcalis dans les ciments ternaires devrait également faire l'objet d'études ultérieures de durabilité.

¹ Quian, J., Shi, C. and Wang, Z. (2001): Activation of blended cements containing fly ash. *Cement and Concrete Research*, 31, 1121-1127.

² Poon, C.S., Kou, S.C., Lam, L. and Lin, Z.S. (2001): Activation of fly ash/cement systems using calcium sulfate anhydrite (CaSO_4). *Cement and Concrete Research*, 31, 873-881.

³ Shi, C. and Day, R.L. (1995): Acceleration of the reactivity of fly ash by chemical activation. *Cement and Concrete Research*, 25(1), 15-21.

Le Tableau 4-1 résume le choix des activateurs ainsi que les concentrations étudiées dans cette première phase, sur base de la recherche bibliographique.

Type d'activateur	Concentrations [% en masse de ciment]
CaSO ₄ (sulfate)	0 – 7 – 10 et 13
Na ₂ SO ₄ (hybride)	0 – 1 – 3 et 5
NaOH (8M - alcalin)	0 – 15 – 20 et 25

Tableau 4-1 – Activateurs et concentrations sélectionnés dans le cadre de l'étude de l'activation chimique des cendre volantes (CEM CALC-2)

Deux ciments ternaires, obtenus dans le cadre de cette recherche (Tableau 4-2), ont été étudiés. Ils ont été sélectionnés en raison de leur teneur élevée en cendres volantes (30 %) et différent par leur proportion en clinker et en fillers calcaires.

	CEM1v2	CEM12v2
Cendres volantes [%]	30	30
Clinker [%]	65	35
Filler calcaire [%]	5	35
Référence CRIC	I/73548	I/73559

Tableau 4-2 – Ciments sélectionnés pour l'étude préliminaire (phase 1)

4.3.2 Confection des éprouvettes de mortier

La préparation des éprouvettes de mortier a été réalisée sur base de la norme NBN 196-1⁴, avec, toutefois, certaines adaptations. En effet, la NBN 196-1 prévoit de mélanger 450 g de ciment avec 1350 g de sable normalisé et 225 g d'eau (E/C = 0,5). La présence d'additif (comme un activateur) n'est donc pas prévue. Conformément à ce qu'il est relaté dans la littérature : afin d'obtenir une bonne homogénéité du mélange et de favoriser la réactivité entre le ciment et l'activateur, ce dernier a été incorporé, dans la mesure du possible, dans l'eau de gâchage (eau de distribution).

Alors que NaOH et Na₂SO₄ se solubilisent aisément, l'anhydrite, quant à elle, est assez peu soluble. Comme la présence de diverses proportions de Na₂SO₄ ou NaOH dans l'eau de gâchage change la densité de la solution, il a été décidé de travailler sur 225 ml de liquide (volume) et non sur 225 g de liquide (masse) changeant donc le rapport E/C (en masse). Cette approche sera modifiée par la suite (phase 2).

Dans le cas du Na₂SO₄, 3 solutions de concentrations différentes ont été réalisées : pour avoir 1, 3 et 5 % en masse d'activateur (p.r. au ciment) dans 225 ml de solution. Pour le NaOH, c'est une seule solution 8 molaires qui est utilisée. Afin d'obtenir, par exemple, 15 % de NaOH, on prélève 15 % en masse de cette solution de NaOH (8M) dans une burette graduée. De l'eau déminéralisée est ensuite ajoutée jusqu'à 225 ml. Il est important de noter que les mortiers réalisés via cette méthode sont d'un aspect très sec. Cela est dû au rapport E/C (en masse) très faible. L'anhydrite CaSO₄, en raison de sa trop lente et faible solubilité, a été ajoutée sous forme de poudre. Dans ce cas précis, on a procédé, avec une

⁴ NBN EN 196-1 (2005) : Méthodes d'essais des ciments – Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques, 35p.

spatule, à un mélange manuel du ciment et de l'activateur (avant l'ajout du sable normalisé), afin d'obtenir un mélange homogène.

Les mélanges ainsi confectionnés ont été coulés dans des moules de dimensions : 4*4*16 cm³.

Le deuxième écart à la norme est le mode de conservation des éprouvettes. La NBN 196-1 prévoit le stockage des éprouvettes dans l'eau (T = 20,0 ± 1,0°C). Toutefois, afin de ne pas créer un gradient de concentration entre l'éprouvette de mortier et le milieu aqueux, ce qui risquerait d'entraîner une migration des éléments chimiques (dont l'activateur) vers le milieu aqueux, il a été décidé de ne pas conserver les éprouvettes dans l'eau. Les éprouvettes sont donc conservées dans la chambre humide (T = 20,0 ± 0,1°C ; humidité relative ≥ 90%), sous une caisse retournée, afin de ne pas mettre en contact direct ces éprouvettes et les jets d'eau permettant de maintenir la chambre à plus de 90 % d'humidité relative.

Le Tableau 4-3 reprend le type de ciment ainsi que le pourcentage d'activateur utilisé dans la confection de mortiers : 20 mélanges ont été confectionnés pour être évalués (flexion et compression) à 2, 7, 28 et 91 jours. Seuls les mélanges à base de NaOH n'ont pas été testés à 2 jours en raison de leurs trop mauvais résultats.

Mortier N°	Type de ciment	Teneur en activateur [%masse]	Temps de maturation [j]
Mix 01	CEM1	-	2 - 7 - 28 - 91
Mix 02	CEM12	-	2 - 7 - 28 - 91
Mix 1	CEM1	CaSO ₄ (7 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 2	CEM1	CaSO ₄ (10 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 3	CEM1	CaSO ₄ (13 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 4	CEM1	Na ₂ SO ₄ (1 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 5	CEM1	Na ₂ SO ₄ (3 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 6	CEM1	Na ₂ SO ₄ (5 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 7	CEM1	NaOH (8M - 15 %)	7 - 28 - 91
Mix 8	CEM1	NaOH (8M - 20 %)	7 - 28 - 91
Mix 9	CEM1	NaOH (8M - 25 %)	7 - 28 - 91
Mix 10	CEM12	CaSO ₄ (7 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 11	CEM12	CaSO ₄ (10 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 12	CEM12	CaSO ₄ (13 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 13	CEM12	Na ₂ SO ₄ (1 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 14	CEM12	Na ₂ SO ₄ (3 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 15	CEM12	Na ₂ SO ₄ (5 %)	2 - 7 - 28 - 91
Mix 16	CEM12	NaOH (8M - 15 %)	7 - 28 - 91
Mix 17	CEM12	NaOH (8M - 20 %)	7 - 28 - 91
Mix 18	CEM12	NaOH (8M - 25 %)	7 - 28 - 91

Tableau 4-3 – Mortiers réalisés pour l'étude de l'activation chimique des cendres volantes

4.3.3 Mesures de flexion et compression

Les mesures de flexion-compression ont été réalisées à l'aide d'une machine INSTRON 5585. L'âge des éprouvettes testées est de :

- 48 h \pm 30 min
- 7 jours \pm 2 h
- \geq 28 jours \pm 8 h
- 91 jours \pm 8 h

4.3.4 Interprétation des résultats

Après conservation en chambre humide, sans immersion, pendant 2, 7, 28 et 91 jours, les résistances mécaniques en flexion et compression des échantillons ont été mesurées. Les Tableau 4-4 à Tableau 4-7 reprennent les moyennes des mesures de résistances en flexion-compression, ainsi que les écarts-types, en fonction des temps de maturation.

Les Figure 4-1 et Figure 4-2 montrent l'évolution des résistances en compression, en fonction du temps, pour un même ciment et un même activateur, présent en diverses proportions.

Mortier N°	Temps de maturation	Résistance en flexion moyenne (écart-type)	Résistance en compression moyenne (écart-type)
	[j]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Mix 01 (CEM1)	2	5,8 (0,3)	28,8 (0,2)
	7	6,6 (0,3)	40,4 (0,9)
	28	8,5 (0,2)	58,2 (0,8)
	91	10,1 (0,2)	72,9 (1,7)
Mix 02 (CEM12)	2	1,92 (0,02)	8,4 (0,1)
	7	3,58 (0,09)	14,9 (0,5)
	28	5,6 (0,2)	23,2 (0,6)
	91	7,6 (0,2)	34,2 (0,5)

Tableau 4-4 – Résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers sans activateur

Mortier N°	Temps de maturation	Résistance en flexion moyenne (écart-type)	Résistance en compression moyenne (écart-type)
	[j]	[N/mm ²]	[N/mm ²]
Mix 1 (CEM1 + 7% CaSO ₄)	2	3,7 (0,2)	21,8 (0,7)
	7	3,8 (0,4)	29,1 (0,5)
	28	7,1 (0,5)	54,3 (1,1)
	91	10,1 (0,8)	67,7 (3,5)
Mix 2 (CEM1 + 10% CaSO ₄)	2	3,5 (0,2)	18,8 (1,5)
	7	3,9 (0,2)	26,6 (0,5)
	28	5,1 (0,4)	42,4 (0,5)
	91	8,6 (0,3)	67,9 (2,1)
Mix 3 (CEM1 + 13% CaSO ₄)	2	2,8 (0,2)	15,0 (1,2)
	7	3,7 (0,3)	27,2 (0,7)
	28	4,76 (0,04)	41,6 (1,4)
	91	7,3 (0,4)	55,7 (3,1)
Mix 10 (CEM12 + 7% CaSO ₄)	2	1,6 (0,1)	7,3 (0,3)
	7	2,0 (0,1)	10,4 (0,2)
	28	2,9 (0,2)	17,4 (0,4)
	91	6,9 (0,5)	37,8 (1,9)
Mix 11 (CEM12 + 10% CaSO ₄)	2	1,5 (0,1)	7,2 (0,3)
	7	2,1 (0,2)	10,1 (0,1)
	28	3,0 (0,2)	17,4 (0,2)
	91	5,2 (0,4)	33,5 (0,6)
Mix 12 (CEM12 + 13% CaSO ₄)	2	1,43 (0,08)	6,6 (0,4)
	7	1,98 (0,06)	10,5 (0,2)
	28	2,7 (0,2)	16,3 (0,3)
	91	4,0 (0,1)	31,2 (0,8)

Tableau 4-5 – Résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers réalisés avec CaSO₄

Mortier N°	Temps de maturation [j]	Flexion (écart-type)	Compression (écart-type)
		[N/mm ²]	[N/mm ²]
Mix 7 (CEM1 + 15% NaOH)	7	5,5 (0,1)	20,4 (0,6)
	28	6,9 (0,2)	31,3 (0,6)
	91	8,5 (0,3)	44,0 (1,4)
Mix 8 (CEM1 + 20% NaOH)	7	5,1 (0,2)	16,7 (0,9)
	28	6,2 (0,3)	28,2 (0,3)
	91	7,5 (0,5)	40,3 (0,6)
Mix 9 (CEM1 + 25% NaOH)	7	4,2 (0,3)	14,3 (0,6)
	28	5,8 (0,1)	27,9 (0,5)
	91	6,7 (0,4)	40,1 (0,8)
Mix 16 (CEM12 + 15% NaOH)	7	3,7 (0,4)	11,7 (0,7)
	28	6,0 (0,4)	21,1 (0,4)
	91	5,7 (0,3)	25,4 (0,4)
Mix 17 (CEM12 + 20% NaOH)	7	3,4 (0,2)	9,6 (0,4)
	28	4,9 (0,4)	18,9 (0,2)
	91	4,9 (0,2)	23,3 (0,4)
Mix 18 (CEM12 + 25% NaOH)	7	3,2 (0,2)	8,8 (0,2)
	28	4,2 (0,3)	18,5 (0,3)
	91	4,15 (0,09)	24,0 (0,4)

Tableau 4-6 – Résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers réalisés avec NaOH (8M)

Mortier N°	Temps de maturation [j]	Résistance en flexion moyenne Rf (écart-type) [N/mm ²]	Résistance en compression moyenne Rc (écart-type) [N/mm ²]	Différence entre Rc activateur et Rc sans activateur
Mix 4 (CEM1 + 1% Na ₂ SO ₄)	2	6,3 (0,5)	32,3 (0,6)	3,5
	7	6,9 (0,4)	40,6 (0,6)	0,2
	28	9,0 (0,6)	55,5 (0,7)	- 2,7
	91	10,9 (0,5)	69,9 (1,0)	- 3
Mix 5 (CEM1 + 3% Na ₂ SO ₄)	2	6,4 (0,2)	33,1 (0,4)	4,3
	7	7,5 (0,2)	41,6 (0,8)	1,2
	28	10,0 (0,4)	57,6 (1,5)	- 0,6
	91	11,6 (0,3)	73,0 (0,9)	0,1
Mix 6 (CEM1 + 5% Na ₂ SO ₄)	2	6,5 (0,5)	31,6 (0,7)	2,8
	7	7,47 (0,09)	41,3 (0,9)	0,9
	28	9,89 (0,08)	59,9 (1,3)	1,7
	91	11,2 (0,5)	71,9 (0,7)	- 1,0
Mix 13 (CEM12 + 1% Na ₂ SO ₄)	2	1,76 (0,06)	7,3 (0,7)	- 1,1
	7	3,97 (0,09)	17,2 (0,5)	2,3
	28	7,0 (0,1)	26,0 (0,4)	2,8
	91	7,8 (0,4)	35,7 (0,6)	1,5
Mix 14 (CEM12 + 3% Na ₂ SO ₄)	2	2,1 (0,1)	10,6 (0,3)	2,2
	7	4,4 (0,1)	19,5 (0,4)	4,6
	28	7,4 (0,2)	30,2 (0,5)	7,0
	91	7,6 (0,3)	37,8 (0,8)	3,6
Mix 15 (CEM12 + 5% Na ₂ SO ₄)	2	1,95 (0,09)	9,5 (0,6)	1,1
	7	4,3 (0,2)	19,0 (0,4)	4,1
	28	7,49 (0,00)	32,6 (0,4)	9,4
	91	7,6 (0,4)	39,2 (0,7)	5,0

Tableau 4-7 – Résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers réalisés avec Na₂SO₄

4.3.5 Différence d'activation entre les ciments CEM1 et CEM12

On peut noter que les résistances en compression des barrettes de mortier sont nettement plus élevées pour le ciment ternaire CEM 1 que pour le CEM 12. Les valeurs de compression sont respectivement comprises entre 28,8 N/mm² (2 jours) et 72,9 N/mm² (91 jours) ; et entre 8,4 N/mm² (2 jours) et 34,2 N/mm² (91 jours). Une tendance similaire a également été observée lors de cette biennale par le CRIC (Figure 3-16). En effet, 5 formulations (dont CEM 12), parmi les plus pauvres en clinker, ne répondent pas aux critères de classes de résistances. Cela peut être expliqué par la proportion plus importante de fillers calcaires substitués au clinker dans le ciment CEM 12, d'où la nécessité particulière de pouvoir activer ce ciment et donc d'augmenter sa résistance mécanique.

On remarque néanmoins une différence plus faible entre les résistances des mortiers sans activateurs et ceux avec activateurs dans le cas de CEM12.

4.3.6 CaSO₄ et NaOH

L'activation des cendres volantes par le bais de l'anhydrite (CaSO₄) ou du NaOH donne de très mauvais résultats, surtout dans le cas de l'hydroxyde de sodium. La présence de ces activateurs engendre toujours des résistances mécaniques plus faibles que le ciment ternaire utilisé sans activateur, ce qui va à l'encontre du but recherché. Cependant, la diminution des résistances mécaniques avec l'augmentation de la concentration de CaSO₄

ou de NaOH, pour un même temps de maturation, laisse à penser que l'optimum est déjà passé.

Il est cependant important de tenir à l'esprit que l'incorporation de ces composés se fait différemment. Alors que CaSO_4 est incorporé, sous forme poudreuse, directement au ciment, l'hydroxyde de sodium est ajouté via l'eau de gâchage. Dans ce dernier cas, si la proportion volumique E/C est constante, le rapport massique diffère assez fortement et n'équivaut plus à 0,5, ce qui s'est fortement ressenti lors de la confection des éprouvettes.

De plus, l'action de ces composés est différente lorsqu'ils sont mélangés avec le ciment CEM 1 ou avec CEM 12. Par exemple, les mélanges réalisés avec CEM1 et NaOH (Figure 4-1) ont des résistances mécaniques nettement inférieures à celles obtenues avec le ciment seul. Les résistances des mélanges à base de CEM 12 et activateur (Figure 4-2) ne sont que légèrement inférieures à celles des ciments sans activateur. Dans le cas de CEM 12, une investigation plus approfondie, en changeant la teneur en NaOH (et en conservant un E/C = 0,5) serait donc à envisager, ce qui n'est pas le cas de CEM 1.

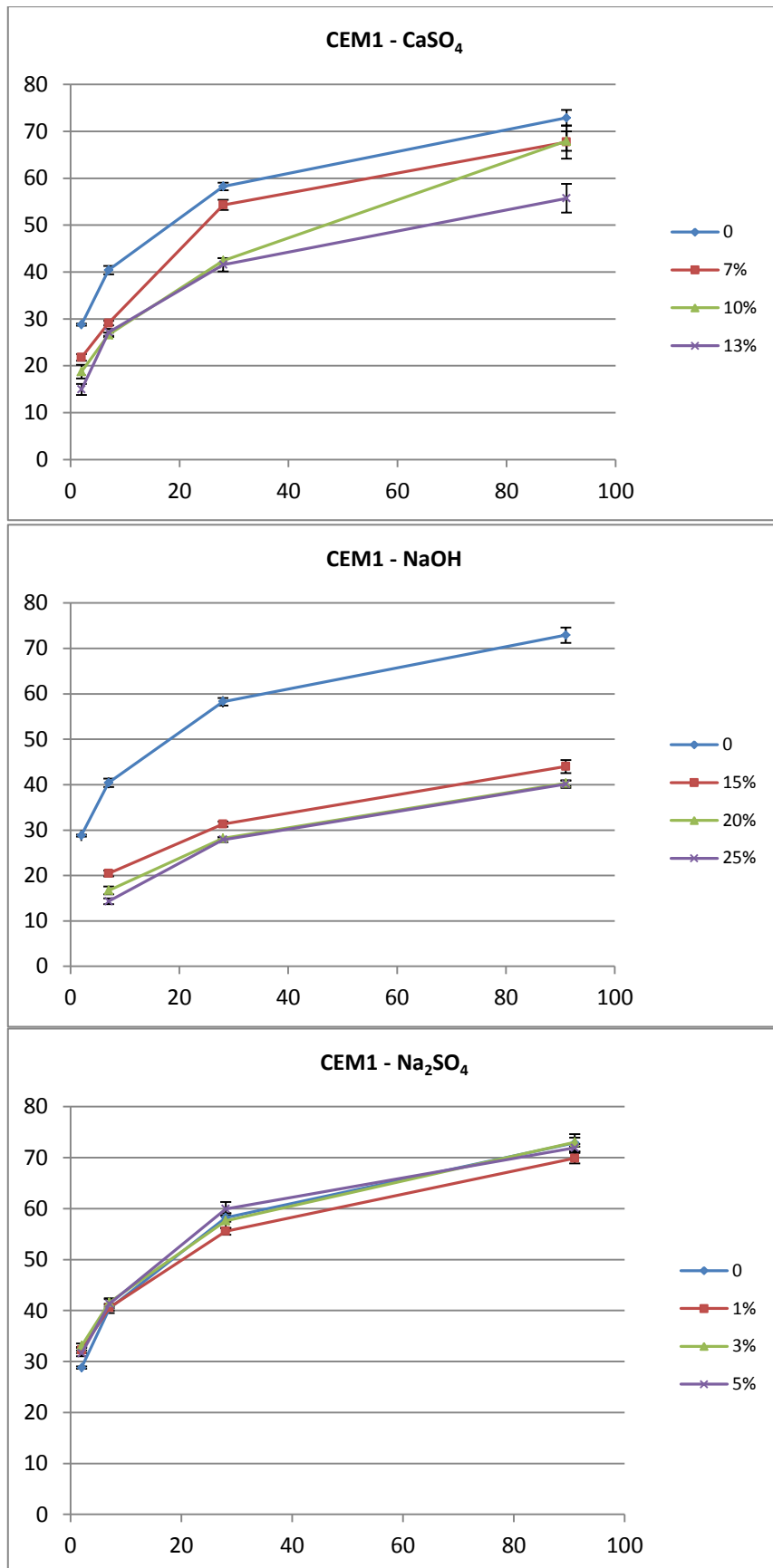


Figure 4-1 – Evolution de la résistance en compression en fonction du temps de maturation et des différents activateurs (CEM1) – abscisse (temps - jours) / ordonnée (compression – N/mm²)

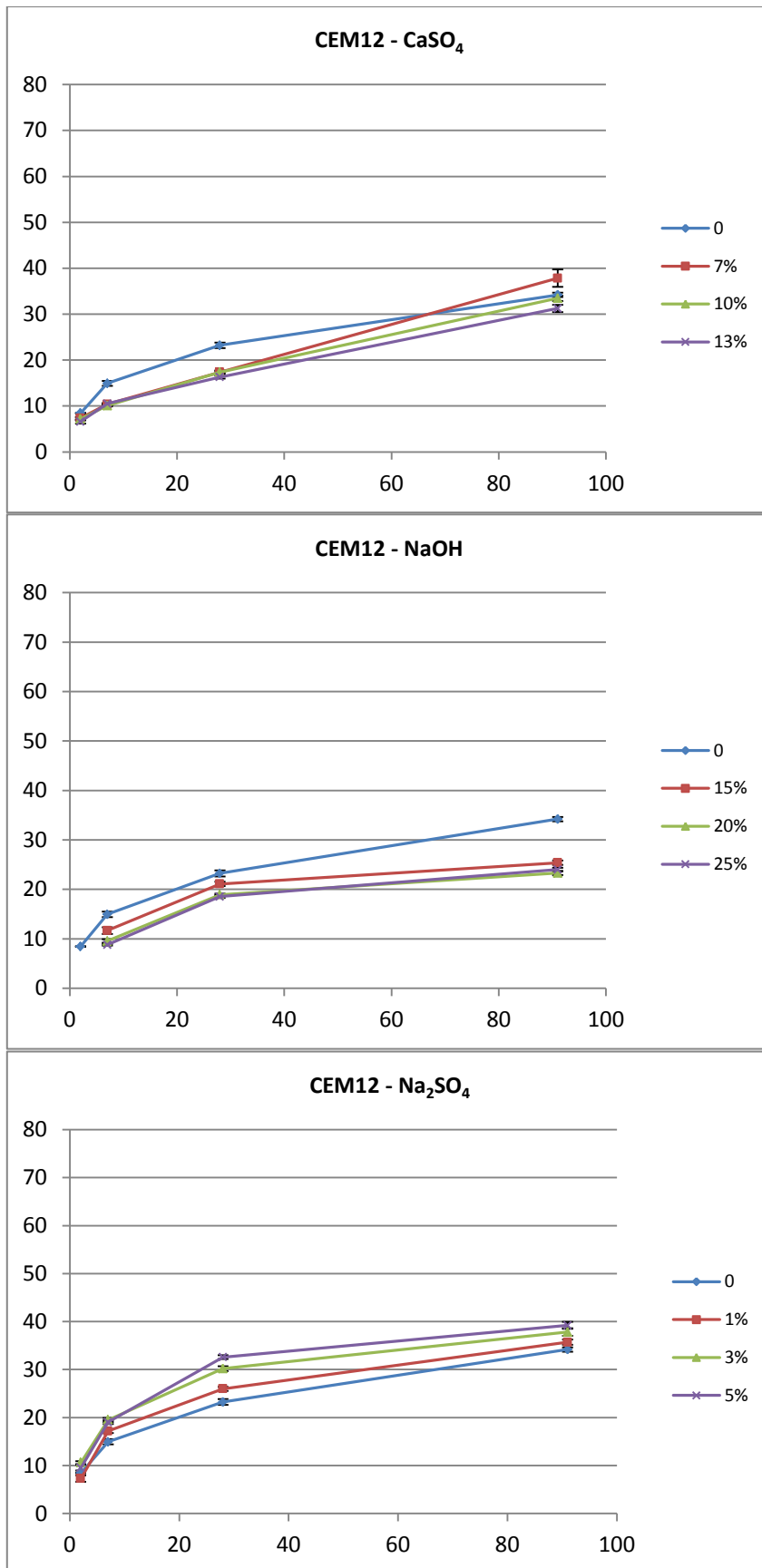


Figure 4-2 – Evolution de la résistance en compression en fonction du temps de maturation et des différents activateurs (CEM12) – abscisse (temps - jours) / ordonnée (compression – N/mm²)

4.3.7 Na₂SO₄

Le seul activateur donnant des résultats positifs est le sulfate de sodium. A l'inverse des deux précédents, l'augmentation de sa concentration engendre un accroissement des résistances mécaniques, ce qui implique que l'optimum en concentration n'est pas encore atteint. Il serait donc intéressant de réaliser d'autres mortiers contenant des teneurs plus importantes en Na₂SO₄. Toutefois, l'ajout d'un excès de sulfates peut également être préjudiciable pour la durabilité du matériau. Des études de durabilité devraient également être menées.

Enfin, à l'instar de ce qui se passait avec les autres composés, l'activation donne de meilleurs résultats sur les mortiers réalisés avec le CEM 12. En effet, on remarque que les barrettes obtenues en utilisant ce ciment et aucun activateur présentent des résistances mécaniques strictement plus basses que lorsque l'activateur est incorporé, et ce, dans les diverses proportions d'activateur et les différents temps de maturation (à l'exception de 1% Na₂SO₄ à 2 jours). On observe également que c'est à 28 jours que l'activation est la plus importante. En effet, les différences de résistances mécaniques sont alors comprises entre 2,8 (pour 3% de Na₂SO₄) et 9,4 N/mm² (pour 5% de Na₂SO₄). A l'inverse, si on considère les mortiers réalisés avec CEM 1, leurs résistances mécaniques ne sont significativement plus hautes, pour toutes les teneurs en activateur, qu'à 2 jours de maturation. Ces différences de valeurs sont comprises entre 2,8 (pour 5% de Na₂SO₄), et 4,3 N/mm² (pour 3% de Na₂SO₄). Tous les autres essais (avec CEM 1) avec activateur dont les résistances sont plus hautes que sans activateur ont des valeurs qui ne sont pas significatives.

4.4 Phase 2

4.4.1 Protocole expérimental

Les analyses ont été complétées, dans un second temps et à titre de comparaison, par des essais réalisés sur des ciments ternaires provenant de la recherche CEMCALC 1 et par un ciment à base de cendres volantes (CEM 6) et contenant moins de fillers calcaires (Tableau 4-8).

	CEMCALC 1			CEMCALC 2		
	CEM1	CEM6	CEM12	CEM1	CEM6	CEM12
Laitier	30	20	30	-	-	-
Cendres volantes [%]	-	-	-	30	20	30
Clinker [%]	65	50	35	65	50	35
Filler calcaire [%]	5	30	35	5	30	35

Tableau 4-8 – Ciments sélectionnés pour l'étude

La préparation des éprouvettes de mortier est réalisée comme décrit dans le chapitre 4.2 Seul l'activateur Na₂SO₄ a été étudié. Contrairement au protocole de la phase 1, il a été ajouté (et non substitué en volume à l'eau de gâchage) de manière à travailler à E/C constant. Ces taux d'addition (1 et 3% en masse de ciment) ont été sélectionnés sur base des résultats obtenus lors de la phase I, mais aussi en tenant compte du fait qu'il est nécessaire de limiter les teneurs en sulfates et alcalis dans les bétons, de façon à réduire les risques de réactions sulfatiques internes ou de RAG. La mesure des propriétés mécaniques

des mélanges (flexion et compression) a été réalisée après 2, 7, 28 et 91 jours de conservation en chambre humide.

4.4.2 Résultats des essais sans activation

Le Tableau 4-9 reprend les moyennes des mesures de résistances en flexion (Rf) et en compression (Rc), ainsi que les écarts-types, en fonction des temps de maturation.

Type de ciment	Temps de maturation [j]	Contrainte maximum			
		Rf [MPa]	Ecart type	Rc [MPa]	Ecart type
CEM1 [30V 65K 5L]	2	5,78	0,40	28,54	0,91
	7	7,56	0,40	40,10	3,10
	28	8,84	0,70	55,07	0,88
	91	9,53	1,20	63,73	2,39
CEM6 [20V 50K 30L]	2	4,04	0,40	19,65	0,19
	7	5,89	0,20	26,64	0,40
	28	7,24	0,50	34,36	0,57
	91	8,60	0,10	43,84	0,60
CEM12 [30V 35K 35L]	2	1,51	0,10	6,67	0,08
	7	3,23	0,10	12,34	0,23
	28	4,76	0,10	18,34	2,94
	91	7,27	0,10	29,40	0,84

Tableau 4-9 – Résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 2

4.4.3 Analyse des résultats concernant les ciments provenant de CEMCALC 1

Le Tableau 4-10 présente les résultats de la résistance en flexion et en compression des mortiers à base de ciments ternaires contenant du laitier de haut-fourneau activés au Na_2SO_4 . Sur base des résultats obtenus dans le cadre de la recherche CEMCALC I (rapport scientifique final), le ciment CEM 12, qui contient plus de fillers calcaires et moins de clinker, offre déjà des résistances moindres que les deux autres ciments sans activant.

Ciment	Temps de maturation [j]	Contrainte maximum			
		Rf [MPa]	Ecart type	Rc [MPa]	Ecart type
CEM1 [30S 65K 5L] + 1% Na ₂ SO ₄	2	5,38	0,20	23,47	0,43
	7	7,79	0,30	38,42	0,90
	28	7,95	0,00	45,13	0,71
	91	7,91	0,20	50,15	1,05
CEM1 [30S 65K 5L] + 3% Na ₂ SO ₄	2	5,75	0,30	27,17	0,50
	7	8,16	0,10	37,95	0,93
	28	8,25	0,20	40,88	1,16
	91	7,91	0,40	45,84	2,88
CEM6 [20S 50K 30L] + 1% Na ₂ SO ₄	2	5,24	0,30	23,62	0,39
	7	8,19	0,20	36,93	0,71
	28	9,27	0,50	45,70	0,58
	91	9,17	0,50	49,69	0,82
CEM6 [20S 50K 30L] + 3% Na ₂ SO ₄	2	6,39	0,20	25,90	0,59
	7	8,58	0,20	38,82	0,45
	28	9,32	0,10	45,99	0,51
	91	9,03	0,20	51,42	1,33
CEM12 [30S 35K 35L] + 1% Na ₂ SO ₄	2	3,84	0,70	14,56	0,89
	7	7,34	0,30	29,53	0,61
	28	7,71	0,40	35,13	0,56
	91	7,50	0,50	36,92	1,55
CEM12 [30S 35K 35L] + 3% Na ₂ SO ₄	2	4,69	0,10	18,50	0,20
	7	7,44	0,20	30,99	1,13
	28	7,70	0,20	34,26	1,00
	91	7,31	0,20	37,63	1,34

Tableau 4-10 – Résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 1 et un activateur Na₂SO₄

L'utilisation de l'activant ne change pas les conclusions : le CEM 12 reste moins réactif et offre des résistances moindres. Par contre, il semble que l'utilisation de Na₂SO₄ dans des proportions de 1%, permette au CEM 6 de rattraper le léger retard (Figure 4-3) qu'il avait par rapport au CEM 1 : les deux courbes d'évolution des résistances mécaniques deviennent pratiquement identiques, que ce soit à court, moyen ou long terme. Lorsque 3% sont ajoutés, les performances du CEM6 deviennent même meilleures que celles du CEM 1.

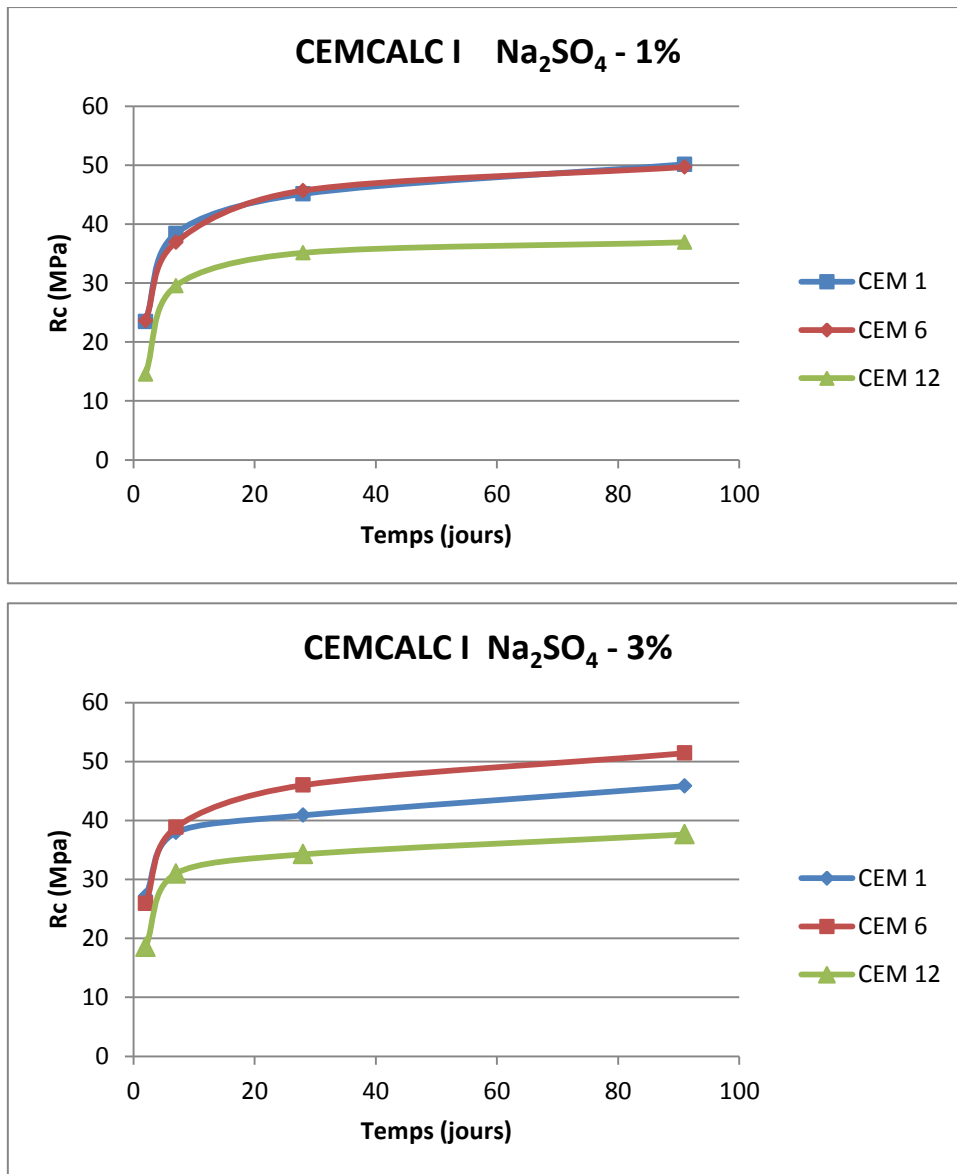


Figure 4-3– Résistances en compression des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 1 et un activateur Na₂SO₄

4.4.4 Analyse des résultats concernant les ciments provenant de CEMCALC 2

Le Tableau 4-11 présente les résultats de la résistance en flexion et en compression des mortiers à base de ciments ternaires à base de cendres volantes activés au Na₂SO₄. Sans activant, on observe que c'est le ciment ternaire CEM 1 qui offrent les résistances les plus élevées et le ciment CEM 12 les plus faibles (environ 50%) ; le ciment CEM 6 présente un comportement intermédiaire. Lorsque du Na₂SO₄ est ajouté (Figure 4-2 et Figure 4-3), que ce soit à raison de 1% ou de 3% en masse de ciment, la comparaison entre les ciments reste valable.

Type de Ciment	Temps de maturation [j]	Contrainte maximum				Différence entre Rc avec et sans activateur
		Rf [MPa]	Ecart type	Rc [MPa]	Ecart type	
CEM1 [30V 65K 5L] + 1% Na ₂ SO ₄	2	6,11	0,30	31,17	0,64	2,63
	7	7,27	0,70	39,29	1,41	-0,80
	28	9,51	0,40	52,40	1,89	-2,70
	91	10,30	0,30	63,53	0,62	-0,20
CEM1 [30V 65K 5L] + 3% Na ₂ SO ₄	2	6,50	0,10	31,42	0,69	2,88
	7	7,46	0,40	37,98	2,28	-2,10
	28	9,55	0,30	52,30	2,34	-2,80
	91	11,12	0,50	67,41	0,87	3,68
CEM6 [20v 50K 30L] + 1% Na ₂ SO ₄	2	4,05	0,40	20,97	0,17	1,32
	7	6,04	0,20	27,60	0,34	0,96
	28	7,26	0,10	36,18	0,73	1,82
	91	8,38	0,20	43,31	0,35	-0,50
CEM6 [20V 50K 30L] + 3% Na ₂ SO ₄	2	4,76	0,20	22,36	0,43	2,71
	7	6,08	0,10	28,49	0,28	1,85
	28	7,94	0,40	37,77	0,36	3,41
	91	8,60	0,30	45,55	0,70	1,71
CEM12 [30V 35K 35L] + 1% Na ₂ SO ₄	2	1,80	0,10	7,90	0,16	1,23
	7	3,21	0,20	13,04	0,95	0,70
	28	5,56	0,10	21,17	0,22	2,83
	91	7,22	0,20	30,47	0,37	1,07
CEM12 [30V 35K 35L] + 3% Na ₂ SO ₄	2	1,65	0,10	7,62	0,09	0,95
	7	3,55	0,01	15,58	0,14	3,24
	28	6,41	0,20	23,41	0,68	5,07
	91	7,06	0,30	30,72	1,3	1,32

Tableau 4-11 – Résistances mécaniques (flexion et compression) des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 2 et un activateur Na₂SO₄

La Figure 4-4 illustre l'évolution de la résistance en compression des mortiers à base de ciments ternaires activés ou non. On observe que l'activation au Na₂SO₄ n'a aucun effet sur l'évolution des résistances du CEM 1 et, dans une grande mesure également, du CEM 6. Seul le CEM 12 offre des résistances à moyen terme (7 et 28 jours) légèrement plus élevées.

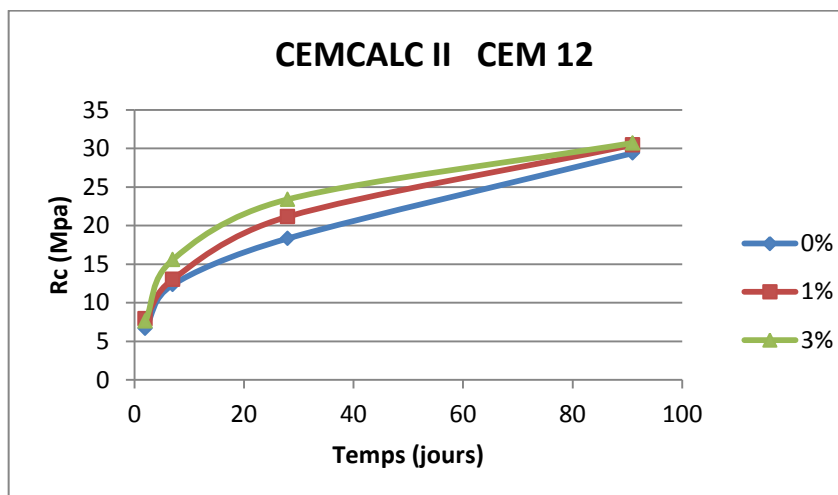
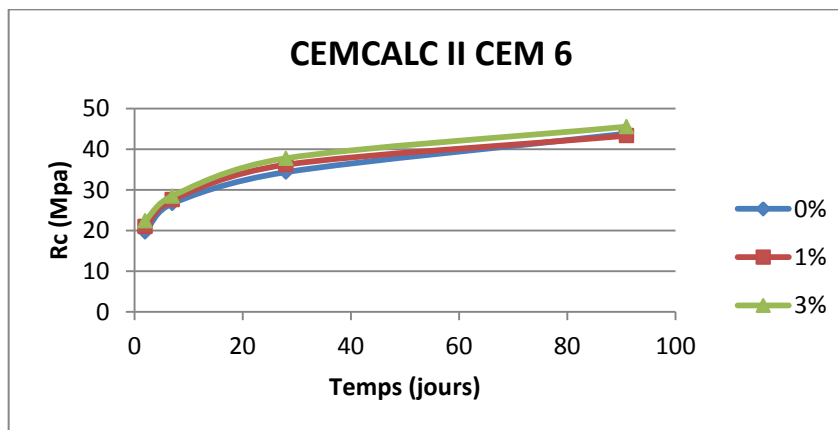
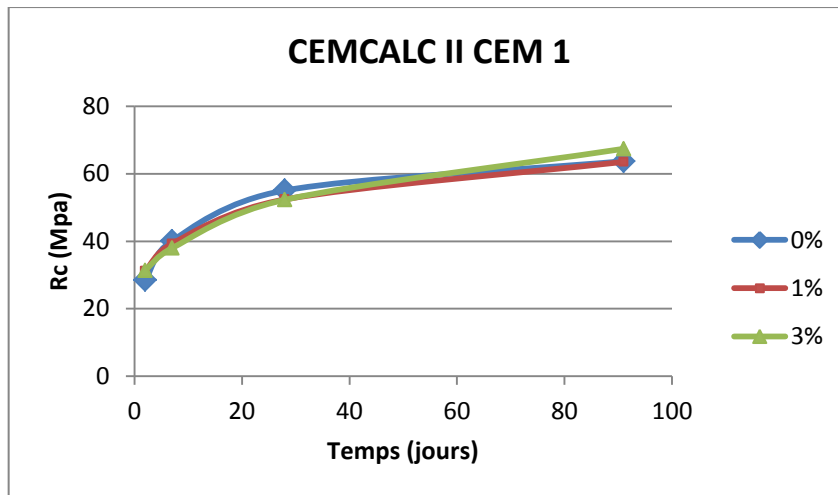


Figure 4-4 – Résistances en compression des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 2 et un activateur Na_2SO_4

Les graphiques de la Figure 4-5 présentent, sous une autre forme, la comparaison de comportement des ciments vis-à-vis de la quantité de Na_2SO_4 ajoutée.

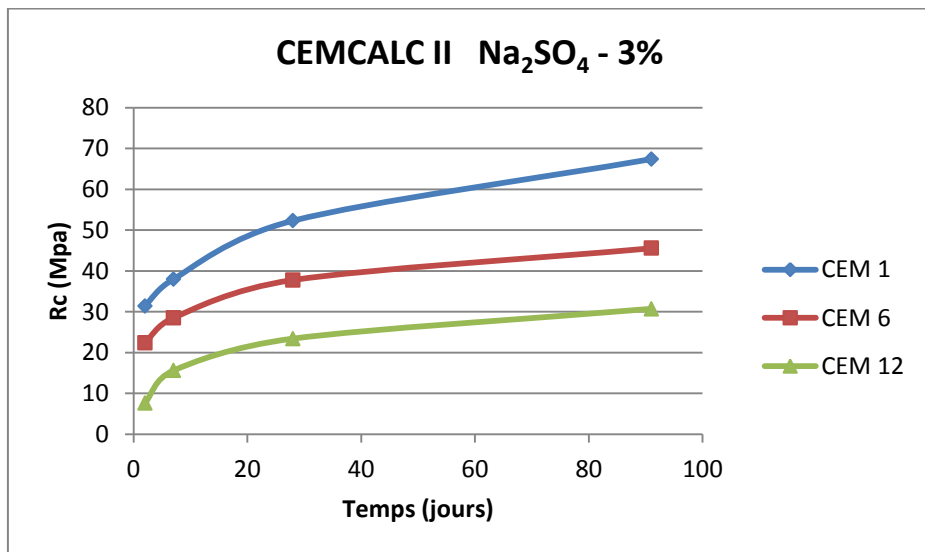
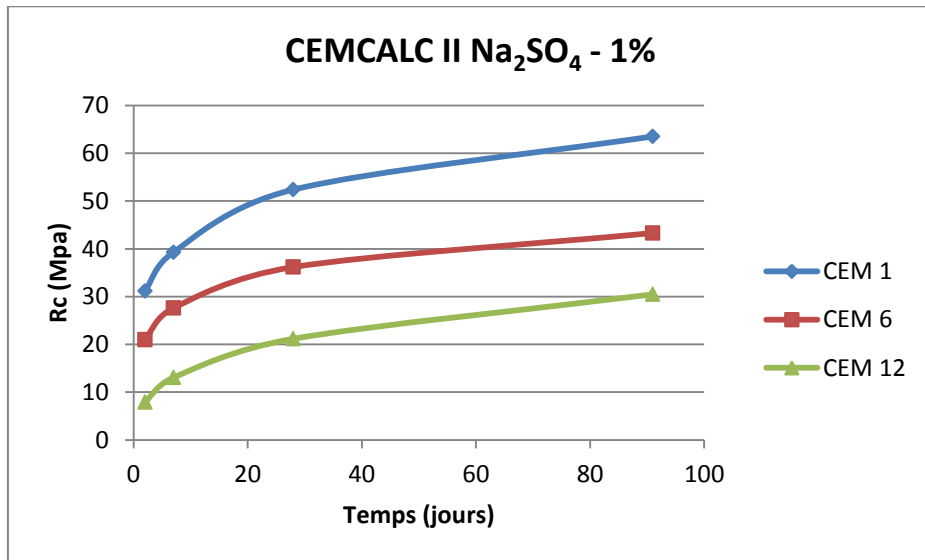
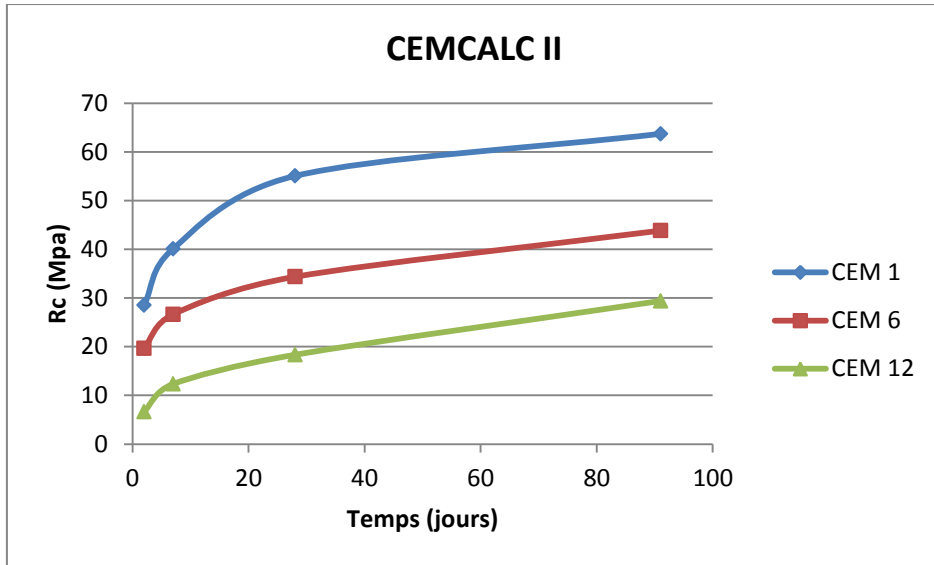
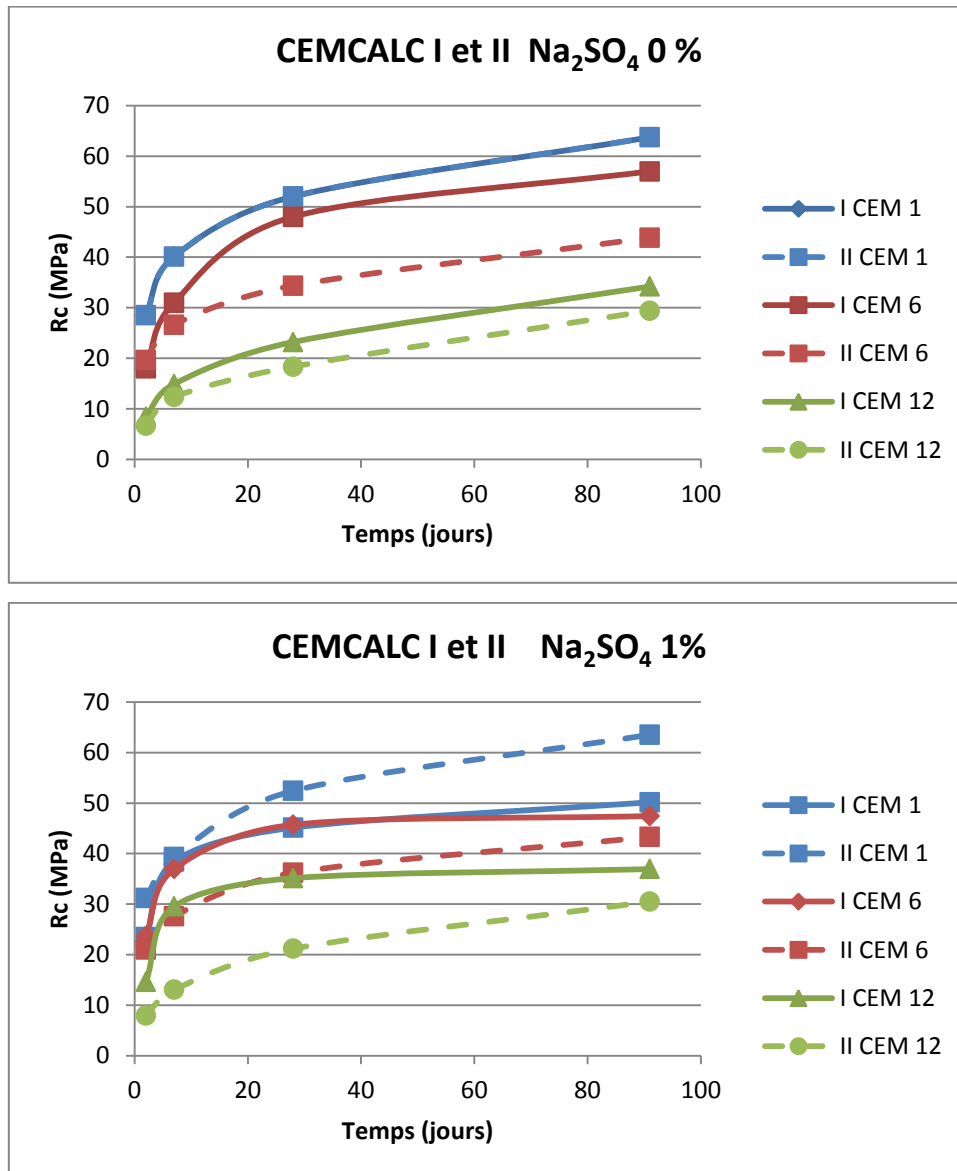


Figure 4-5 – Comparaison des résistances en compression des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 2 et un activateur Na₂SO₄

4.4.5 Comparaison des résultats entre les ciments provenant de CEMCALC 1 et de CEMCALC 2

L'activation au Na_2SO_4 semble avoir peu d'effet sur les ciments, sauf le CEM 6 contenant du laitier de haut-fourneau (CEMCALC 1). Dans le cas des cendres volantes on n'observe pas d'effet accélérateur, en particulier à très court terme (Figure 4-6).



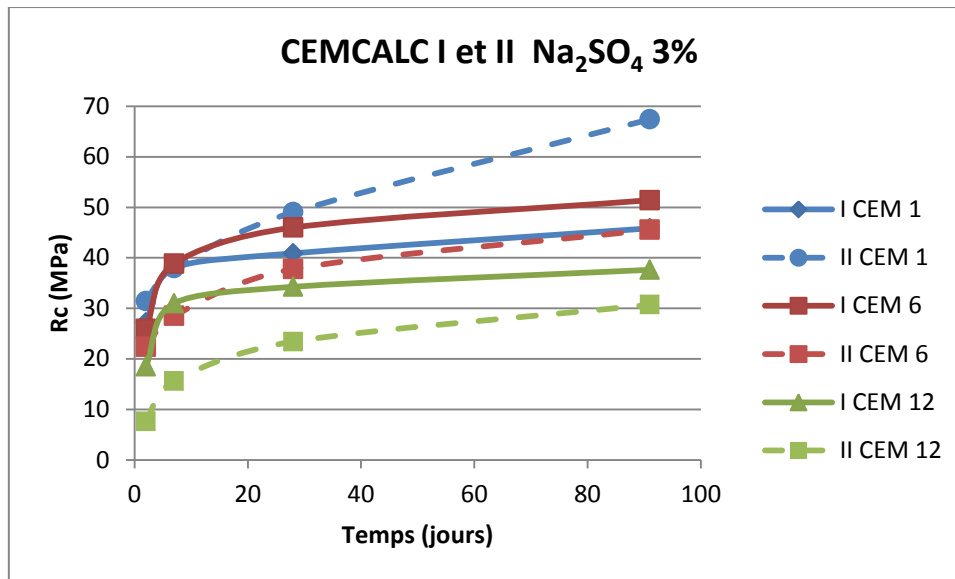


Figure 4-6 – Comparaison des résistances en compression des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 1 et CEMCALC 2 et un activateur Na_2SO_4

4.5 Conclusions

Dans les conditions expérimentales reprises dans la première phase, conduites sur des mortiers à base de ciments ternaires contenant des cendres volantes, seul l'activateur de type « hybride » (Na_2SO_4) présente une action positive sur les propriétés mécaniques. Cette action est nettement plus significative pour les barrettes contenant le ciment CEM 12 (30V 35K 35L) que lors de l'utilisation du CEM 1 (30V 65K 5L). L'action des activateurs semble donc renforcée par la présence de fillers calcaires qui, rappelons-le, joue également un rôle d'activateur. C'est à 28 jours que la croissance est la plus marquée, avec une augmentation maximale de la résistance mécanique de $9,4 \text{ N/mm}^2$ lors de l'utilisation de 5 % de Na_2SO_4 . Cela représente une croissance de 40,52 % par rapport à la résistance de référence (sans activateur). L'activation chimique des cendres volantes ne se produit donc pas aux jeunes âges mais d'une manière assez continue. Au regard des graphiques, il semble que l'optimum de concentration, même s'il est proche, ne soit pas encore atteint. Toutefois, il est important de limiter l'apport de sulfates et d'alcalis dans les bétons car rappelons que ces derniers peuvent provoquer des dégâts importants. La Figure 4-7 nous montre que le CEM 12, qui ne répondait pas aux critères de classes de résistances, remplit maintenant ces exigences grâce à l'incorporation de 5 % de Na_2SO_4 .

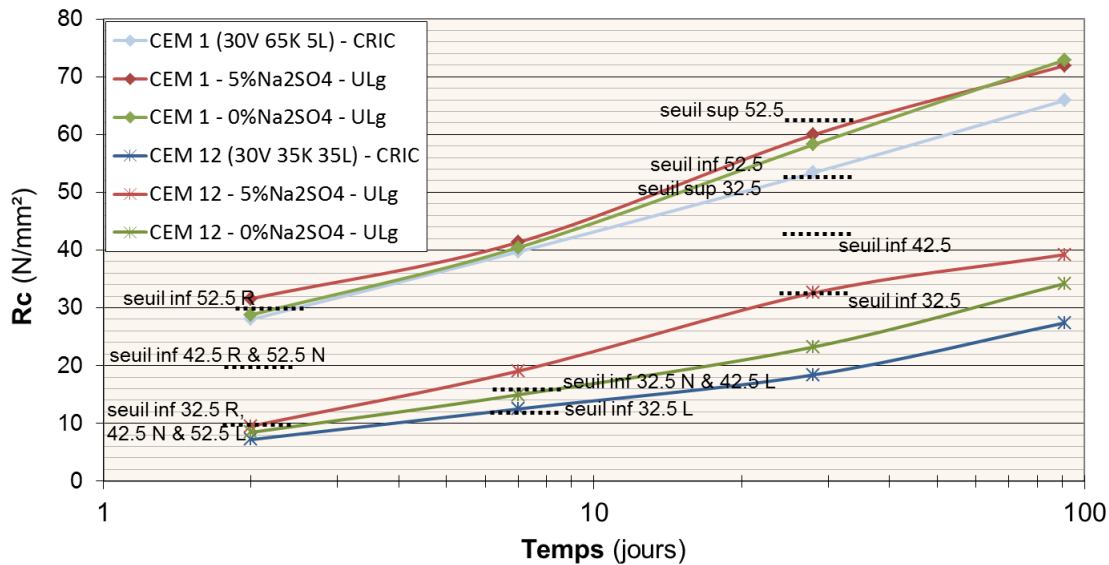


Figure 4-7 – Comparaison des résistances mécaniques à 2, 7, 28 et 91 jours pour les mortiers réalisés avec les ciments CEM1 et CEM12 à base de cendres volantes avec 0 et 5 % de Na₂SO₄

C'est pourquoi les concentrations utilisées dans la seconde phase de cette recherche semblent plus raisonnables. Toutefois, l'activation au Na₂SO₄ semble avoir peu d'effet sur les ciments, sauf le CEM 6 contenant du laitier de haut-fourneau (CEM₆ALC1). L'amélioration des résistances observée dans la première phase pour 1 et 3% ne se répète pas dans la seconde phase, ce qui est sans doute lié au fait que nous avons travaillé dans la seconde phase à E/C constant.

Dans le cas des ciments avec cendres volantes, que ce soit pour les CEM 1, 6 ou 12, on n'observe pas d'effet accélérateur, en particulier à très court terme.

5 Tâche 5 – Etude de la compatibilité ciments/superplastifiants

5.1 Introduction

Avant d'envisager la formulation et la confection des bétons avec les nouveaux ciments, il est nécessaire de vérifier la compatibilité de ceux-ci avec les adjuvants hautement réducteurs d'eau actuellement commercialisés.

Les essais sur bétons et sur mortiers ont été réalisés sur deux superplastifiants (SP) de nouvelle et d'ancienne génération : à base de polycarboxylate (PCE) et de naphthalène (NAF), dont les plages de dosage recommandées par le fabricant sont respectivement de 0,4 à 2,1% et de 0,5 à 1,2%.

5.2 Etude sur mortiers

5.2.1 Introduction

Comme effectuée dans le cadre de la certification des adjuvants (TRA 500), une étude de compatibilité ciment/adjuvant a été réalisée, à l'aide de mesures de temps de prise sur mortier. Ces essais ont été réalisés à **consistance constante** et à **dosage maximal en superplastifiant** (SP) recommandé par le fabricant.

Ces essais ont été effectués pour les trois ciments industriels de référence et les cinq nouveaux ciments ternaires. En effet, suite aux résultats sur mortiers du CRIC de la Tâche 3, il a été décidé de supprimer le CEM 12 v2-FP [30V 35K 35L] pour les essais de compatibilité ainsi que pour la phase béton.

5.2.2 Principe et conditions de l'essai

Le temps de prise sur mortier avec ou sans adjuvant est déterminé selon la norme NBN EN 480-2 [1] au moyen d'un prisomètre automatique ou appareil de Vicat (voir Figure 5-1). Le temps de prise est déterminé par l'observation d'une aiguille pénétrant jusqu'à une valeur spécifiée dans un mortier de référence sans adjuvant avec un E/C de 0,50. Le mortier avec adjuvant (mortier adjuvanté) doit présenter la même consistance que le mortier de référence sans adjuvant conformément à la norme NBN EN 480-1 [2]. Dans ce but, le besoin en eau de gâchage de ce mortier adjuvanté doit être déterminé par un essai d'étalement, conformément à la norme NBN EN 413-2 [3].

Les éprouvettes sont préparées et testées à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et à une humidité relative d'au moins 65%. Après préparation, l'éprouvette est directement immergée sous eau dans l'appareil. Par ciment, deux éprouvettes ont été confectionnées pour le mortier de référence sans adjuvant et trois ont été confectionnées pour chaque mortier adjuvanté (avec les superplastifiants NAF et PCE).

Le moule de Vicat doit être de forme tronconique, d'une profondeur de 40 mm et de diamètres internes supérieur et inférieur de 70 mm et 80 mm respectivement.

L'aiguille pénètre verticalement à l'aide d'un piston lâché rapidement. La valeur lue est la distance entre l'extrémité de l'aiguille et la plaque de base. Le temps écoulé depuis la fin de malaxage est également consigné. L'essai est ensuite répété à des positions espacées et à des intervalles de temps adaptés.

Le temps mesuré entre la fin du malaxage et le moment où la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de 4 mm constitue le **temps de début de prise** du mortier. Le temps de prise mesuré entre la fin du malaxage et le moment où l'aiguille ne pénètre pas plus de 2,5 mm dans l'éprouvette constitue le **temps de fin de prise** du mortier.

Dans notre cas, le **temps de référence T0** correspond au moment du contact entre l'eau et le ciment, ce qui permet d'avoir une référence invariable, contrairement à la durée de malaxage qui peut changer. Il existe alors une différence de 3 minutes par rapport au moment de la fin du malaxage, ce qui est négligeable par rapport au degré de précision des mesures.



Figure 5-1 – Prisomètre automatique (appareil de Vicat)

5.2.3 Résultats

5.2.3.1 Influence du type de ciment sur le temps de prise (sans superplastifiant)

Le graphique à la Figure 5-2 montre les temps de prise pour les mortiers de référence (sans adjuvant et E/C = 0,50) pour tous les types de ciments. Pour rappel, l'heure zéro sur le graphique correspond au moment du contact entre l'eau et le ciment. La comparaison montre que les temps de prise des nouveaux ciments ternaires se trouvent tous entre ceux obtenus avec les ciments commerciaux.

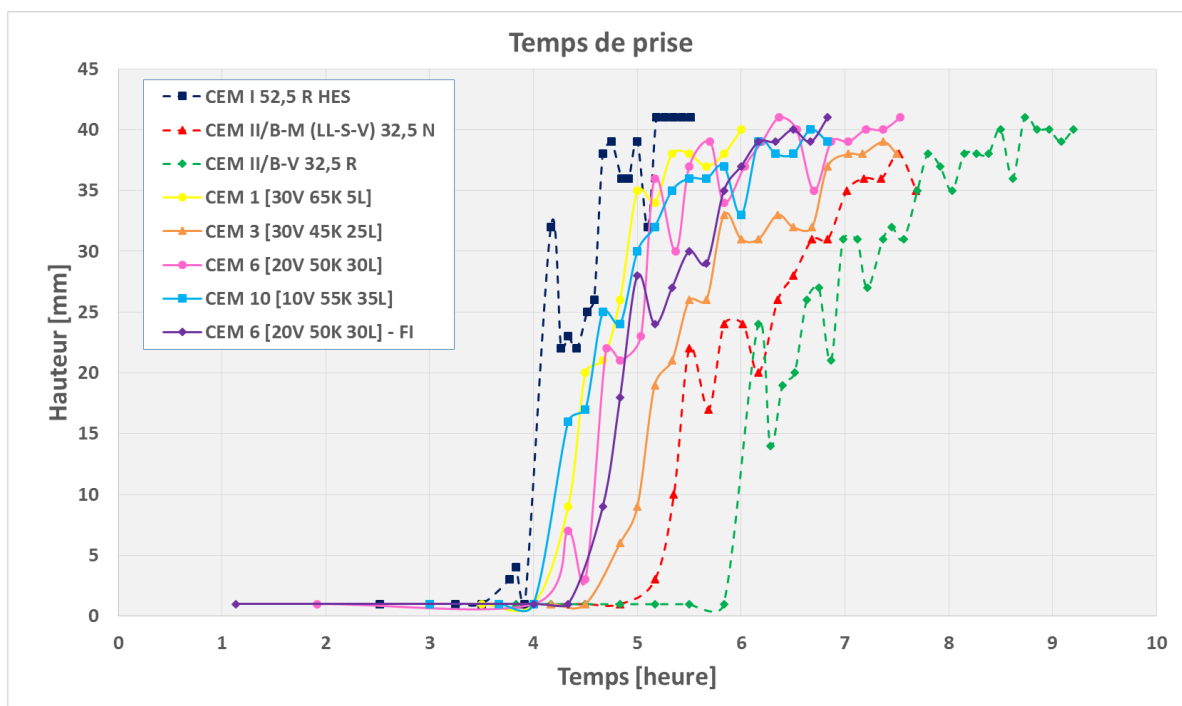


Figure 5-2 – Temps de prise sur mortiers de référence (sans superplastifiant) pour tous les types de ciment

Si on compare les nouveaux ciments ternaires, il semblerait que le temps de prise dépende de la **teneur en clinker** (coefficient de corrélation est de -0,82). Plus la teneur en clinker augmente, plus la prise est rapide.

Ensuite, si on prend en compte les ciments industriels de référence également, le temps de prise dépendrait de la **finesse** des ciments. En effet, la Figure 5-3 ci-dessous reprend le temps de début de prise des mortiers de référence (sans adjuvant), moyenne de deux échantillons, en fonction de la finesse par granulométrie laser ($< 8 \mu\text{m}$). Plus la finesse du ciment est élevée, plus le début de prise est rapide (le coefficient de corrélation calculé est de -0,91).

Par ailleurs, le ciment industriel CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N est plus fin que le ciment CEM II/B-V 32,5 R. Il prend prise plus rapidement malgré sa teneur en clinker plus faible (71% contre 78%), sa teneur en filler calcaire plus élevée (13% contre 0%) et sa dénomination « N » à prise normale, contrairement au ciment CEM II/B-V 32,5 R qui a une dénomination à prise rapide. Il faut cependant rappeler que cette dénomination se base sur la résistance en compression à court terme (à 2 et 7 jours) et non sur le temps de prise [4].

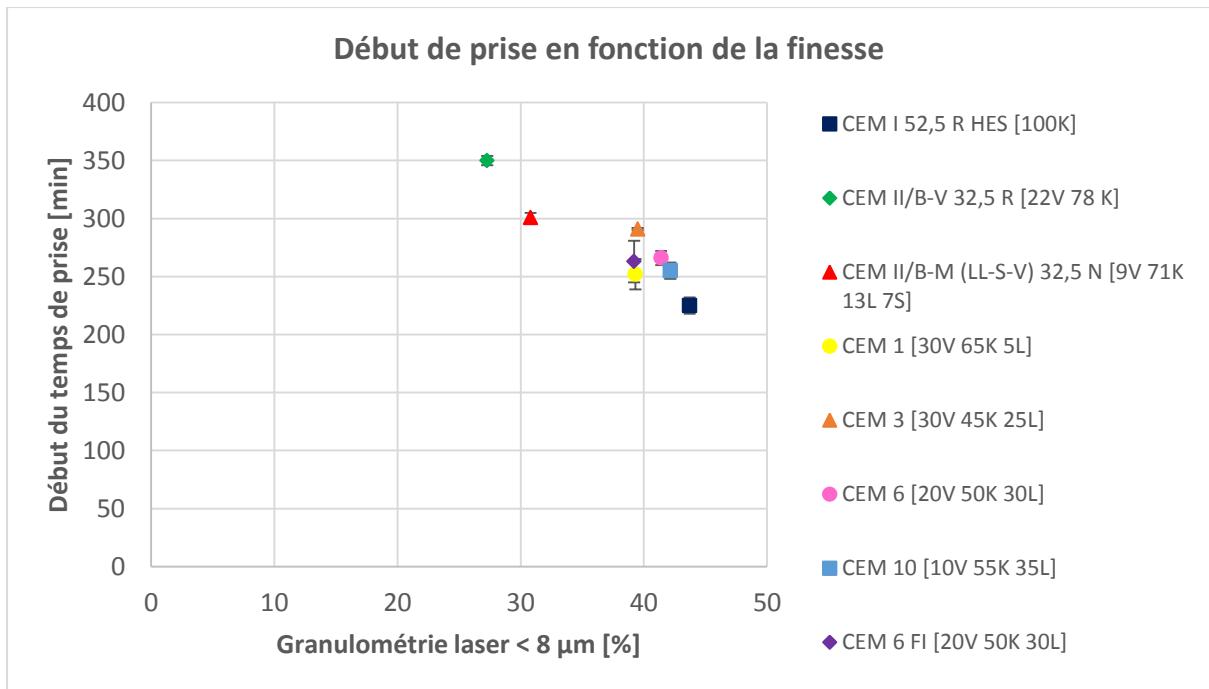


Figure 5-3 – Corrélation entre le début de prise des mortiers sans adjuvants et la finesse des ciments

5.2.3.2 Influence des superplastifiants sur le temps de prise des ciments

Le graphique à la Figure 5-4 montre les résultats de temps de prise pour le ciment industriel de référence CEM I 52,5 R HES. La courbe en bleu représente le mortier de référence sans adjuvant. Les courbes en rouge et vert représentent les mortiers adjuvés avec le superplastifiant NAF (à base de naphthalène) et PCE (à base de polycarboxylate) respectivement. L'effet secondaire du superplastifiant PCE est visible : il accuse un retard de prise d'environ 3h, contrairement au superplastifiant NAF dont le retard de prise par rapport au mortier de référence est négligeable. Les mêmes tendances sont observées pour tous les autres ciments, comme illustré à la Figure 5-5.

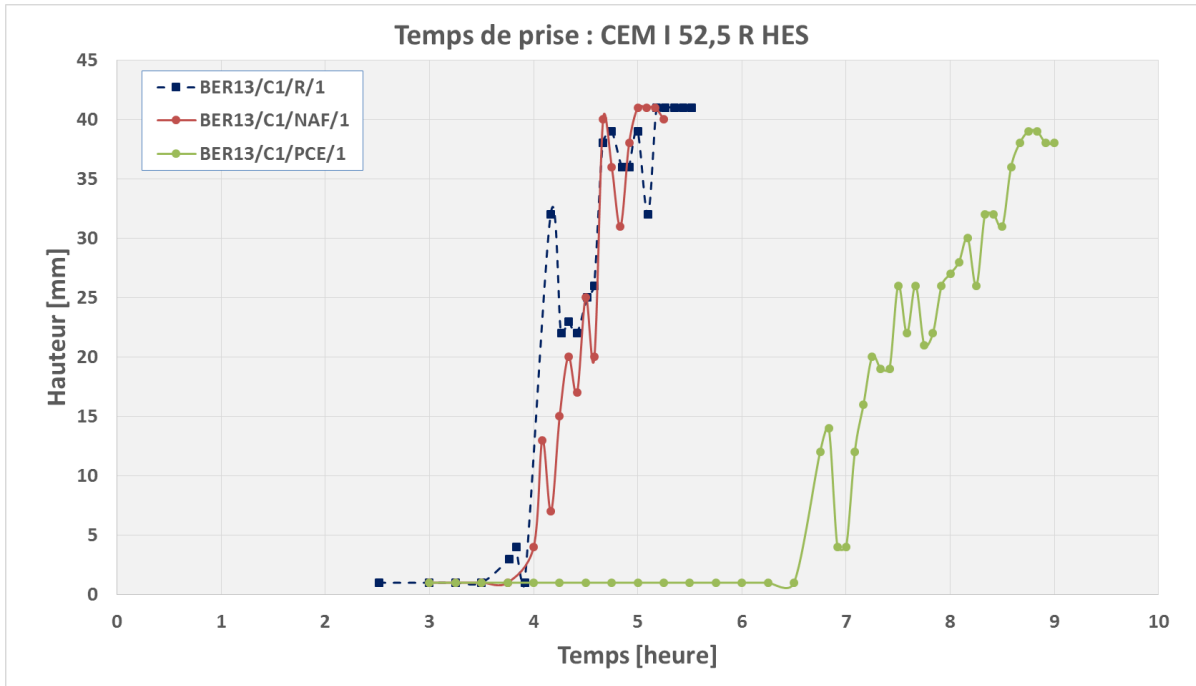


Figure 5-4 – Temps de prise sur mortiers de référence (R) et adjuvés (avec les superplastifiants NAF et PCE) pour le ciment de référence CEM I 52,5 R HES

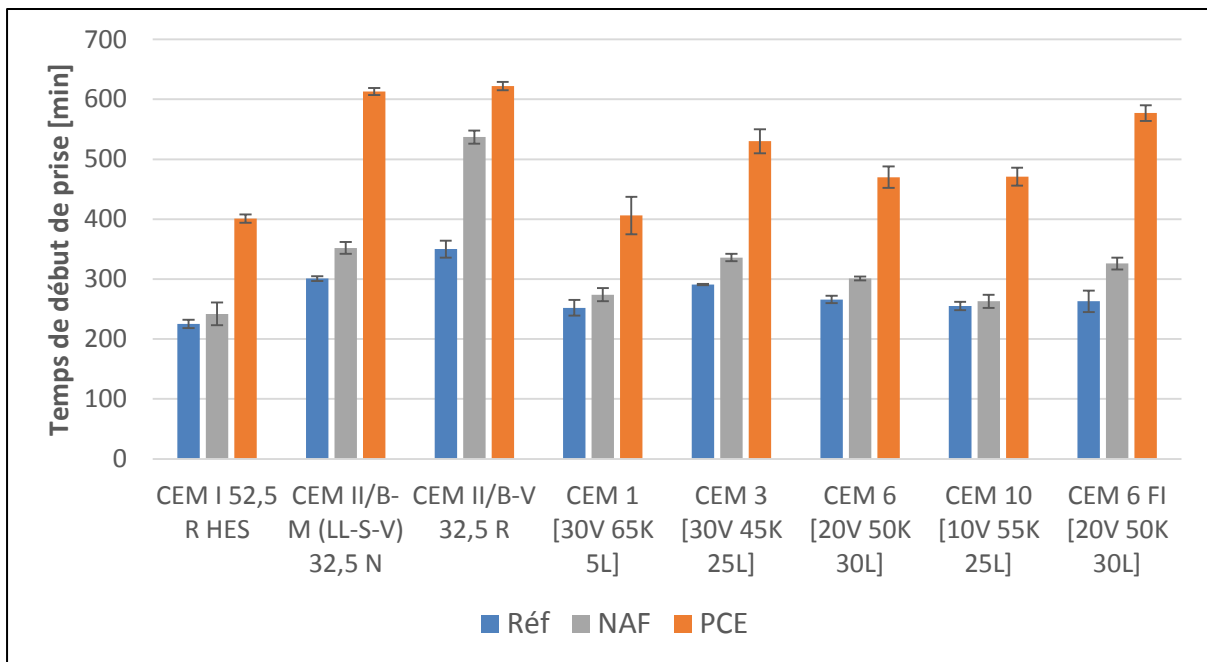


Figure 5-5 – Temps de début de prise des mortiers de référence (R) et adjuvés (avec les superplastifiants NAF et PCE) pour tous les ciments

5.2.3.3 Récapitulatif des résultats

Le Tableau 5-1 suivant reprend les résultats des essais de temps de prise (début et fin) ainsi que le rapport E/C et l'étalement. Le retard de début de prise est calculé par rapport au début de prise du mortier de référence (sans adjuvant). Pour rappel, les valeurs de temps de prise sont des moyennes de deux échantillons pour le mortier de référence et de trois échantillons pour le mortier adjuvanté.

Ciment	Type SP	Dosage max [%]	E/C	Etalement [mm]	Début prise [min]		Fin prise [min]		Retard prise [min]
					Moy	σ	Moy	σ	
CEM I 52,5 R	-	-	0.5	205.5	225	7	306	1	-
	NAF	1.2	0.47	196	242	19	293	5	17
	PCE	2.1	0.43	200.5	401	7	422	8	176
CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	-	-	0.5	197	301	4	401	13	-
	NAF	1.2	0.44	193.5	352	10	444	20	51
	PCE	2.1	0.41	203	613	6	833	42	312
CEM II/B-V 32,5 R	-	-	0.5	212	350	14	536	37	-
	NAF	1.2	0.42	222	537	11	657	3	187
	PCE	2.1	0.41	208	622	7	830	26	272
CEM 1 [30V 65K 5L]	-	-	0.5	210	252	13	342	27	-
	NAF	1.2	0.43	204	274	11	339	7	22
	B	2.1	0.38	203	406	31	653	35	154
CEM 3 [30V 45K 25L]	-	-	0.5	208	291	1	410	0	-
	NAF	1.2	0.41	213.5	336	6	423	6	45
	PCE	2.1	0.34	214	530	20	747	6	239
CEM 6 [20V 50K 30L]	-	-	0.5	212.5	266	6	355	7	-
	NAF	1.2	0.43	221	301	3	383	9	35
	PCE	2.1	0.36	212.5	470	18	690	45	204
CEM 10 [10V 55K 35L]	-	-	0.5	207	255	7	348	32	-
	NAF	1.2	0.42	205	263	11	360	22	8
	PCE	2.1	0.37	203	471	15	636	58	216
CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	-	-	0.5	197	263	18	353	12	-
	NAF	1.2	0.42	204	326	10	395	3	63
	PCE	2.1	0.37	210	577	13	681	3	314

Tableau 5-1 – Résultats des essais de compatibilité (mesures de temps de prise)

Valeur en bleu : retard de prise supérieur à 5h

Concernant les **étalements** obtenus par les mortiers de référence (sans SP, E/C = 0,50), aucune influence significative des autres paramètres n'est manifeste, contrairement aux résultats sur pâte de ciment. Les résultats d'étalement des nouveaux ciments ternaires se trouvent dans la même gamme (197 mm pour le CEM 6 v2-FI à 212,5 mm pour le CEM 6 v2-FP) que les ciments industriels de référence (197 mm pour le CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N à 212 mm pour le CEM II/B-V 32,5 R). Parmi les nouveaux ciments ternaires, la consistance la plus faible est obtenue par le CEM 6 v2-FI. Ceci pourrait être dû à l'utilisation du filler impur. De manière générale, l'étalement moyen est de 204,5 mm avec un écart-type de 7,5 mm.

Les **rapports E/C** obtenus à dosage maximal recommandé par le fabricant permettent d'évaluer l'efficacité des superplastifiants. La Figure 5-6 ci-dessous montre les rapports E/C en fonction de la teneur en clinker des ciments. Cette relation est linéaire (coefficients de corrélation calculés de 0,83 avec le NAF et de 0,95 avec le PCE) : moins il y a de clinker, plus le E/C est bas, ce qui signifie une meilleure efficacité du superplastifiant.

Les **rapports E/C** obtenus avec le **superplastifiant NAF** et les nouveaux ciments ternaires, se situent dans la gamme de ceux obtenus avec les ciments industriels de référence. Avec le **superplastifiant PCE** (Figure 5-6 (b)), les rapports E/C obtenus avec les nouveaux ciments ternaires se situent dans une gamme inférieure ($E/C = 0,34 - 0,38$) à celle des ciments industriels de référence ($E/C = 0,41 - 0,43$). Ce superplastifiant de nouvelle génération (à base de polycarboxylate) semble donc plus efficace (il permet de réduire le rapport E/C pour une même consistance) avec les nouveaux ciments ternaires. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que leur teneur en clinker soit plus faible.

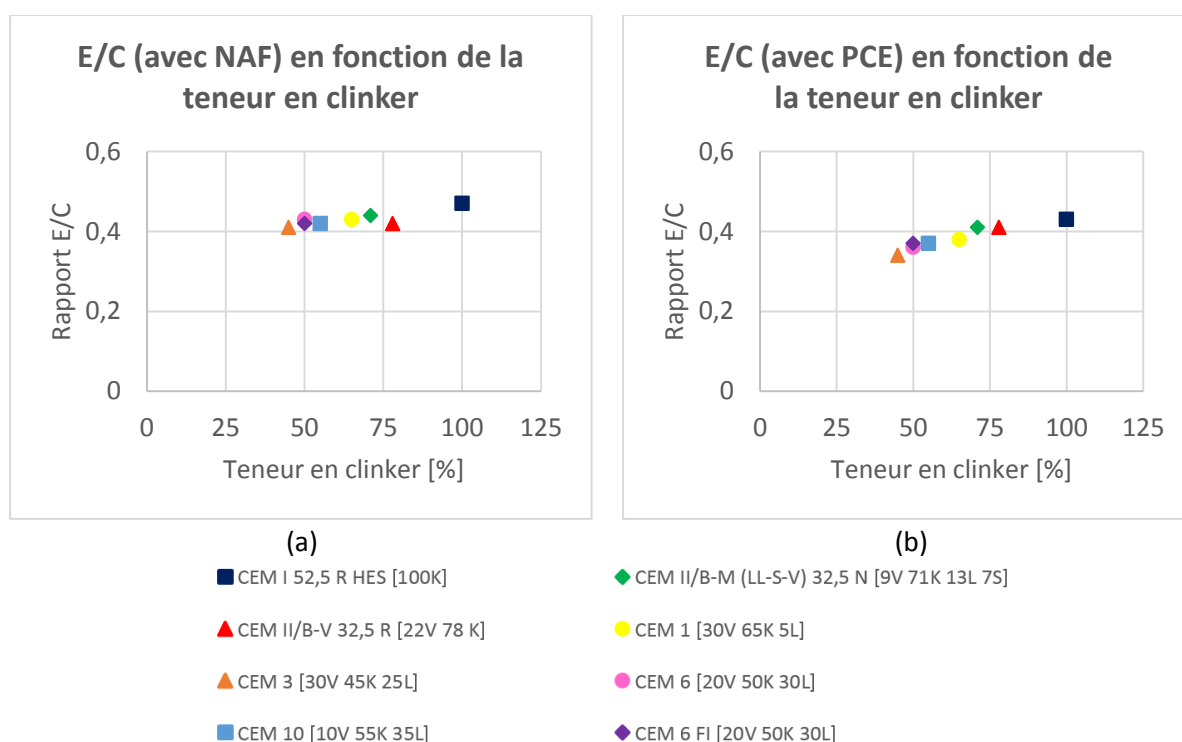


Figure 5-6 – Rapports E/C des mortiers obtenus avec les superplastifiants NAF (a) et PCE (b) en fonction de la teneur en clinker des ciments

Enfin, l'effet du **filler calcaire impur** ne semble pas avoir d'effet sur l'efficacité des superplastifiants. En effet, des rapports E/C semblables sont obtenus pour les ciments CEM 6 v2-FP et CEM 6 v2-FI. Par contre, l'effet sur la consistance (sans superplastifiant) est marqué : l'étalement passe de 212,5 mm pour le CEM 6 v2-FP à 197 mm pour le CEM 6 v2-FI, ce qui pourrait être dû aux particules argileuses contenues dans le filler impur. Les débuts de prise sont assez semblables à chaque E/C égal mais le retard de prise est tout de même influencé par le filler impur : de 35 min à 63 min avec le superplastifiant NAF et de 204 min à 314 min avec le superplastifiant PCE.

Par ailleurs, selon le **règlement d'application TRA 500** sur les adjuvants (édition du 31/07/2014 [5]), il est nécessaire de signaler si le retard de prise est supérieur à 5h. Mais selon la **circulaire be-cert 5024 H 2013/1345** [6] sur les modifications et amendements du TRA 500 (édition du 6/12/2013), il est nécessaire de signaler qu'il existe une possibilité de retard de prise important en fonction du type de ciment utilisé si le retard est supérieur à 12h. S'il est supérieur à 20h, il est nécessaire de signaler la valeur du temps de retard de prise ainsi que le ciment utilisé. Ces derniers critères sont repris dans l'édition 6.0 du TRA 500 qui sera d'application à partir de 2016.

Les valeurs en bleu dans le Tableau 5-1 (312 min et 314 min pour les ciments CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5N et CEM 6 v2-FI respectivement) indiquent un retard supérieur à 5h, avec le superplastifiant PCE. Cet adjuvant pourrait donc avoir un effet secondaire avec certains ciments. Mais ces retards restent faibles par rapport au critère de retard de 12h. Cela est illustré à la Figure 5-7.

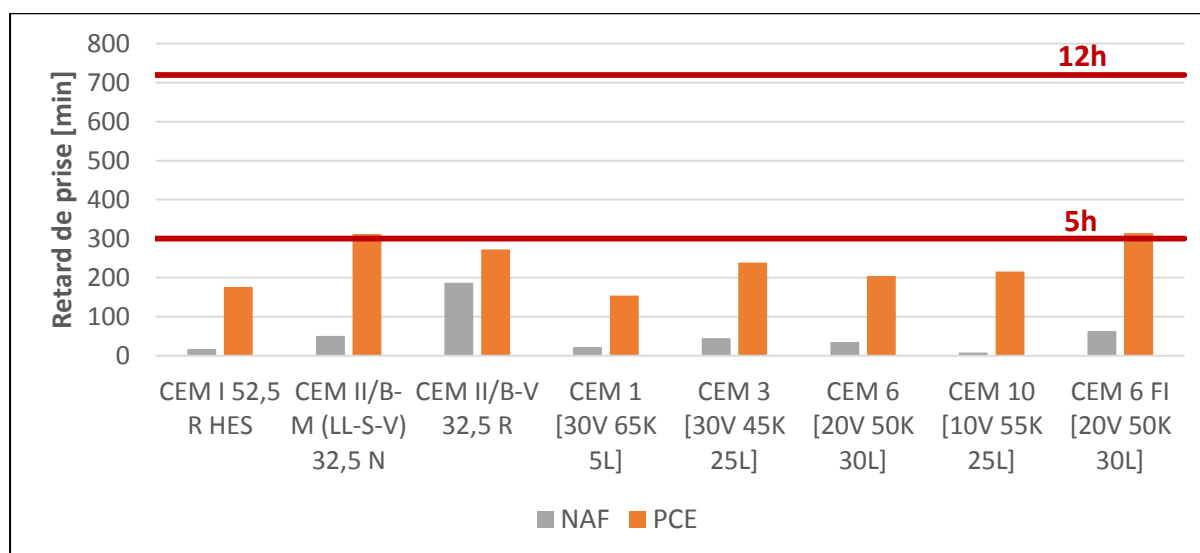


Figure 5-7 – Retard de prise des mortiers adjuvantés par rapport aux références et seuils de 5h (TRA 500 édition actuelle) et 12h (TRA 500 nouvelle édition)

De manière générale, les retards de prise observés avec l'utilisation des superplastifiants des nouveaux ciments ternaires se situent dans la même gamme (8 – 63 min avec le NAF et 154 – 314 min avec le PCE) que les ciments industriels de référence (17 – 187 min avec le NAF et 176 – 312 min avec le PCE).

5.3 Etude sur bétons

5.3.1 Introduction

L'étude de la compatibilité ciment/superplastifiant a été réalisée sur béton, conformément à la norme NBN EN 934-2 [7]. Trois propriétés ont été étudiées : la teneur en air à l'état frais, l'affaissement au cône et la résistance en compression à 28 jours. Ces essais ont été réalisés à **E/C constant**. Concernant le dosage en superplastifiant (SP), le dosage moyen recommandé par le fabricant était prévu. Suite à des premiers tests, il a été décidé d'opter pour le **dosage minimum** recommandé par le fabricant.

5.3.2 Composition des bétons

5.3.2.1 Matériaux

Les matériaux constitutifs des bétons sont repris ci-dessous. Ceux-ci ont notamment été sélectionnés sur base des résultats des précédentes tâches.

Il s'agit de :

- un **sable** et trois **granulats**;
- **six nouveaux ciments ternaires K-V-L** sélectionnés et caractérisés à la tâche 3, fabriqués par mélange de matériaux sous forme de poudre (5 à base du filler pur et un à base du filler impur);
- deux **superplastifiants** liquides : à base de polycarboxylate (PCE) et à base de naphthalène (NAF), contenant respectivement 20% et 40% d'extrait sec.

Les granulats employés sont de type calcaire et sont constitués de 3 coupures granulométriques : 2/7, 7/14 et 14/20. Le sable est roulé siliceux de calibre 0/4. Les courbes granulométriques ont servi à établir la courbe idéale suivant la norme NBN EN 480-1 (2014) *Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essais - Partie 1 : béton et mortier de référence pour essais* [2].

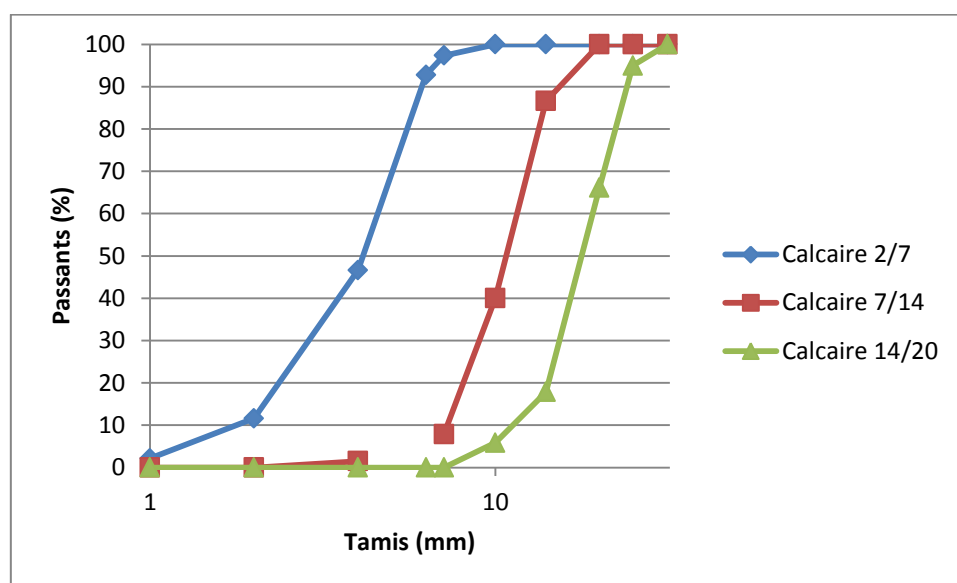


Figure 5-8 – Courbes granulométriques des granulats employés pour la fabrication des bétons

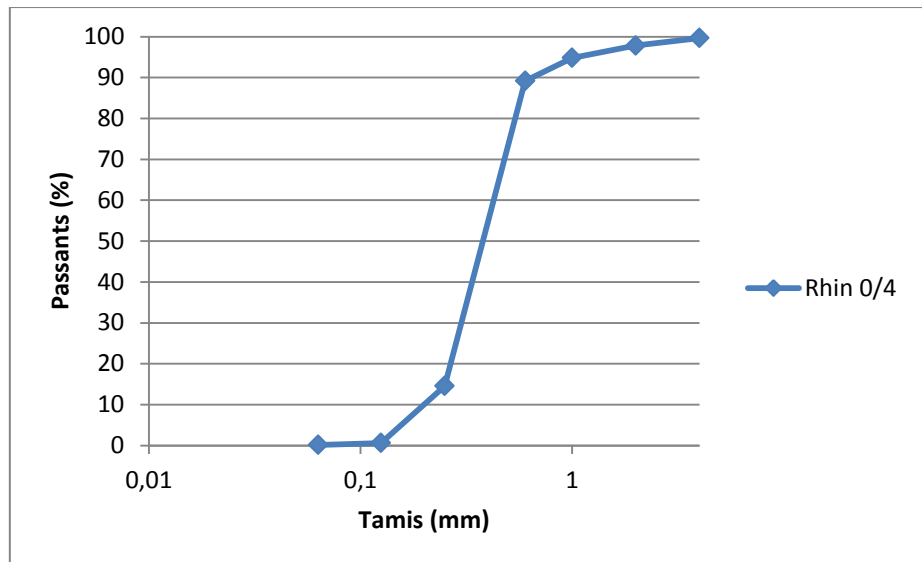


Figure 5-9 – Courbe granulométrique du sable employé pour la fabrication des bétons

5.3.2.2 Formulation des bétons

La formulation du béton est conforme au type IV de la norme NBN EN 934-2. Le rapport E/C du béton est défini de manière à obtenir :

- un affaissement au cône de (30 ± 10) mm,
- un étalement de (350 ± 20) mm,
- une teneur en air inférieure à 2%.

Le dosage en superplastifiant est respectivement de 0,4% (PCE) et 0,5% (NAF), ce qui correspond au dosage minimum recommandé par des fabricants. Des essais préliminaires réalisés avec le dosage moyen (1,25% PCE et 0,85% NAF) en superplastifiant ont conduit à une ségrégation importante des constituants (Figure 5-10).

La composition adoptée pour les essais est donnée au Tableau 5-2.

Constituants	Quantités [kg/m ³]
Ciment	350
Sable roulé 0/4	496
Concassé calcaire 2/7	590
Concassé calcaire 7/14	506
Concassé calcaire 14/20	283
Superplastifiant	
PCE	1,4 (0,4%)
NAF	1,75 (0,5%)
Eau réellement ajoutée ($E_{\text{eff}} + E_{\text{granulats}} - E_{\text{SP}}$)	177
E/C	0,5
TOTAL (kg/m³)	+/- 2402

Tableau 5-2 – Formulation du béton, pour un volume d'un m³ et un dosage minimum recommandé en superplastifiant



Figure 5-10 – Ségrégation du béton pour un dosage nominal en superplastifiant

Les matériaux sont malaxés en respectant la procédure suivante, pour une gâchée de 30 litres:

- mélange pendant 30 sec des granulats et du sable ;
- ajout de la $\frac{1}{2}$ de l'eau et mélange pendant 30 sec ;
- repos pendant 120 sec ;
- ajout du ciment et mélange pendant 30 sec ;
- ajout de la $\frac{1}{2}$ de l'eau et mélange pendant 90 sec ;
- ajout du superplastifiant et mélange pendant 60 sec.

5.3.3 Etude de la compatibilité ciment/superplastifiant

5.3.3.1 Comportement à l'état frais

Des mesures d'affaissement (NBN EN 12350-2 [8]) sont réalisées juste après la fin du malaxage et après 30 minutes. La masse volumique (NBN EN 12350-6 [9]) est mesurée directement dans les moules. La teneur en air est mesurée après 3 minutes suivant la norme NBN EN 12350-7 [10] (Tableau 1-2).

5.3.3.2 Résistances en compression

La mesure de résistance en compression R_c est réalisée à 28 jours suivant la norme NBN EN 12390-3 [11] sur trois cubes par composition sortis de la chambre de conditionnement (Tableau 5-3).

Type de Ciment	Type de Sp	Affaissement			Teneur en air [%]	Masse volumique [kg/m ³]	Rc moyenne [MPa]
		0 minute [mm]	30 minutes [mm]	Perte [%]			
CEM1 [30V 65K 5L]	-	15	5	66	1,8	2396	49,6
	PCE	45	30	33	2,5	2376	44,3
	NAF	45	35	22	1,8	2410	42,7
CEM3 [30V 45K 25L]	-	30	10	66	1,7	2375	27,1
	PCE	60	35	42	2,4	2360	26,3
	NAF	55	30	45	1,8	2413	24,5
CEM6 FI [20V 50K 30L]	-	15	0	100	1,9	2385	35,4
	PCE	20	5	75	2,5	2381	31,3
	NAF	25	5	80	2,3	2386	34,1
CEM6 FP [20V 50K 30L]	-	30	15	50	1,6	2390	31,6
	PCE	40	20	50	2,2	2380	30,1
	NAF	45	30	33	1,3	2401	29,5
CEM10 [10V 55K 35L]	-	10	0	100	2,0	2436	37,7
	PCE	30	10	66	2,4	2409	36,9
	NAF	30	10	66	2,3	2406	36,4
CEM12 [30V 35K 35L]	-	20	0	100	1,5	2395	18,7
	PCE	50	25	50	2,0	2373	15,9
	NAF	54	35	35	1,7	2411	17,6

Tableau 5-3 – Caractéristiques à l'état frais et à l'état durci des bétons fabriqués avec et sans superplastifiant

5.3.4 Analyse des résultats

L'analyse des résultats est basée sur les prescriptions de la norme NBN EN 934-2 (Tableau 3.2) [7], qui précise les exigences en matière d'emploi des superplastifiants :

- **Maintien de la consistance** : 30 min après l'ajout, la consistance du béton adjuvanté ne doit être inférieure à la valeur initiale de la consistance du béton témoin ;
- **Résistance à la compression** : à 28 jours, la résistance du béton adjuvanté est supérieure ou égale à 90% de celle du béton non adjuvanté ;
- **Teneur en air** : pour le béton adjuvanté, la teneur en air est inférieure ou égale à 2% au-dessus de celle du béton témoin.

Effet du couple ciment/superplastifiant sur la consistance des bétons

Sur base des résultats présentés au Tableau 5-3, on constate que :

- L'affaissement mesuré est toujours plus élevé lorsqu'il est mesuré à la fin du malaxage, par rapport à une mesure après 30 min ;
- Les bétons à base des ciments CEM 10 [10V 55K 35L] et CEM 12 [30V 35K 35L], qui contiennent les teneurs en fillers calcaires les plus élevées, ont un affaissement faible à l'origine et nul après 30 min lorsqu'un superplastifiant n'est pas ajouté;
- Les fillers impurs semblent avoir un impact très négatif sur la perte de consistance après 30 min (Figure 5-11);
- L'utilisation de fillers purs (CEM 6 FP) limite considérablement cette perte de consistance (Figure 5-11) ;
- Lorsque des superplastifiants sont utilisés, la valeur d'affaissement à l'origine augmente et la perte après 30 min est moins importante (Figure 5-11) ;
- A l'exception du CEM6 FI (pour les deux adjuvants) et du CEM6 FP+PCE, les consistances mesurées après 30 min avec adjuvants sont égales ou supérieures à celles des bétons témoins et sont donc conformes à la norme ;
- Le type de superplastifiant ne semble pas avoir d'influence sur l'intensité de la perte de consistance ;
- La masse volumique des bétons varie peu en fonction des composants et des superplastifiants (Figure 5-12);

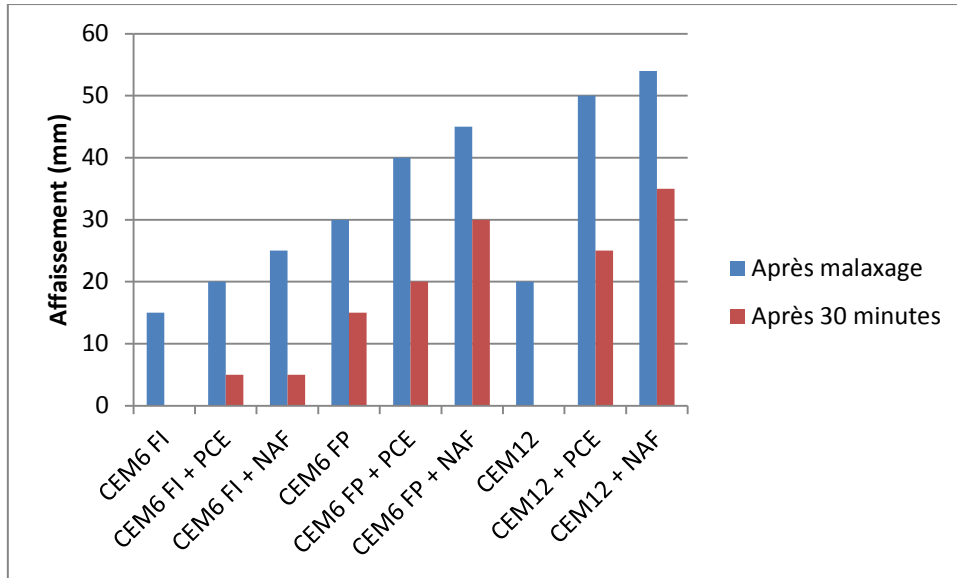


Figure 5-11 – Effet des fillers pur et impur sur l’affaissement

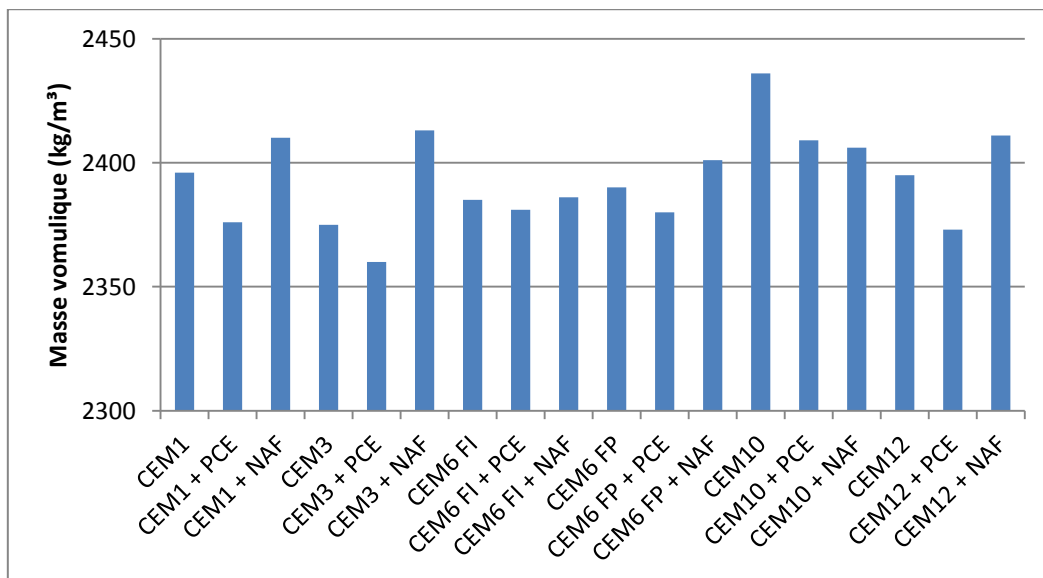


Figure 5-12 – Masse volumique des bétons sans et avec superplastifiant

Effet du couple ciment/superplastifiant sur la teneur en air des bétons

Sur base des résultats présentés au Tableau 5-3 on constate que :

- La teneur en air augmente de façon systématique avec l’utilisation de superplastifiant de type PCE. Le superplastifiant de type NAF semble avoir un impact plus faible sur la teneur en air (Figure 5-13) ;
- L’augmentation de la teneur en air avec l’ajout de superplastifiant est inférieure à 2%, quel que soit le type de ciment et de superplastifiant.

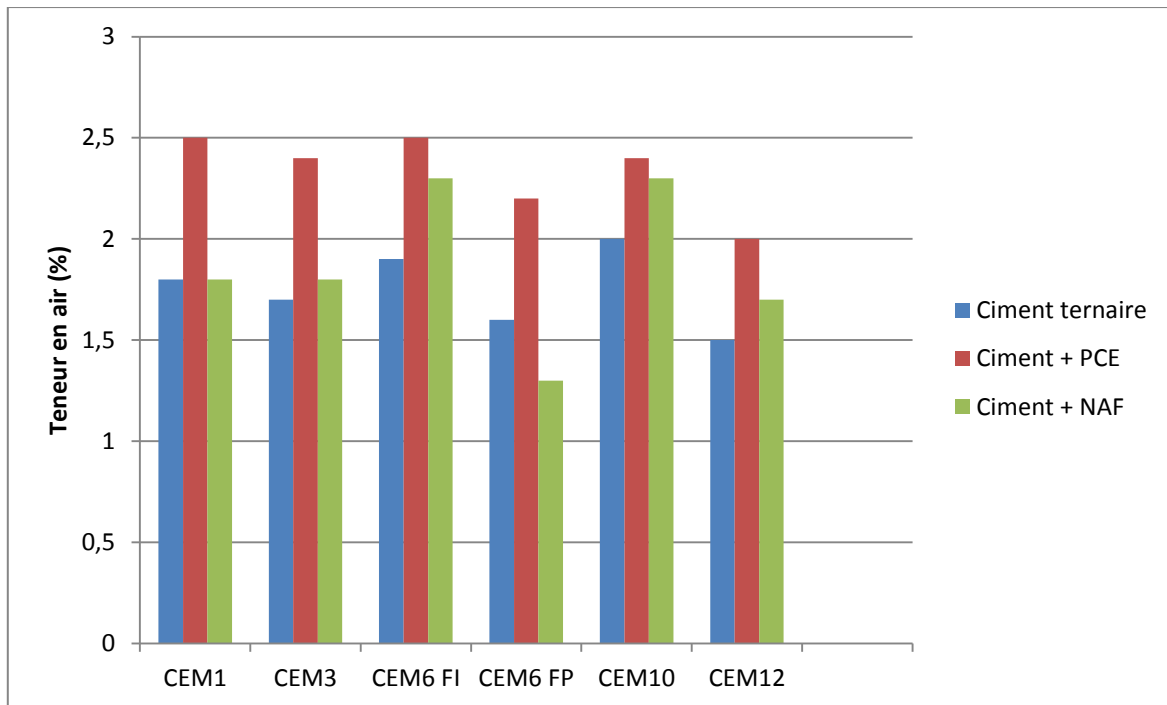


Figure 5-13 – Teneur en air des bétons sans et avec superplastifiant

Effet du couple ciment/superplastifiant sur la résistance en compression des bétons

Du point de vue des résistances en compression, on constate que :

- L'utilisation de fillers purs à la place de fillers impurs engendre une perte légère mais systématique de résistance (Figure 5-14);
- Les CEM 10 présentent des résistances mécaniques doubles de celles des CEM 12, alors que la teneur en filler est identique. C'est la teneur en clinker qui semble conditionner principalement les résistances (Figure 1-13);
- Les CEM 10 présentent des résistances en compression plus élevées que celles des CEM 6 FI, ce qui correspond à nouveau à une plus grande teneur en clinker (55 vs 50%) ;
- Les pertes de résistance par ajout de superplastifiant sont limitées dans la plupart des cas, sauf pour le CEM1 + NAF, le CEM6 FI + PCE et le CEM12 + PCE, qui ne sont pas conformes à la norme.

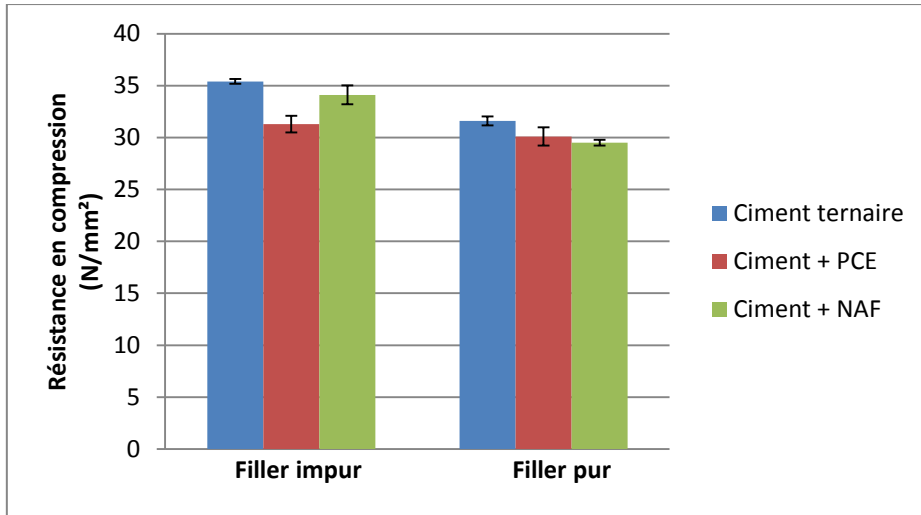


Figure 5-14 – Effet de la pureté du filler sur les résistances en compression

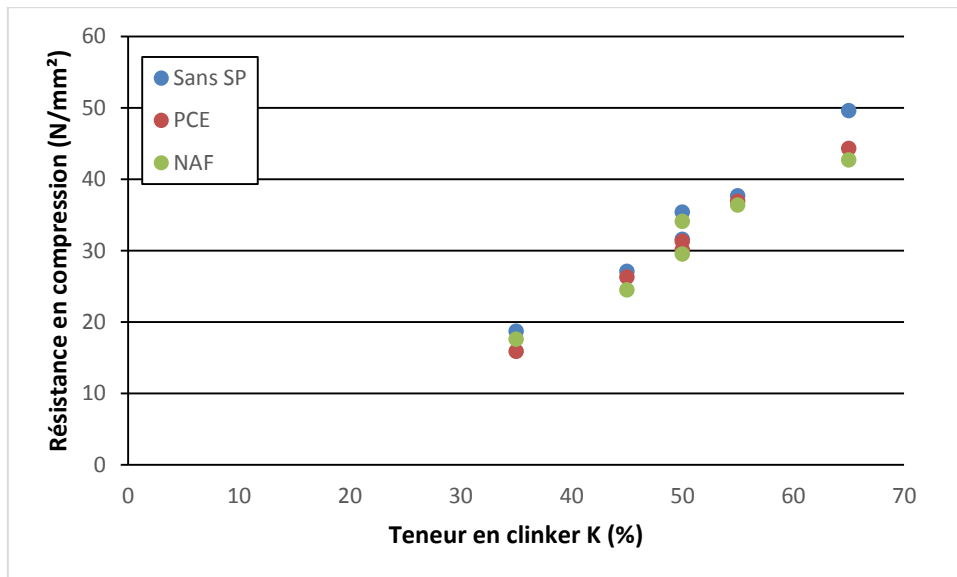


Figure 5-15 – Effet de la teneur en clinker sur les résistances en compression

5.4 Conclusions

De nouveaux ciments ternaires étant développés dans cette recherche, il est nécessaire de vérifier la compatibilité de ceux-ci avec les adjuvants hautement réducteurs d'eau ou superplastifiants, en particulier par rapport aux exigences de la circulaire TRA 500 (**étude sur mortiers**) et à celles de la norme NBN EN 934-2 (**étude sur bétons**).

L'essai de temps de prise sur **mortiers**, à **consistance constante** et à **dosage maximal en SP**, permet d'observer les éventuels effets secondaires des superplastifiants selon le type de ciment. L'essai a été réalisé sur les cinq nouveaux ciments ternaires K-V-L et les trois ciments industriels de référence. Pour rappel, le ciment ternaire CEM 12 v2-FP n'a pas fait l'objet de l'étude de compatibilité sur mortiers au vu des résultats sur mortiers de la Tâche 3.

L'analyse des résultats permet de tirer les conclusions suivantes :

- Le début de prise des mortiers non adjuvantés semble lié à la teneur en clinker des nouveaux ciments ternaires : plus la teneur en clinker est élevée, plus la prise est rapide. Par ailleurs, si on compare tous les ciments (nouveaux ciments ternaires et ciments industriels de référence), il semble que la finesse soit le paramètre influant.
- Les nouveaux ciments ternaires se trouvent dans la même gamme que les ciments industriels de référence, en ce qui concerne (voir Tableau 5-4) :
 - Le début de prise (mortiers non adjuvantés) ;
 - L'étalement (mortiers non adjuvantés) ;
 - Les retards de prise avec les mortiers adjuvantés.
- L'efficacité des superplastifiants est évaluée par le rapport E/C obtenu pour atteindre la consistance visée : plus le rapport E/C est faible (il faut rajouter moins d'eau), plus le SP est efficace. Ainsi, les superplastifiants agissent plus efficacement avec les nouveaux ciments ternaires (gamme inférieure de E/C) que les ciments industriels de référence (Tableau 5-1). L'utilisation du PCE semble plus efficace que celle du NAF.
- La présence d'impuretés (particules argileuses) dans le filler impur diminue la consistance du mortier (de 212,5 mm à 197 mm) et augmente le retard de prise (de 35 min à 63 min avec le superplastifiant NAF et de 204 min à 314 min avec le superplastifiant PCE).

Caractéristique	Ciments industriels de référence	Nouveaux ciments ternaires
Début de prise (mortiers non adjuvantés)	225 – 350 min	252 – 291 min
Etalement (mortiers non adjuvantés)	197 – 212 mm	197 – 212,5 mm
Retard de prise (mortiers adjuvantés)	17 – 187 min (NAF) 176 – 312 min (PCE)	8 – 63 min (NAF) 154 – 314 min (PCE)
E/C (mortiers adjuvantés)	0,42 – 0,47 (NAF) 0,41 – 0,43 (PCE)	0,41 – 0,43 (NAF) 0,34 – 0,38 (PCE)

Tableau 5-4 – Gammes des résultats de compatibilité ciment/superplastifiant de l'étude sur mortiers

Par ailleurs, les résultats montrent que le superplastifiant PCE (à base de polycarboxylate) engendre un effet secondaire de retard de prise plus important que le superplastifiant NAF (à base de naphthalène). Avec l'adjuvant PCE, les ciments CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N (retard de 312 min) et CEM 6 v2-FI (retard de 314 min) accusent un retard légèrement supérieur à 5h mais les retards de prise sont très loin des 12h indiqués dans le circulaire de la TRA 500. En outre, le superplastifiant PCE agit plus efficacement, à dosage maximal recommandé par le fabricant, car des rapports E/C plus faibles sont obtenus.

En conclusion de l'étude sur mortiers, les nouveaux ciments ternaires ne nécessitent pas un dosage plus important en superplastifiant que les ciments industriels de référence pour atteindre la consistance visée. Cela a été confirmé lors de la confection des bétons. En outre, la compatibilité de ces nouveaux ciments avec les superplastifiants NAF et PCE ne pose pas de problème car leur retard de prise reste dans la gamme des retards des ciments industriels.

Du point de vue du comportement des **bétons**, à **E/C constant** et à **dosage minimum recommandé en SP**, on constate que :

- Les bétons qui contiennent les teneurs en fillers calcaires les plus élevées, ont un affaissement faible à l'origine et nul après 30 min lorsqu'un superplastifiant n'est pas ajouté;
- Les fillers impurs semblent avoir un impact très négatif sur la perte de consistance après 30 min;
- Lorsque des superplastifiants sont utilisés, la valeur d'affaissement à l'origine augmente et la perte après 30 min est moins importante (Figure 1-9);
- La teneur en air augmente de façon systématique avec l'utilisation de superplastifiant de type PCE. Le superplastifiant de type NAF semble avoir un impact plus faible sur la teneur en air ;
- L'utilisation de fillers purs à la place de fillers impurs engendre une perte légère mais systématique de résistance;
- Les ciments présentant des teneurs en clinker plus élevées présentent des résistances en compression plus élevées ;
- Les CEM 10 [10V 55K 35L] présentent des résistances en compression plus élevées que celles des CEM 6 FI [20V 50K 30L], ce qui correspond à nouveau à une plus grande teneur en clinker (55 vs 50%).

En conclusion, en se référant à la norme, tous les ciments ternaires étudiés avec superplastifiant de type PCE ou NAF répondent aux exigences de la norme, à l'exception du CEM1 + NAF, leCEM6 FI, du CEM 6 FP+PCE, et du CEM 12 + PCE, pour les dosages en superplastifiants testés.

6 Tâche 6 – Evaluation comparative des performances mécaniques et de durabilité des nouveaux ciments ternaires (sur béton)

6.1 Tâche 6.1 – Formulation et confection des bétons et mortiers

6.1.1 Introduction

Le ciment est un liant hydraulique et devient un matériau lorsqu'il est mélangé avec de l'eau et des granulats fins (mortier) ou des granulats fins et grossiers (béton). C'est donc le béton (ou le mortier) que l'on va caractériser d'un point de vue performances mécaniques et de durabilité, de manière à évaluer les performances des ciments ternaires sélectionnés à la Tâche 3.

Suite aux résultats sur mortiers, il a été décidé de ne pas reprendre le CEM 12 pour les essais de compatibilité et pour la phase béton. De plus, un ciment à base de filler impur a été ajouté à cette étude des performances des bétons. Pour rappel, les ciments K-V-L sélectionnés sont les suivants (quatre à base de filler pur et un à base de filler impur) :

- CEM 1 [30V 65K 5L]
- CEM 3 [30V 45K 25L]
- CEM 6 [20V 50K 30L]
- CEM 10 [10V 55K 35L]
- CEM 6 FI [20V 50K 30L]

Les performances de ces bétons et mortiers seront comparées à celles des bétons réalisés avec trois ciments industriels de référence suivants :

- CEM I 52,5 R HES [100K]
- CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N [9V 71K 13L 7S]
- CEM II/B-V 32,5 R [22V 78K]

6.1.2 Formulation et confection des bétons

6.1.2.1 Sélection des matériaux

Les différents matériaux constitutifs des bétons sont repris ci-dessous. Ceux-ci ont notamment été sélectionnés sur base des résultats des précédentes Tâches.

Il s'agit de :

- Deux **sables** roulés et quatre **granulats** concassés calcaires (cf. point suivant) ;
- Trois **ciments industriels de référence** (cf. point précédent) ;
- **Cinq nouveaux ciments ternaires K-V-L** sélectionnés et caractérisés à la Tâche 3, fabriqués par mélange de matériaux sous forme de poudre (quatre à base du filler pur et un à base du filler impur);
- Un **superplastifiant** liquide de 3^{ème} génération à base d'éther polycarboxylique modifié contenant 20% d'extrait sec (PCE) et dont le dosage recommandé par le fabricant est compris entre 0,4% et 2,1%.

6.1.2.2 Caractérisation des sables et des granulats pour les bétons

Les sables et granulats entrant dans la composition des bétons ont été sélectionnés et caractérisés au niveau de leur granulométrie et de leur absorption en eau. Il s'agit de deux types de sables roulés (0/1 et 0/4) et de quatre types de concassés calcaires (4/6, 6/10, 10/14 et 14/20). Des granulats calcaires ont été choisis étant donné que c'est le type de granulat le plus utilisé dans la construction en Belgique et aussi le plus abondant.

Les sables et granulats sélectionnés sont repris dans le Tableau 6-1 suivant, en comparaison avec les matériaux utilisés dans la première biennale CemCalc I [12, 13].

Référence	Granulat	CemCalc II	CemCalc I 1 ^{ère} série	CemCalc I 2 ^e série
2012/42/029	Sable roulé 0/1	X		
2011/40/016	Sable mer 0/2		X	
2011/40/017	Sable roulé 0/4	X		
2012/43/020	Sable roulé 0/4			X
2010/44/012	Sable mer 0/5		X	
2009/40/013	Concassé calcaire 4/6	X	X	X
2009/46/001	Concassé calcaire 6/10	X	X	X
2011/40/013	Concassé calcaire 10/14	X	X	X
2014/10/029	Concassé calcaire 14/20	X		
2011/40/038	Concassé calcaire 14/20		X	X

Tableau 6-1 – Sables et granulats utilisés pour la formulation des bétons CemCalc II et de la première biennale CemCalc I (1^{ère} et 2^e série)

6.1.2.2.1 *Masse volumique réelle et coefficient d'absorption en eau des granulats*

Les essais visant à déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats, et plus particulièrement la masse volumique réelle et le coefficient d'absorption en eau, ont été réalisés selon la norme NBN EN 1097-6 [14] (voir Annexe 2). Les résultats sont présentés dans le Tableau 6-2.

N° Echant.	Sables et granulats	Masse volumique réelle par séchage à l'étuve [Mg/m ³]	Coefficient d'absorption en eau [%]
2012/42/029	Sable roulé 0/1	2.68	0.00
2011/40/017	Sable roulé 0/4	2.66	0.40
2009/40/013	Concassé calcaire 4/6	/	0.92
2009/46/001	Concassé calcaire 6/10	/	0.46
2011/40/013	Concassé calcaire 10/14	2.75	1.00
2014/10/029	Concassé calcaire 14/20	2.67	0.50

Tableau 6-2 – Masse volumique réelle par séchage à l'étuve et coefficient d'absorption en eau des granulats

6.1.2.2.2 Granulométrie des granulats

Les essais visant à déterminer les caractéristiques géométriques des granulats, et plus particulièrement les analyses granulométriques par tamisage, ont été réalisés selon la norme NBN EN 933-1 [15] en effectuant un tamisage mécanique suivi d'un tamisage manuel jusqu'au moment critique (voir Annexe 3).

Les résultats sont présentés dans le Tableau 6-3 et à la Figure 6-1.

Tamis [mm]	Passant cumulé [%]					
	0/1	0/4	4/6	6/10	10/14	14/20
0.063	0.3	1.6	0.2	0.8	0.5	0.0
0.125	18.9	5.5	0.2	0.9	0.5	0.0
0.250	72.5	14.3	0.3	1.0	0.6	0.0
0.500	99.3	42.0	0.4	1.1	0.6	0.0
1.000	100.0	64.1	0.5	1.3	0.6	1.4
2.000		78.6	1.5	1.8	0.7	1.4
4.000		97.1	27.8	3.7	0.8	1.4
6.300		99.9	97.0	15.2	1.1	1.4
8.000		99.9	99.9	55.6	5.3	1.5
10.000		100.0	100.0	94.7	32.4	1.5
12.500				100.0	81.4	2.0
14.000					95.8	6.2
16.000					99.6	28.9
20.000					100.0	95.8
25.000						100.0

Tableau 6-3 – Analyses granulométriques par tamisage des granulats

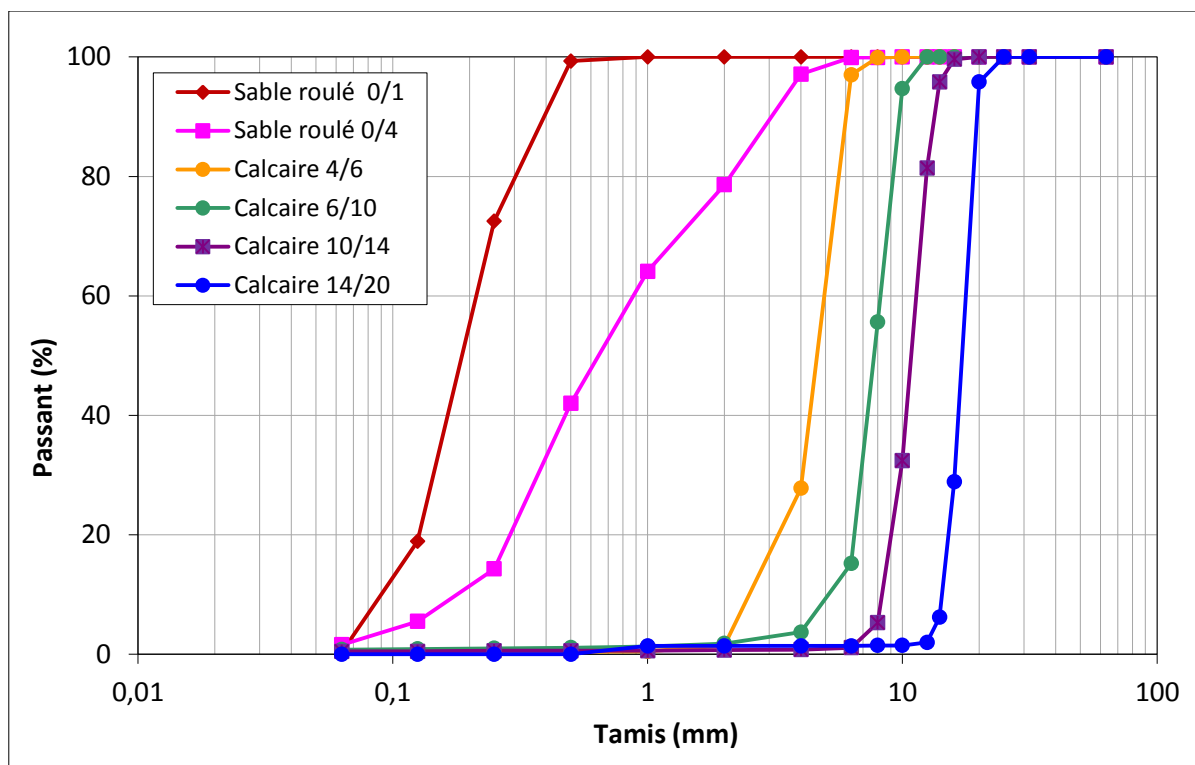


Figure 6-1 – Courbes granulométriques des granulats

6.1.2.3 Formulation des bétons

Dans un but comparatif, les caractéristiques de base des deux types de béton ont été choisies de manière à se rapprocher au maximum de celles qui ont été réalisées lors de la recherche européenne « CEM X » menée par le CRIC, en collaboration avec le cimentier Lafarge, sur l'étude de ciments ternaires clinker/matériaux cimentaires/filler calcaire [16]. Les caractéristiques des bétons de la recherche CEM X sont présentées au Tableau 6-4 suivant.

Caractéristiques	Béton 1	Béton 2
Ciment [kg/m ³]	300	340
Rapport E/C [kg/kg]	0,60	0,45
Classe de résistance	C20/25	C35/45
Slump [mm]	110 – 130	70 – 90
Dmax [mm]	20	20

Tableau 6-4 – Caractéristiques des deux types de béton de la recherche CEM X

Les compositions de CEM X proches des ciments ternaires étudiés dans cette recherche sont les suivantes :

- A3 [30V 64K 6L], proche du CEM 1 [30V 65K 5L]
- A4 [20V 50K 30L], comme le CEM 6 [20V 50K 30L]

Les caractéristiques des deux types de béton de la recherche CemCalc II sont reprises au Tableau 6-5 ci-dessous. Ces deux types de béton sont les mêmes que ceux de la première biennale. Par la suite, un troisième type de béton, de la classe d'environnement EE3 a été ajouté afin d'élargir encore plus la gamme de bétons, principalement pour étudier la durabilité.

Caractéristiques	Béton de type 1	Béton de type 2	Béton de type 3
Désignation	T(0,45)	T(0,55)	T(0,50)
Ciment [kg/m ³]	340	300	320
Rapport E/C [kg/kg]	0,45	0,55	0,50
Classe de résistance	C35/45	C25/30	C30/37
Classe d'environnement	EE4 Gel et agents de déverglaçage	EE2 Gel, mais pas de contact avec la pluie	EE3 Gel et contact avec la pluie (sans sels)
Classe d'exposition	XC4, XD3, XF4	XC3, XF1	XC4, XF1
Classe de consistance	S3	S4	S3 – S4
Dimension maximale des granulats	D ₂₀	D ₂₀	D ₂₀

Tableau 6-5 – Caractéristiques des trois types de béton

Sur base de la courbe granulométrique des six sables et granulats, le squelette granulaire des bétons a été déterminé de manière à se rapprocher au mieux de celui défini dans la norme NBN EN 480-1 [17]. Le squelette inerte des bétons ainsi que celui des bétons de la première biennale CemCalc (1^{ère} et 2^e séries) [12, 13] sont présentés ci-dessous :

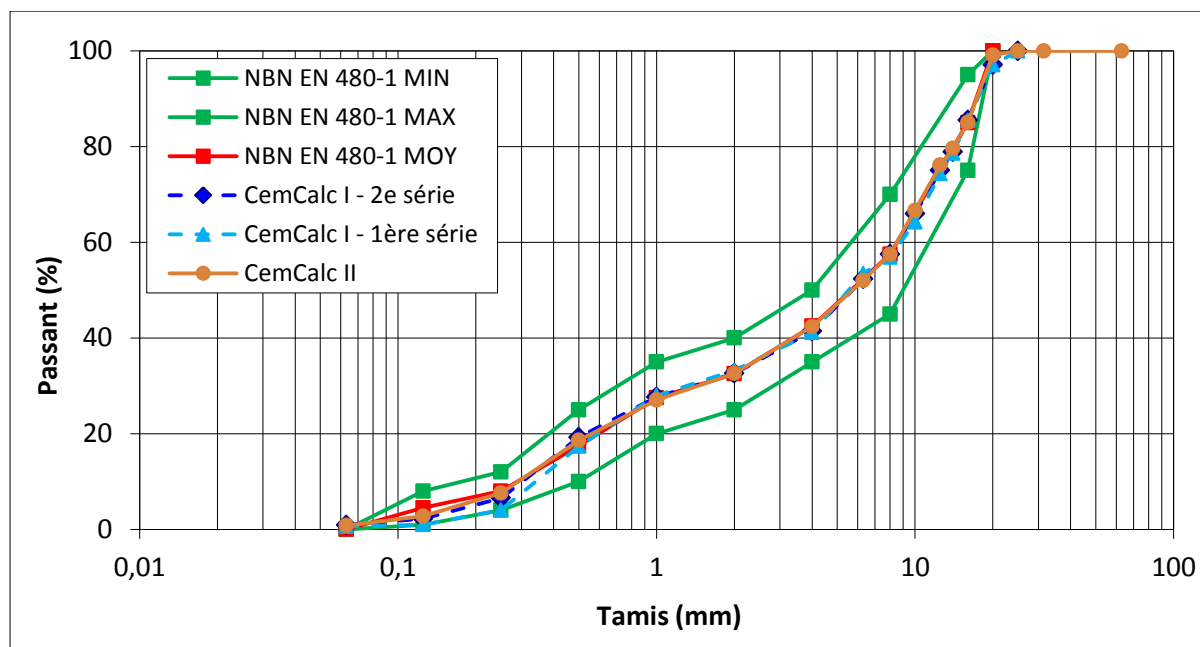


Figure 6-2 – Fuseau granulaire de la norme NBN EN 480-1 et squelettes granulaires des bétons CemCalc II et de la première biennale CemCalc I

Les courbes granulaires se superposent parfaitement à la courbe moyenne de la norme NBN EN 480-1 sauf au niveau des fines. Elles sont légèrement inférieures.

La courbe granulométrique de la recherche CEM X se trouve également dans le fuseau de la NBN EN 480-1 mais elle est différente. De 4 à 10 mm, la courbe suit la limite inférieure du fuseau et de 0,5 à 1 mm, elle suit la limite supérieure.

Ensuite, en vue d'obtenir les trois types de bétons présentés au Tableau 6-5, les compositions de ces bétons ont été calculées. Les formulations des trois types de béton sont reprises au Tableau 6-6.

Le dosage en superplastifiant sera optimisé pour chaque type de ciment, grâce à la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams (slump) selon la norme NBN EN 12350-2 [18], de manière à obtenir les différentes consistances visées.

L'eau de gâchage a été déterminée en tenant compte du rapport E_{eff}/C (0,45 ; 0,55 ou 0,50) augmenté de l'eau absorbée par les granulats (voir coefficients d'absorption en eau des granulats au Tableau 6-2) et diminué de l'eau ajoutée avec le superplastifiant en considérant un dosage de 1,5%.

Constituants [kg/m ³]	Béton de type 1 E/C de 0,45	Béton de type 2 E/C de 0,55	Béton de type 3 E/C de 0,50
Ciment	340	300	320
Sable roulé 0/1	54	54	54
Sable roulé 0/4	685	688	685
Concassé calcaire 4/6	201	201	201
Concassé calcaire 6/10	207	207	207
Concassé calcaire 10/14	341	342	341
Concassé calcaire 14/20	397	399	397
Superplastifiant PCE (*)	5.1	4.5	4.8
Eau réellement ajoutée ($E_{eff} + E_{granulats} - E_{SP}$)	160	172	167
TOTAL	+/- 2389	+/- 2368	+/- 2377

(*) Correspond à un dosage de 1,5% utilisé pour la formulation. Le dosage réel sera déterminé lors des essais pour obtenir la consistance visée.

Tableau 6-6 – Formulations calculées des bétons pour un volume d'un m³ et un dosage moyen recommandé en superplastifiant

6.1.2.4 Confection des bétons

La confection des bétons a été réalisée au CSTC en utilisant un malaxeur de marque EIRICH (type R09T) qui permet un volume de mélange (gâchée) compris entre 60 et 100 litres (voir Figure 6-3).

La procédure de malaxage consiste à mélanger les constituants secs (sables, concassés calcaires, ciment) pendant 30 secondes, puis à ajouter l'eau et enfin le superplastifiant en

quantité suffisante pour obtenir l'affaissement visé. La durée totale de malaxage est fixée à 3 minutes et 30 secondes.

Les moules sont remplis en une seule fois et vibrés à la table vibrante pendant 7 à 10 secondes, sauf pour la mesure de la teneur en air (remplissage en 3 couches et temps de vibration total de 10 secondes). Les échantillons sont ensuite protégés par une feuille plastique pour éviter la dessiccation et conservés pendant 24 heures à $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Ils sont ensuite démoulés (environ 24 heures après le coulage) puis placés sous eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pour une durée variable en fonction du type d'essai que l'échantillon subira.



Figure 6-3 – Malaxeur EIRICH utilisé pour la confection des bétons

6.1.2.5 Cure des bétons

Suite à la décision du comité d'accompagnement, il a été décidé de réaliser deux cures : une **bonne cure** et une **mauvaise cure**, comme indiqué dans le Tableau 6-7 suivant.

La norme NBN B15-100 (2008) [19] distingue deux cures pour les essais de durabilité : une cure « idéale » de 55 jours sous eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et une cure « non idéale » de 55 jours en chambre climatique à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $60 \pm 5\%$ d'humidité. La nouvelle version de norme NBN B 15-100 en cours de révision prévoit quant à elle des cures de 28 jours. La durée de 91 jours de cure idéale pour cette recherche a été choisie afin de pouvoir comparer les performances des matériaux et de classer les différentes compositions de ciment dans des conditions idéales. C'est également la durée de cure utilisée dans la première biennale CemCalc I et la recherche CEM X.

La mauvaise cure a donc été rajoutée par rapport à ce qui était prévu initialement et constitue également une nouveauté par rapport à la première biennale CemCalc I.

Type de cure	CemCalc I	CemCalc II	NBN B 15-100 (2008)	Révision en cours de la NBN B 15-100
Bonne cure : sous eau à 20°C	91 jours	91 jours	55 jours	28 jours
Mauvaise cure : en chambre climatique (20°C et 60% HR)	/	28 jours	55 jours	28 jours

Tableau 6-7 – Types de cure pour les essais de durabilité

Vu le nombre important d'essais réalisés dans cette recherche, plusieurs gâchées ont été nécessaires pour chaque composition. Dès lors, des cubes de contrôle sont coulés pour vérifier la résistance en compression à 28 jours des deux gâchées.

- Pour le béton de type 1, deux gâchées pour la **bonne cure** et une gâchée pour la **mauvaise cure** ont été réalisées.
- Pour le béton de type 2, deux gâchées ont été réalisées (**bonne cure**).
- Pour le béton de type 3, une gâchée a suffi pour les quelques essais supplémentaires de compression, carbonatation et gel interne (**bonne cure**).

6.1.3 Confection et cure des mortiers

6.1.3.1 Attaque sulfatique à 20°C

Pour l'étude comparative de la résistance aux sulfates à 20°C (Tâche 6.3), des mortiers ont été réalisés avec les cinq nouveaux ciments et les trois ciments industriels de référence énumérés au point 6.1.1.

La confection de ces mortiers a été réalisée au CSTC à l'aide d'un malaxeur de marque CONTROLAB (voir Figure 6-4), conformément à la norme NBN EN 196-1 [20]. Les mortiers contiennent en poids : une part de ciment, une demi-part d'eau et trois parts de sable normalisé. Le rapport eau/ciment est donc de 0,50. La composition d'un volume simple de mortier est reprise au Tableau 6-8.

Ciment	450 ± 2 g
Eau	225 ± 1 g
Sable normalisé CEN	1350 ± 5 g
Rapport E/C	0.50

Tableau 6-8 – Composition d'un volume simple de mortier



Figure 6-4 – Malaxeur CONTROLAB utilisé pour la confection des mortiers

Le sable utilisé est un sable standard certifié CEN EN 196-1 pré-emballé et l'eau est déminéralisée. La conservation des matières premières et la confection des mortiers ont lieu dans un local climatisé à 20°C et à 50% d'humidité relative.

Le mortier est coulé dans des moules prismatiques de dimensions 2 x 2 x 16 cm³. Les échantillons sont ensuite protégés par une plaque en verre pour éviter la dessiccation, démoulés après 24 heures puis placés sous eau à 20 ± 2°C pendant 28 jours.

6.1.3.2 Attaque sulfatique à 5°C

Pour l'étude comparative de la résistance aux sulfates à 5°C (Tâche 6.3), des mortiers ont également été réalisés avec les cinq nouveaux ciments CEM-v2 et les trois ciments industriels de référence énumérés au point 6.1.1

Les mortiers ont été fabriqués par le CRIC selon la procédure suivante :

- Introduction de 225 ± 1 g d'eau déminéralisée maintenue à 20°C suivi de 450 ± 2 g de ciment (E/C = 0.5).
- Malaxage pendant 30 secondes à vitesse lente (62 ± 5 tours/minute).
- Introduction de 1350 ± 5 g de sable DIN dans le malaxeur.
- Malaxage pendant 30 secondes à vitesse rapide (125 ± 10 tours/minute).
- Arrêt de 90 secondes pour racler les bords du bol du malaxeur.
- Malaxage de 60 secondes à vitesse rapide (125 ± 10 tours/minute).
- Répartition de la quantité de mortier obtenue :
 - dans 5 emplacements (pour 5 éprouvettes) d'un moule de 2*2*28 cm³ pour les mesures du module d'élasticité ;
 - dans 4 emplacements (pour 4 éprouvettes) d'un moule de 2*2*16 cm³ pour les mesures sonores.
- Moulage sur table vibrante pendant 2 minutes.
- Stockage des moules dans des armoires humides du laboratoire essais ciments à 20°C.

- Démoulage à 24h. Lorsque, au terme de 24h, le mortier n'a pas atteint la résistance requise pour le manipuler sans risque de dégradation, le décoffrage peut être reporté de 24h. Il convient toutefois de le mentionner.
- Conservation durant 28 jours (comptés à partir du jour de la confection) à 20°C, dans une eau saturée en chaux.

6.1.4 Conclusions

Les sables et granulats entrant dans la composition des bétons ont été sélectionnés et caractérisés en ce qui concerne leur masse volumique réelle, leur coefficient d'absorption en eau et leur granulométrie par tamisage. Ces résultats ont permis de déterminer le squelette granulaire des bétons, en se basant sur les fuseaux granulaires définis dans la norme NBN EN 480-1 [17].

Deux types de béton, aux caractéristiques proches de ceux de la recherche CEM X [16], ont été choisis (béton de type 1 : E/C de 0,45 et 340 kg/m³ de ciment ; béton de type 2 : E/C de 0,55 et 300 kg/m³ de ciment) et leur formulation de base a été définie. Un troisième type de béton a été ajouté (E/C de 0,50 et 320 kg/m³) afin d'élargir la gamme de bétons étudiés.

Des mortiers normalisés (NBN EN 196-1 [20]) et les bétons ont ainsi été confectionnés avec les cinq nouveaux ciments ternaires (dont un ciment avec un filler impur), sélectionnés à la Tâche 3, et les trois ciments industriels de référence, destinés aux études comparatives de performances physico-mécaniques (Tâche 6.2) et de durabilité (Tâche 6.3).

6.2 Tâche 6.2 – Performances physico-mécaniques

6.2.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de comparer les performances physico-mécaniques des bétons à base des cinq nouveaux ciments (sélectionnés et confectionnés à la Tâche 3) avec celles des bétons à base des ciments industriels de référence. La confection de ces bétons est décrite en Tâche 6.1.

L'étude comparative a été réalisée sur base des essais suivants, spécifiés dans la norme NBN B15-100 pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de nouveaux ciments [19] (sauf pour les essais sur béton frais et de prise) :

- **Essais sur béton frais** (affaissement, masse volumique et teneur en air) ;
- **Prise** selon la méthode Kelly-Bryant de la norme NBN B 15-204 [21] ;
- **Résistance en compression** à différents âges (2, 7, 28 et 91 jours) selon la norme NBN EN 12390-3 [11] ;
- **Résistance en flexion** à 28 jours selon la norme NBN EN 12390-5 [22] ;
- **Résistance à la traction par fendage** à 28 jours selon la norme NBN EN 12390-6 [23] ;
- **Module d'élasticité** selon la norme NBN B 15-203 [24] ;
- **Fluage** selon la norme NBN B 15-228 [25] ;
- **Retrait** selon la norme NBN B 15-216 [26].

Le Tableau 6-9 reprend l'ensemble des essais mécaniques effectués sur chaque composition de béton ainsi que les cures appliquées pour chacun d'eux.

La méthodologie suivie pour l'interprétation des résultats est la suivante :

- Les résultats obtenus avec les nouveaux ciments ternaires K-V-L sont comparés aux ciments de référence ;
- Les facteurs d'influence (composition) sont analysés sur base de leur coefficient de corrélation linéaire⁵, en considérant un facteur de corrélation supérieur à 0,75 comme étant significatif ;
- Les influences de la cure ainsi que de la présence de filler impur sont également analysés ;
- Les résultats sont comparés avec les résultats obtenus dans la recherche précédente CemCalc I sur les nouveaux ciments ternaires K-S-L ;
- Les résultats sont aussi comparés avec ceux de la recherche CEM X ainsi que des recherches effectuées dans le passé (Filltech, BeSlag, Cendres Volantes, Gel-dégel et Attaque sulfatique) ;
- Les critères de la norme NBN B 15-100 sont appliqués ;
- Les résultats sont confrontés à ce qui se trouve dans la littérature (ouvrages de référence comme le Neville, articles scientifiques, etc.).

⁵ Il est à noter qu'un coefficient de corrélation nul ne signifie pas l'absence de toute relation entre les deux grandeurs. Il peut exister une relation non linéaire entre elles. En outre, l'existence d'une corrélation, aussi bonne soit elle, n'est jamais la preuve d'une relation de cause à effet (P. Magain, Institut Astro, ULg, in http://www.astro.ulg.ac.be/cours/magain/STAT/Stat_Main_Fr/Home.html, consulté le 1/10/15).

Béton	Ciment	E_{eff}/C	Prise	Rc	Rf	Rt	Mod E	Fluage	Retrait	Rc
TYPE 1 ($E/C = 0.45$ et $C = 340$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.45	•	•	•	•	•		•	•
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.45	•	•	•	•	•		•	
	CEM II/B-V 32.5 R	0.45	•	•	•	•	•	•	•	•
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.45	•	•	•	•	•		•	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.45	•	•	•	•	•		•	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.45	•	•	•	•	•	•	•	•
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.45	•	•	•	•	•		•	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.45	•	•	•	•	•	•	•	•
TYPE 2 ($E/C = 0.55$ et $C = 300$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.55		•	•	•	•		•	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.55		•	•	•	•		•	
	CEM II/B-V 32.5 R	0.55		•	•	•	•		•	
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.55		•	•	•	•		•	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.55		•	•	•	•		•	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.55		•	•	•	•		•	
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.55		•	•	•	•		•	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.55		•	•	•	•		•	
TYPE 3 ($E/C = 0.50$ et $C = 320$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.50		•						
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.50		•						
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.50		•						
CURE			Pas de cure	28 jours sous eau à 20°C		7 jours sous eau à 20°C + 21 jours en CC à 20°C et 60% HR			Mauvaise cure : 28 j CC 20°C	

Tableau 6-9 – Récapitulatif des essais mécaniques effectués sur les trois types de béton
CC = chambre climatique

6.2.2 Caractérisation des bétons à l'état frais

6.2.2.1 Essais et résultats

Les caractéristiques suivantes ont été déterminées sur les bétons frais :

- **Masse volumique** selon la norme NBN EN 12350-6 [9];
- **Teneur en air** selon la norme NBN EN 12350-7 [10] ;
- **Consistance**, par la mesure d'affaissement au cône d'Abrams selon la norme NBN EN 12350-2 [8].

Le Tableau 6-10 reprend les principales caractéristiques des compositions de béton, le dosage en superplastifiant (SP) (en % de ciment) nécessaire à l'obtention de l'affaissement visé (120 ± 30 mm pour le béton de type 1, 180 ± 30 mm pour le béton de type 2 et 150 ± 30 mm pour le béton de type 3), ainsi que la masse volumique et la teneur en air des bétons frais.

Comme mentionné au point 6.1.2.4, plusieurs gâchées ont dû être confectionnées pour obtenir l'ensemble des éprouvettes nécessaires aux différents tests. C'est pourquoi

plusieurs résultats d'affaissement, de masse volumique et de teneur en air sont présentés par ciment.

Béton	Ciment	E_{eff}/C	Ciment [kg/m ³]	PCE [%]	Affaissement [mm]	MV [kg/m ³]	Air [%]
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.45	340	2	110 / 210 / 210	2400 / 2406 / 2414	2.65 / 2 / 1.55
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.45	340	1	70 / 110	2404 / 2394	2.4 / 2
	CEM II/B-V 32.5 R	0.45	340	0.85	90 / 100 / 120	2344 / 2363 / 2356	3.6 / 3 / 2.5
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.45	340	1.2	120 / 145	2369 / 2369	1.9 / 2.2
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.45	340	0.7	130 / 140	2397 / 2364	1.5 / 1.9
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.45	340	0.7	90 / 110 / 105	2377 / 2406 / 2378	2.5 / 1.9 / 2.2
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.45	340	1	95 / 125	2396 / 2360	2.1 / 1.96
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.45	340	1.4	110 / 140 / 160	2345 / 2359 / 2359	3.3 / 3.2 / 2.5
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.55	300	1.3	170 / 170	2401 / 2391	1.8 / 1.7
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.55	300	0.6	180 / 140	2380 / 2390	1.4 / 1.8
	CEM II/B-V 32.5 R	0.55	300	0.6	170 / 160	2361 / 2353	1.6 / 1.4
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.55	300	0.8	180 / 200	2386 / 2363	1.4 / 1.3
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.55	300	0.6	160 / 160	2367 / 2376	1.5 / 1.4
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.55	300	0.6	180 / 200	2356 / 2362	1.4 / 1.4
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.55	300	0.7	190 / 190	2374 / 2371	1.4 / 1.6
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.55	300	1.2	170 / 190	2346 / 2376	2.6 / 1.7
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.50	320	1	160	2400	2
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.50	320	0.7	170	2381	2
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.50	320	0.7	170	2362	1.8

Tableau 6-10 – Résultats des essais sur béton frais (1^{ère} gâchée / 2^e gâchée / 3^e gâchée) pour les trois types de béton

Les Figure 6-5 et Figure 6-6 illustrent respectivement la mesure de la consistance du béton frais par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams ainsi que l'appareil de mesure de la teneur en air.



Figure 6-5 – Mesure de la consistance du béton frais par l'essai d'affaissement au cône d'Abrams



Figure 6-6 – Appareil de mesure de la teneur en air du béton frais

Le ciment de référence CEM I 52,5 R HES a également été utilisé dans la première biennale **CemCalc I**. Le Tableau 6-11 suivant présente les résultats de ce béton de référence à l'état frais des recherches CemCalc II et CemCalc I. Il existe une différence importante, en particulier pour le dosage en superplastifiant. La seule différence entre ces bétons est la courbe granulométrique, comme illustrée à la Figure 6-2. La courbe granulométrique de cette présente recherche comporte un peu plus d'éléments fins. Cela pourrait expliquer le dosage plus important pour les bétons de CemCalc II.

Béton	Ciment	PCE [% de ciment]		Affaissement [mm]		MV [kg/m ³]		Air [%]	
		II	I	II	I	II	I	II	I
Type 1	CEM I 52,5 R	2	0.8	110 / 210 / 210	110 / 170	2400 / 2406 / 2414	2389 / 2403	2.65 / 2 / 1.55	3.2 / 2.7
Type 2	HES	1.3	0.25	170 / 170	175	2401 / 2391	2398	1.8 / 1.7	1.9

Tableau 6-11 – Comparaison des essais sur béton frais pour le béton de référence à base de CEM I 52,5 R HES des recherches CemCalc II et CemCalc I

De manière générale, les dosages en superplastifiant dans la recherche CemCalc I avec les nouveaux ciments K-S-L sont plus faibles que ceux de CemCalc II. Ils étaient de l'ordre de 0,2 – 0,3%.

6.2.2.2 Conclusions

Les constatations sont les suivantes :

- Pour les **affaissements**, la marge de 30 mm, qui correspond à la tolérance admise par la norme NBN EN 206 [27], a été dépassée pour certains bétons de type 1.
- Les **affaissements** obtenus présentent une certaine variabilité entre les gâchées. Ceci s'explique par le fait que lors de la première gâchée, le dosage en SP est ajusté, en une ou deux fois, afin d'obtenir l'affaissement visé. Pour la 2^e gâchée, le dosage en SP total est ajouté en une seule fois, entraînant généralement un affaissement plus important que la 1^{ère} gâchée.
- La fourchette de **dosage en superplastifiant (SP)** varie fortement selon les types de béton : elle est assez large pour les bétons de type 1 (de 0,7 à 1,4%) ; elle est très étroite pour les bétons de type 2 (de 0,6 à 0,8%) et étroite également pour les bétons de type 3 (de 0,7 à 1%). Toutefois, ces fourchettes restent dans la plage recommandée par le fabricant (de 0,4 à 2,1%).
- Les **dosages en SP** des bétons à base des nouveaux ciments ternaires sont inférieurs ou restent dans la gamme des dosages des bétons confectionnés avec les ciments de référence.
- Les **dosages en SP** sembleraient être corrélés aux résultats de consistance normalisée sur pâte de ciment déterminés à la Tâche 3. La consistance normalisée indique une quantité d'eau à ajouter à la pâte pour obtenir une consistance visée. Une plus grande quantité de SP serait nécessaire lorsque la consistance normalisée augmente.
- La présence de **filler impur** semble nécessiter un plus grand dosage en SP, lorsque l'on compare les ciments CEM 6 et CEM 6 FI. Cela a également été observé dans la

recherche FILLTECH : une teneur plus élevée en particules argileuses augmente la demande en eau [28].

- Les **masses volumiques** obtenues sont proches des masses volumiques théoriques calculées au Tableau 6-6 sur base des formulations des bétons. Les rendements calculés ($MV_{\text{théorique}}/MV_{\text{réelle}}$) restent dans la gamme autorisée de 0,98 – 1,02 selon le TRA 550 [29]. De manière générale, les masses volumiques ont tendance à diminuer lorsque la teneur en cendres volantes augmente.
- Certaines **teneurs en air** présentent des valeurs supérieures à 3% (pour le béton de type 1). Ces résultats correspondent à une masse volumique minimum de 2344 kg/m³. La teneur en air moyenne des bétons de type 1 est de 2,3%, contre 1,6% pour les bétons de type 2 et 1,9% pour les bétons de type 3. Une teneur en air plus élevée semblerait être corrélée à une consistance plus faible.

De manière générale, lorsque l'on compare les bétons à base nouveaux ciments ternaires, la teneur en air a tendance à augmenter lorsque le dosage en PCE augmente et lorsque la masse volumique diminue.

En conclusion, les nouveaux ciments ternaires ne nécessitent pas un dosage plus important en superplastifiant que les ciments industriels de référence pour atteindre la consistance visée. Cela est en accord avec les résultats de la Tâche 5 précédente.

Il apparaît que le dosage du superplastifiant PCE utilisé (à base d'éther polycarboxylique) nécessaire à l'obtention de l'affaissement visé varie fortement pour les bétons de type 1 (généralement, en fonction de la teneur en clinker). Les ciments ternaires K-V-L sont donc assez sensibles au dosage du superplastifiant, contrairement aux ciments ternaires K-S-L de la première biennale CemCalc I.

6.2.3 Essai de prise

6.2.3.1 Principe et conditions de l'essai

L'essai de prise est réalisé selon la méthode d'arrachement « Kelly-Bryant » de la norme NBN B 15-204 [21]. Celle-ci permet de suivre dans le temps l'évolution du béton au cours de sa prise et consiste à mesurer la force nécessaire pour arracher une à une des tiges métalliques noyées dans le béton. Ces tiges sont retirées à intervalles réguliers et les forces d'arrachement sont mesurées par l'intermédiaire d'un dynamomètre.

Après malaxage, le béton est ainsi coulé dans deux moules de dimensions 15 x 15 x 60 cm³ équipés de 10 tiges en acier inoxydable (diamètre de 10 ± 0,1 mm et longueur de 220 ± 1 mm) et d'un système de guidage permettant de maintenir les tiges en place lors du coulage et du serrage du béton (voir Figure 6-7). Directement après serrage, le dispositif de guidage est enlevé et, environ 4h après le malaxage, les tiges sont arrachées successivement à intervalles plus ou moins réguliers à l'aide d'une presse ZWICK, équipée d'un contrôle et d'un entraînement électriques et de charge maximale égale à 20 kN (voir Figure 6-8).



Figure 6-7 – Moule 15 x 15 x 60 cm³ pour l'essai de prise Kelly-Bryant



Figure 6-8 – Réalisation de l'essai de prise Kelly-Bryant

6.2.3.2 Résultats obtenus

Les résultats pour les huit compositions de béton de type 1 (E/C de 0,45 et 340 kg/m³ de ciment) sont donnés à la Figure 6-9.

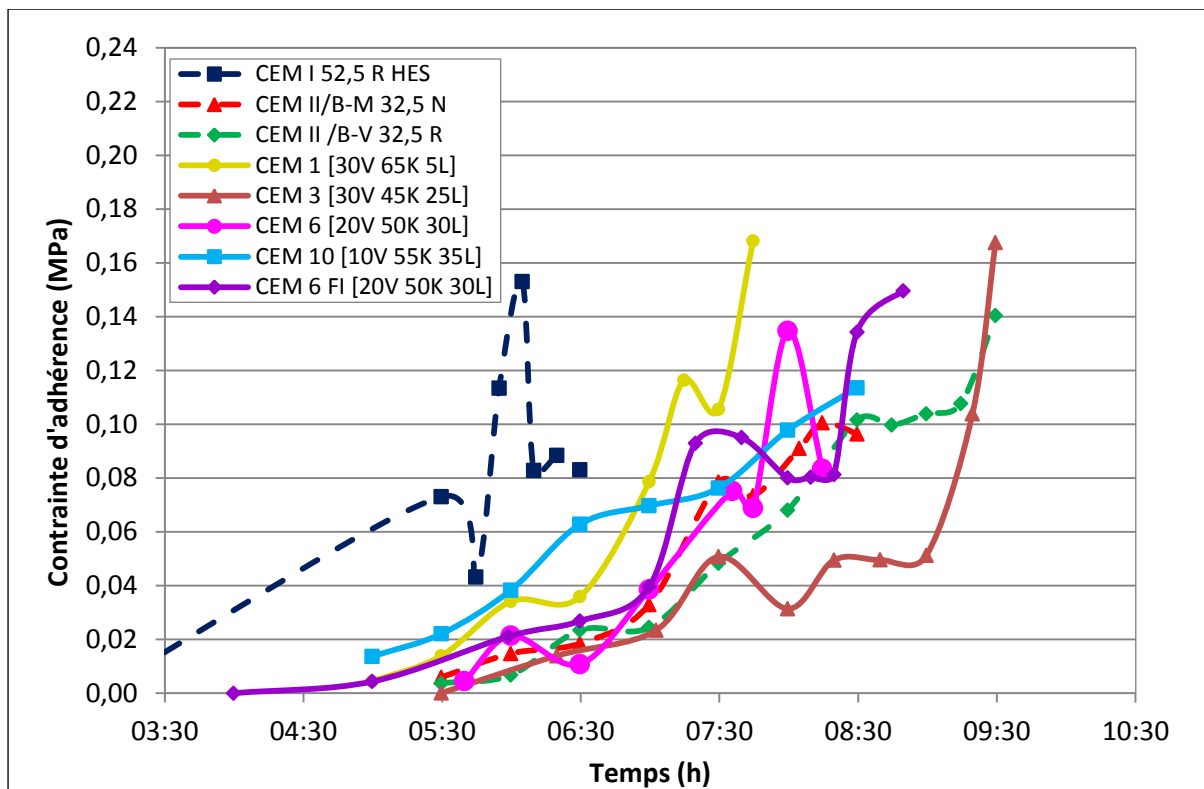


Figure 6-9 – Essais de prise Kelly-Bryant des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³)

Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L présentent un temps de prise **intermédiaire** entre le béton à base de CEM I 52,5 R HES et ceux à base de CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N et de CEM II/B-V 32,5 R, excepté pour le béton à base de ciment ternaire CEM 3.

Le temps de prise des bétons semble être proportionnel à la **teneur en clinker** des ciments. A la Tâche 5, des essais de prise sur mortiers à E/C variable ont été réalisés. L'influence de la teneur en clinker avait également été observée.

La présence de **filler impur** (CEM 6 FI) ne semble pas avoir d'influence significative.

Dans la première biennale de **CemCalc** [12] sur l'étude des ciments ternaires K-S-L, les bétons à base des ciments ternaires présentaient également un temps de prise situé dans la gamme des bétons de référence. Leur vitesse de prise était inversement proportionnelle à la teneur en filler calcaire dans les nouveaux ciments.

La recherche **CEM X** n'a pas réalisé d'essai de prise sur béton.

Enfin, si on se réfère à la norme **NBN B 15-100** [19] définissant une méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de ciments et d'additions de type II destinés au béton, en ce qui concerne la vitesse de durcissement, celle-ci préconise de déterminer le facteur s du paragraphe 3.1.2 de la norme NBN EN 1992-1-1 « Eurocode 2 » [30]. Ce facteur est un coefficient qui dépend du type de ciment.

Il vaut :

- 0.20 pour les ciments de classe de résistance CEM 42.5 R, 52.5 N et 52.5 R (Classe R) ;
- 0.25 pour les ciments de classe de résistance CEM 32.5 R et 42.5 N (Classe N) ;
- 0.38 pour les ciments de classe de résistance CEM 32.5 N (Classe S).

Le Tableau 6-12 reprend la classe de résistance de chaque ciment (norme NBN EN 197-1 [4]), déterminée sur base des essais mécaniques effectués sur mortier par le CRIC (voir Figure 3-16 et Tableau 3-17 de la Tâche 3), et le coefficient s correspondant.

Ciment	Classe de résistance du ciment	Coefficient s (NBN EN 1992-1-1)
CEM I 52,5 R HES	52.5 R	0.20
CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	32.5 N	0.38
CEM III/A 32,5 R	32.5 R	0.25
CEM 1 [30V 65K 5L]	52.5 N	0.20
CEM 3 [30V 45K 25L]	-	-
CEM 6 [20V 50K 30L]	32.5 R	0.25
CEM 10 [10V 55K 35L]	32.5 R	0.25
CEM 6 [20SV 50K 30L] – FI	-	-

Tableau 6-12 – Classe de résistance et coefficient s des ciments

Les nouveaux ciments ternaires K-V-L sont de classe R ($s = 0.20$) ou de classe N ($s = 0.25$), excepté les ciments CEM 3 et CEM 6 qui n'entrent dans aucune classe de résistance.

6.2.4 Résistance à la compression

6.2.4.1 Principe et conditions de l'essai

La résistance en compression est déterminée sur trois cubes de dimensions 15 x 15 x 15 cm³ selon la norme NBN EN 12390-3 [11], au moyen d'une machine TONI-MFL équipée d'un vérin servo-hydraulique d'une capacité de 4000 kN asservi en force (voir Figure 6-10).

Après démoulage, les cubes sont conservés sous eau à une température de 20 ± 2°C jusqu'à la date d'essai. Certains cubes ont également subi une mauvaise cure pour les essais supplémentaires de durabilité sur certains bétons. Le béton est âgé de 2, 7, 28 et 91 jours au moment des essais.

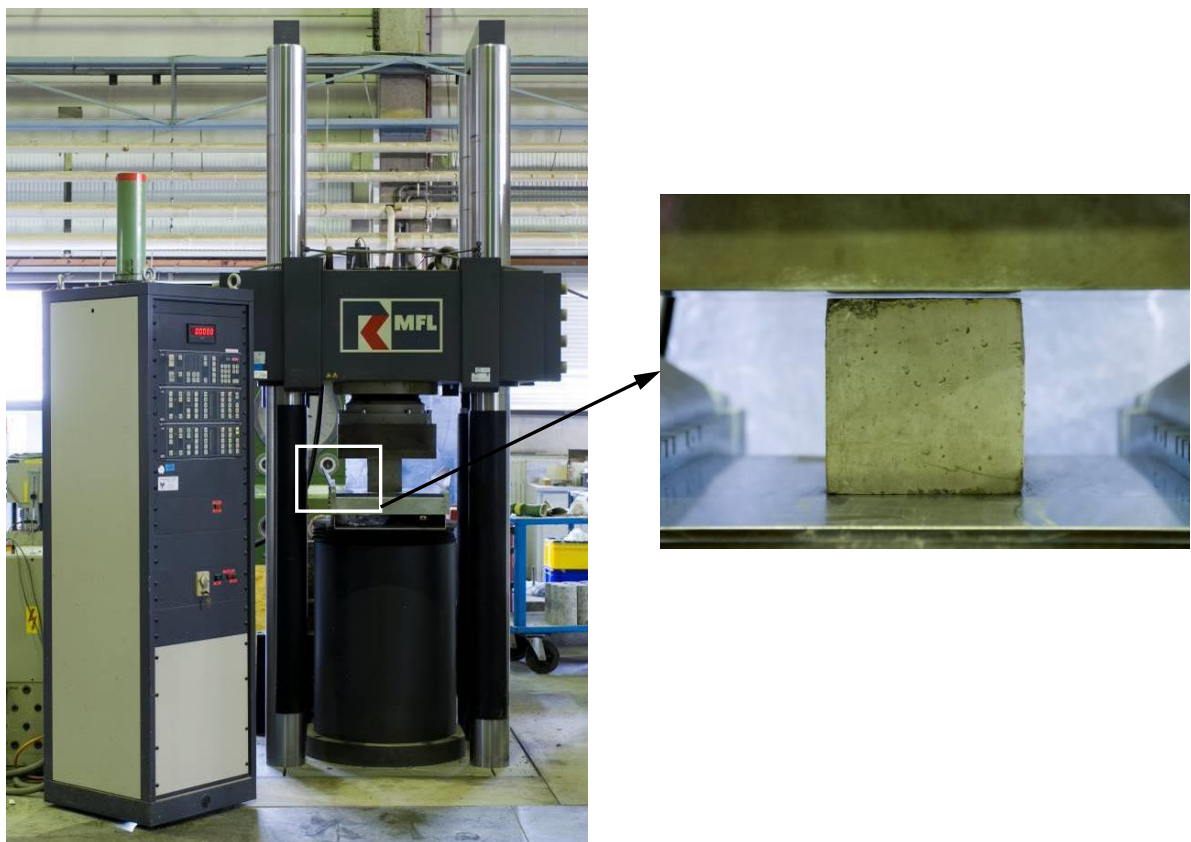


Figure 6-10 – Réalisation de l'essai de compression sur cube

6.2.4.2 Résultats obtenus

Les résistances en compression moyennes sont données au Tableau 6-13 et Tableau 6-14 pour les bétons ayant subi une mauvaise cure (moyennes sur 3 cubes). Ceux-ci renseignent également :

- La résistance caractéristique sur cylindre à 28 jours, calculée selon la norme NBN B 15-100 [19] :

$$f_{ck,cyl} = (f_{cm,cube} / 1.2) - 8$$

Pour la classe de résistance C35/45 visée pour les bétons de type 1, la résistance caractéristique déterminée sur cylindre doit être supérieure ou égale à 35 N/mm².

Pour la classe de résistance C25/30 visée pour les bétons de type 2, celle-ci doit être

supérieure ou égale à 25 N/mm². Enfin, pour la classe de résistance C30/37 visée pour les bétons de type 3, celle-ci doit être supérieure ou égale à 30 N/mm².

- L'évolution de la résistance en compression, c'est-à-dire le rapport de la résistance moyenne à 2 jours à la résistance moyenne à 28 jours : $r = f_{cm2}/f_{cm28}$

Il s'agit d'une donnée utile pour déterminer la durée minimale de cure à appliquer et les délais de décoffrage selon l'annexe F de la norme NBN B 15-400 (annexe nationale belge) [31]. Cette prénorme définit 4 catégories pour l'évolution de la résistance :

- Très lente si $r < 0.15$
- Lente si $0.15 \leq r < 0.30$
- Moyenne si $0.30 \leq r < 0.50$
- Rapide si $r \geq 0.50$

Béton	Ciment	Résistance en compression moyenne $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]				$r = f_{cm2} / f_{cm28}$	Résistance caractéristique à 28 jours $f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]
		f_{cm2}	f_{cm7}	f_{cm28}	f_{cm91}		
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	57.4	71.8	81.6 / 78.8	88.9	0.72	58.8
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	22.7	40.1	48.5 / 47.2	63.7	0.47	31.9
	CEM II/B-V 32.5 R	26.4	40.2	53.0 / 53.7	63.6	0.49	36.5
	CEM 1 [30V 65K 5L]	33.5	44.7	56.6 / 59.1	69.6	0.58	40.2
	CEM 3 [30V 45K 25L]	16.2	23.4	-° / 35.1	40.2	0.46	21.2
	CEM 6 [20V 50K 30L]	20.3	28.4	40.5 / 33.1*	49.1	0.55	22.7
	CEM 10 [10V 55K 35L]	27.3	35.8	43.6 / 42.2	54.6	0.64	27.8
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	18.2	26.9	34.4 / 35.5	45.3	0.52	21.1
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	42.7	55.1	65.9 / 64.0	73.9	0.66	46.1
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	13.2	20.2	34.3 / 35.4	44.0	0.38	21.0
	CEM II/B-V 32.5 R	15.9	28.8	40.9 / 39.5	52.1	0.40	25.5
	CEM 1 [30V 65K 5L]	19.4	29.2	35.1 / 37.8	48.3	0.53	22.4
	CEM 3 [30V 45K 25L]	9.6	12.5	20.8 / 19.9	29.1	0.47	9.0
	CEM 6 [20V 50K 30L]	11.0	15.7	23.7 / 24.3	30.9	0.46	12.0
	CEM 10 [10V 55K 35L]	15.1	22.0	21.5* / 26.5	35.5	0.63	12.0
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	10.6	-°	23.2 / 24.1	32.4	0.45	11.7
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	-	-	70.1	-	-	50.4
	CEM 1 [30V 65K 5L]	-	-	43.5	-	-	28.3
	CEM 6 [20V 50K 30L]	-	-	29.5	-	-	16.6

° Valeur aberrante

* Valeur à confirmer

Tableau 6-13 – Résistances en compression des trois types de béton (1^{ère} gâchée / 2^e gâchée) ayant subi une bonne cure

Valeur bleue : classe de résistance visée non atteinte

Béton	Ciment	Résistance en compression moyenne $f_{cm,cube}$ [N/mm ²]				$r = f_{cm2} / f_{cm28}$	Résistance caractéristique à 28 jours $f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]
		f_{cm2}	f_{cm7}	f_{cm28}	f_{cm91}		
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	-	-	78.3	-	-	57.3
	CEM II/B-V 32.5 R	-	-	48.6	-	-	32.5
	CEM 6 [20V 50K 30L]	-	-	34.5	-	-	20.8
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	-	-	37.5*	-	-	23.3

* Valeur à confirmer

Tableau 6-14 – Résistances en compression des bétons de type 1 ayant subi une mauvaise cure
Valeur bleue : classe de résistance visée non atteinte

Certaines valeurs à 28 jours paraissent trop faibles (CEM 6 type 1 ou CEM 10 type 2) ou trop élevées (CEM 6 FI type 1 mauvaise cure) et sont à confirmer. D'autres valeurs aberrantes ont été supprimées (CEM 3 type 1 à 28 jours et CEM 6 FI type 2 à 7 jours).

Les évolutions des résistances sont toutes moyennes ($0,30 \leq r < 0,50$) à rapides ($r \geq 0,50$). Il n'est donc pas nécessaire de prévoir une longue cure et les délais de décoffrage ne seront pas augmentés. Elles sont illustrées aux Figure 6-11 (béton de type 1) et Figure 6-12 (béton de type 2).

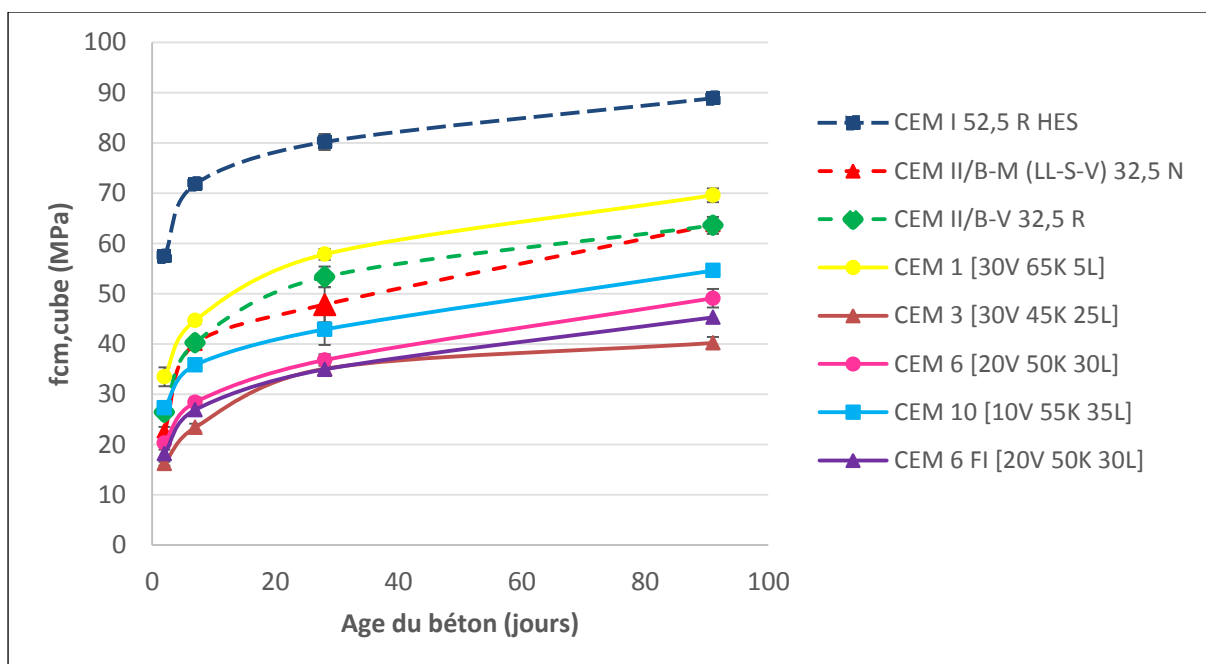


Figure 6-11 – Evolution des résistances en compression moyennes des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³)

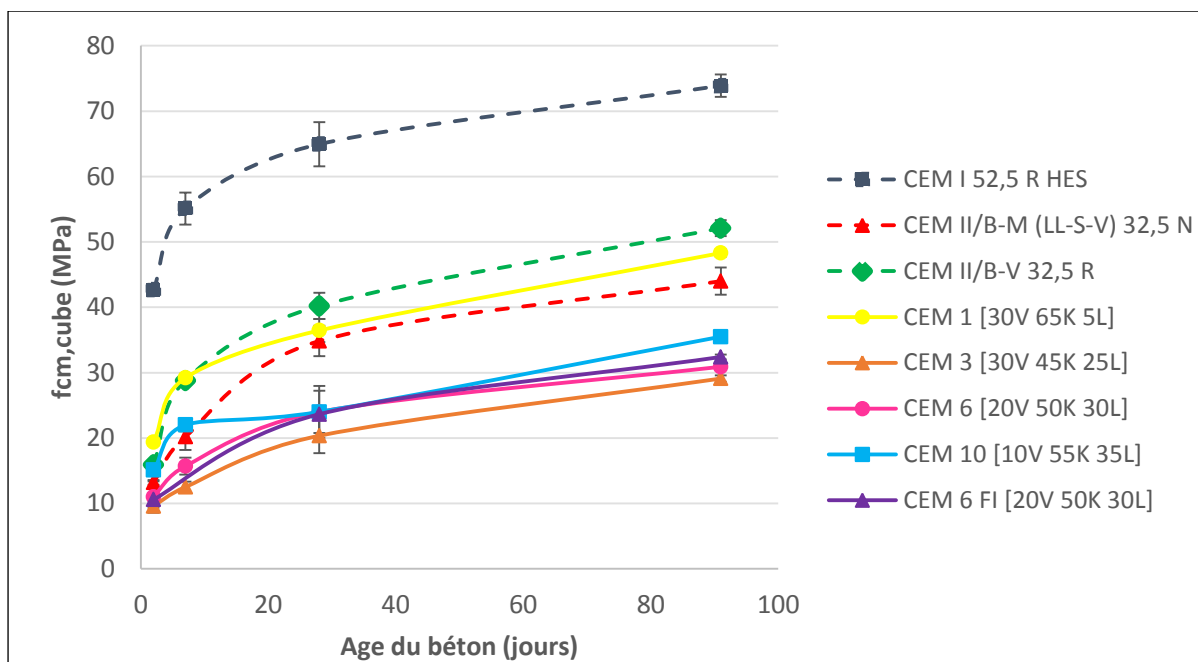


Figure 6-12 – Evolution des résistances en compression moyennes des bétons de type 2 (E/C de 0,55 et C de 300 kg/m³)

Les résistances en compression des bétons à base des nouveaux ciments ternaires sont **inférieures** à celles des bétons à base des ciments de référence, excepté celui à base de CEM 1 [30V 65K 5L] qui est proche des résistances des CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N et CEM II/B-V 32,5 R. La résistance moyenne minimale atteinte pour le béton de type 1 est de 35 MPa et de 20 MPa pour le béton de type 2.

La **mauvaise cure** entraîne une légère diminution des résistances en compression. La perte est négligeable pour le béton à base de CEM I 52,5 R HES.

Les résistances en compression semblent fortement proportionnelles à la **teneur en clinker** et relativement inversement proportionnelles à la **teneur en filler calcaire**.

La présence de **filler impur** ne semble pas nuire à la résistance en compression des bétons. Les bétons à base des CEM 6 et CEM 6 FI ont des résistances proches.

Par contre, dans la première biennale de **CemCalc** [12] sur l'étude de ciments ternaires K-S-L, il apparaissait clairement que les résistances en compression étaient inversement proportionnelles à la teneur en filler calcaire et peu proportionnelles à la teneur en clinker.

Le Tableau 6-15 suivant présente les résistances en compression à 28 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) de la présente recherche (ciments K-V-L) et celles de la biennale précédente (ciments K-S-L). Les résistances en compression des bétons de la recherche CemCalc II sont inférieures à celles de CemCalc I, jusqu'à 50% pour le béton de type 2 à base de CEM 3. C'est aussi le cas à 91 jours, comme l'indiquent le Tableau 6-16. Les comparaisons des évolutions des résistances à 2, 28 et 91 jours des ciments ternaires K-V-L et K-S-L sont illustrées aux Figure 6-13, Figure 6-14 et Figure 6-15. A 2 jours, les résistances

sont similaires mais au-delà, les bétons à base des ciments ternaires K-S-L sont plus résistants.

Cela a également été observé dans la **littérature**. Alonso et al. [32] ont étudié des ciments ternaires à base de clinker, de cendres volantes et/ou du laitier de haut-fourneau et/ou du filler calcaire. Les résistances sur mortiers indiquent des résistances en compression plus faibles pour la composition FL1 [25V 65K 10L] par rapport à la composition SL1 [30S 64K 6L] ; de même pour la composition FL3 [40V 40K 20L] par rapport à la composition SL2 [40S 42K 18L]. De même, dans la recherche CEM X [16], la composition de béton A3 [30V 64K 6L] présente des résistances en compression de 26,2 MPa (béton de type 1) et de 39,3 MPa (béton de type 2), tandis que le béton R3 [30S 64K 6L] présente respectivement 36,8 MPa et 47,5 MPa pour les bétons de type 1 et de type 2. Ces résistances en compression ont été mesurées à 1 an sur des cylindres de 11 cm de diamètre et de 22 cm de longueur. Selon Alonso et al., cela s'expliquerait par le fait que le laitier de haut-fourneau n'est pas seulement pouzzolanique mais également hydraulique. Le laitier s'hydrate donc plus rapidement que les cendres volantes, résultant en un matériau plus rapidement moins poreux.

Par ailleurs, il existe une différence de 10% (type 1) et de 14% (type 2) pour les bétons de référence à base de CEM I 52,5 R HES alors que ce sont les mêmes bétons. Cela pourrait s'expliquer par la courbe granulométrique légèrement différente des recherches CemCalc I et CemCalc II (plus d'éléments fins).

Béton	CemCalc II		CemCalc I		Différence II - I	
	$f_{cm,28}$ [MPa]		$f_{cm,28}$ [MPa]		[MPa]	%
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	80.2	CEM I 52,5 R HES	72.6	7.6	10%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	45.7		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	47.9				
	CEM II/B-V 32,5 R	53.4				
			CEM III/A 42,4 N LA	69.4		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	57.9	CEM 1 [30S 65K 5L]	68	-10.2	-15%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	35.1	CEM 3 [30S 45K 25L]	53.8	-18.7	-35%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	36.8*	CEM 6 [20S 50K 30L]	49.9	-13.1	-26%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	42.9	CEM 10 [10S 55K 35L]	45	-2.1	-5%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	35				
			CEM 12 [30S 35K 35L]	42.9		
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	65	CEM I 52,5 R HES	57	8	14%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	37.2		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	34.8				
	CEM II/B-V 32,5 R	40.2				
			CEM III/A 42,4 N LA	54.1		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	36.5	CEM 1 [30S 65K 5L]	50.7	-14.2	-28%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	20.4	CEM 3 [30S 45K 25L]	40.4	-20	-50%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	24	CEM 6 [20S 50K 30L]	36.5	-12.5	-34%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	24*	CEM 10 [10S 55K 35L]	31	-7	-23%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	23.7				
			CEM 12 [30S 35K 35L]	34.3		

*Moyenne comprenant une valeur à confirmer (cf. Tableau 6-13)

Tableau 6-15 – Comparaison des résistances en compression à 28 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55) des recherches CemCalc I et CemCalc II

Béton	CemCalc II		CemCalc I		Différence II - I	
	$f_{cm,91}$ [MPa]		$f_{cm,91}$ [MPa]		[MPa]	%
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	88.9	CEM I 52,5 R HES	80.1	8.8	11%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	55.8		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	63.7				
	CEM II/B-V 32,5 R	63.6				
			CEM III/A 42,4 N LA	79.4		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	69.6	CEM 1 [30S 65K 5L]	77.5	-7.9	-10%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	40.2	CEM 3 [30S 45K 25L]	61.3	-21.1	-34%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	49.1	CEM 6 [20S 50K 30L]	55.9	-6.8	-12%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	54.6	CEM 10 [10S 55K 35L]	51.7	2.9	6%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	45.3				
			CEM 12 [30S 35K 35L]	51.3		
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	73.9	CEM I 52,5 R HES	64.3	9.6	15%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	42.8		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	44				
	CEM II/B-V 32,5 R	52.1				
			CEM III/A 42,4 N LA	65.2		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	48.3	CEM 1 [30S 65K 5L]	60.6	-12.3	-20%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	29.1	CEM 3 [30S 45K 25L]	49.1	-20	-41%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	30.9	CEM 6 [20S 50K 30L]	42.2	-11.3	-27%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	35.5	CEM 10 [10S 55K 35L]	34.8	0.7	2%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	32.4				
			CEM 12 [30S 35K 35L]	40.4		

Tableau 6-16 – Comparaison des résistances en compression à 91 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55) des recherches CemCalc I et CemCalc II

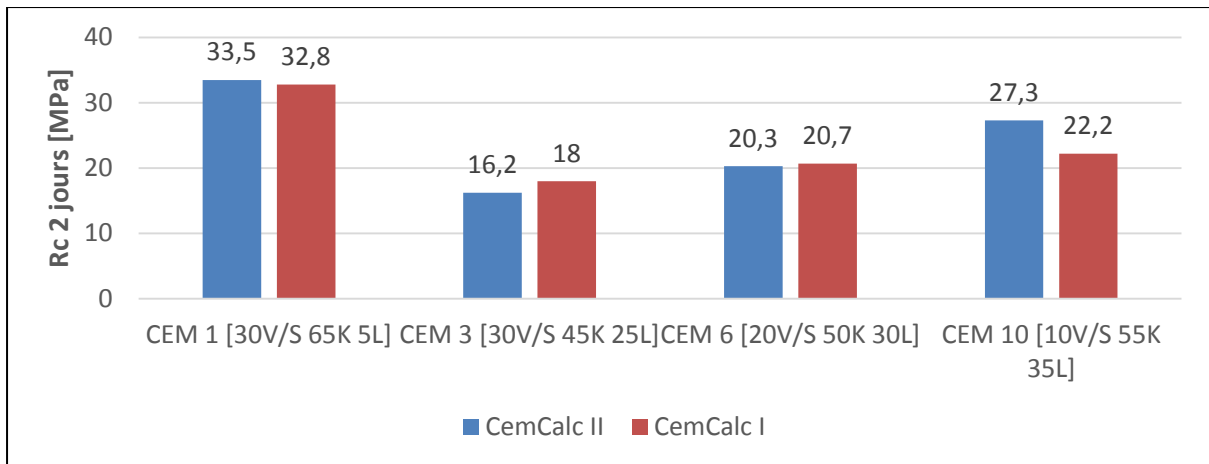


Figure 6-13 – Comparaison des résistances à 2 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L et K-S-L

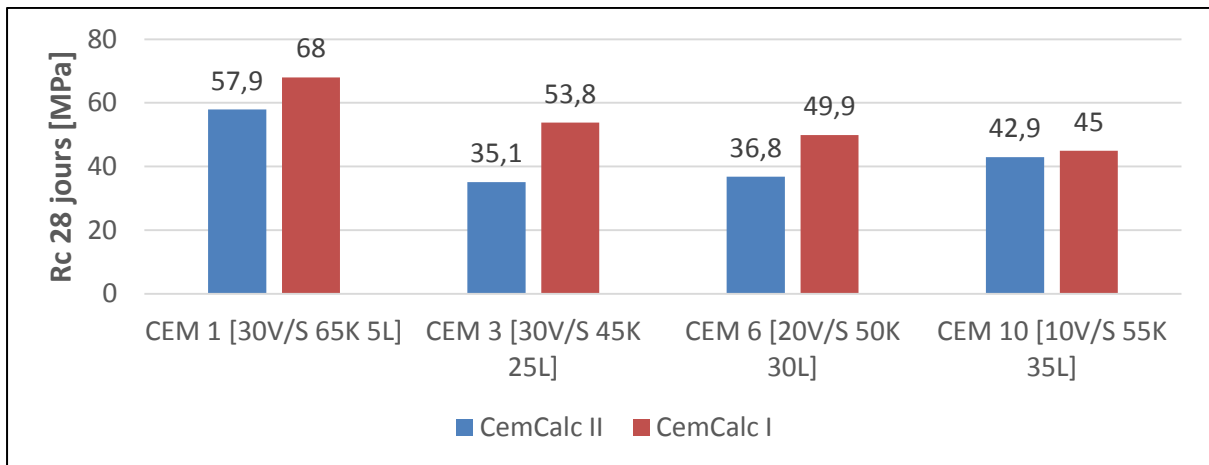


Figure 6-14 – Comparaison des résistances en compression à 28 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L et K-S-L

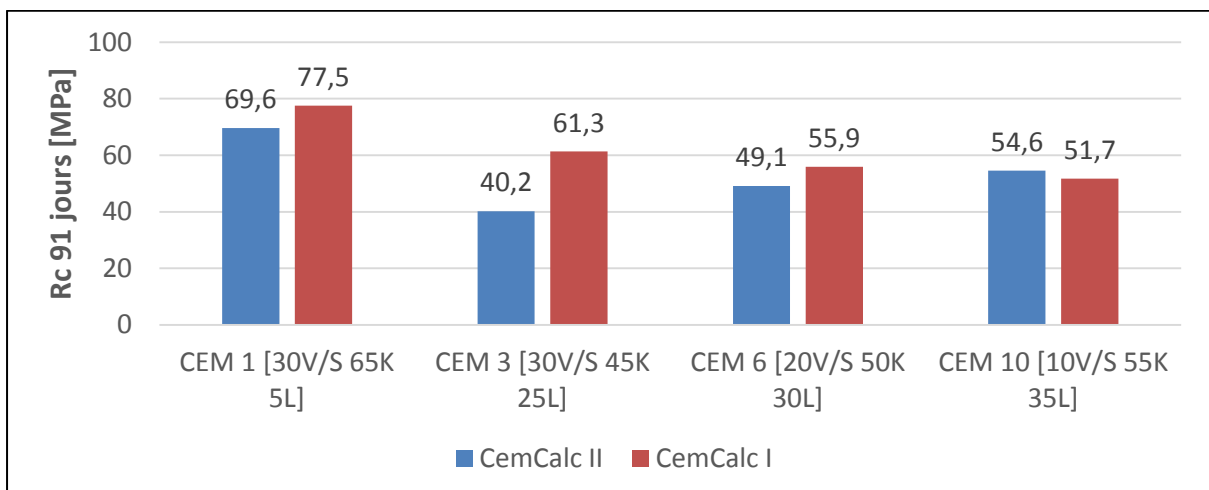


Figure 6-15 – Comparaison des résistances en compression à 91 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L et K-S-L

Dans la recherche **CEM X**, les bétons à base des ciments ternaires A3 [30V 64K 6L] et A4 [20V 50K 30L] avaient une résistance en compression de 39,3 MPa et 30,5 MPa respectivement pour le béton 2 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m³). Toutefois, ces résistances ont été obtenues sur cylindres de 11 cm de diamètre et 22 cm de hauteur. Elles sont donc plus faibles que les résistances des bétons correspondants : CEM 1 avec 57,9 MPa et CEM 6 avec 36,8 MPa (bétons de type 1).

Avec la formule de conversion ci-dessous, les bétons à base de CEM 1 et CEM 6 présentent alors des résistances en compression respectivement de : 46,9 MPa et 29,8 MPa (facteur de conversion de 0,81). Les résistances du CEM 6 et de la composition A4 sont alors semblables mais celle du CEM 1 est tout de même plus élevée que la composition A3. La différence de 1% dans les proportions de clinker et de filler calcaire éventuellement pourrait expliquer cette différence.

$$\frac{f_{cx}}{f_{c\ cube\ 150}} = 0.62 + \frac{0.67}{\left(1 + \frac{\sqrt{S}}{20}\right) * \left(\frac{h}{\sqrt{S}}\right)^{1.05}} \quad [33]$$

dans laquelle $f_{c\ cube\ 150}$ est la résistance mesurée sur une éprouvette cubique de 150 mm d'arête et f_{cx} est la résistance correspondante obtenue sur une éprouvette de hauteur h (en cm) et de section S (en cm²).

Selon la **NBN B 15-100**, les résistances en compression doivent satisfaire aux exigences minimales de résistance à la compression correspondant aux classes d'environnement cibles. Pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45), type 2 (E/C de 0,55) et type 3 (E/C de 0,50), les classes de résistance visées sont respectivement C35/45, C25/30 et C30/37 [34].

Pour les bétons de type 1, la classe de résistance visée C35/45 a été obtenue avec le CEM 1. Pour les bétons de type 2, la classe de résistance visée C35/45 n'a pas pu être obtenue avec les nouveaux ciments ternaires.

Pour les bétons de type 3, la classe de résistance visée C30/37 n'a pas pu être obtenue avec les nouveaux ciments ternaires.

Le Tableau 6-17 suivant résume les classes de résistance atteintes.

Il serait éventuellement possible que les classes de résistance visées puissent être atteintes si on réduit la teneur en eau des bétons.

Dans la recherche CemCalc I, seuls les ciments ternaires CEM 1 [30S 65K 5L] et CEM 3 [30S 45K 25L] atteignaient leur classe de résistance visée.

Béton	Ciment	$f_{ck,cyl}$ [MPa]	Classe de résistance du béton (NBN EN 206-1)								
			12/15	16/20	20/25	25/30	30/37	35/45	40/50	45/55	50/60
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	58.8	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	31.9	X	X	X	X	X				
	CEM II/B-V 32.5 R	36.5	X	X	X	X	X	X			
	CEM 1 [30V 65K 5L]	40.2	X	X	X	X	X	X	X		
	CEM 3 [30V 45K 25L]	21.2	X	X	X						
	CEM 6 [20V 50K 30L]	22.7	X	X	X						
	CEM 10 [10V 55K 35L]	27.8	X	X	X	X					
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	21.1	X	X	X						
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	46.1	X	X	X	X	X	X	X	X	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	21.0	X	X	X						
	CEM II/B-V 32.5 R	25.5	X	X	X	X					
	CEM 1 [30V 65K 5L]	22.4	X	X	X						
	CEM 3 [30V 45K 25L]	8.9									
	CEM 6 [20V 50K 30L]	12.0	X								
	CEM 10 [10V 55K 35L]	12.0	X								
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	11.7									
TYPE 3 (E/C = 0,50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	50.4	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	CEM 1 [30V 65K 5L]	28.3	X	X	X	X					
	CEM 6 [20V 50K 30L]	16.6	X	X							

Tableau 6-17 – Résistances en compression caractéristiques à 28 jours et classes de résistance atteintes par les bétons de type 1 (E/C de 0,45), type 2 (E/C de 0,55) et type 3 (E/C de 0,50)

6.2.5 Résistance à la flexion

6.2.5.1 Principe et conditions de l'essai

La résistance à la flexion en 4 points est déterminée sur 3 prismes de dimensions 10 x 10 x 40 cm³ selon la norme NBN EN 12390-5 [22], au moyen d'une presse hydraulique TONI-MFL de capacité maximale égale à 250 kN (voir Figure 6-16). La vitesse de chargement est de 8 kN/min.

Après démoulage, les prismes sont conservés sous eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Le béton est âgé de 28 jours au moment des essais.



Figure 6-16 – Réalisation de l'essai de flexion en 4 points

6.2.5.2 Résultats obtenus

Les résistances à la flexion moyennes à 28 jours (moyennes sur 3 prismes) ainsi que les écarts-types sont donnés au Tableau 6-18 et sont illustrés aux Figure 6-17 et Figure 6-18.

Béton	Ciment	Résistance à la flexion moyenne à 28 jours [N/mm ²]	
		$f_{cm,28}$	σ
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	8.47	0.42
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	6.57	0.31
	CEM II/B-V 32.5 R	6.80	0.50
	CEM 1 [30V 65K 5L]	7.37	0.15
	CEM 3 [30V 45K 25L]	5.17	0.06
	CEM 6 [20V 50K 30L]	4.90	0.26
	CEM 10 [10V 55K 35L]	6.27	0.21
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	5.60	0.17
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	7.77	0.15
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	5.57	0.25
	CEM II/B-V 32.5 R	5.80	0.53
	CEM 1 [30V 65K 5L]	5.73	0.06
	CEM 3 [30V 45K 25L]	3.97	0.15
	CEM 6 [20V 50K 30L]	4.23	0.25
	CEM 10 [10V 55K 35L]	5.00	0.26
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	4.23	0.31

Tableau 6-18 – Résistances à la flexion à 28 jours des bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55)

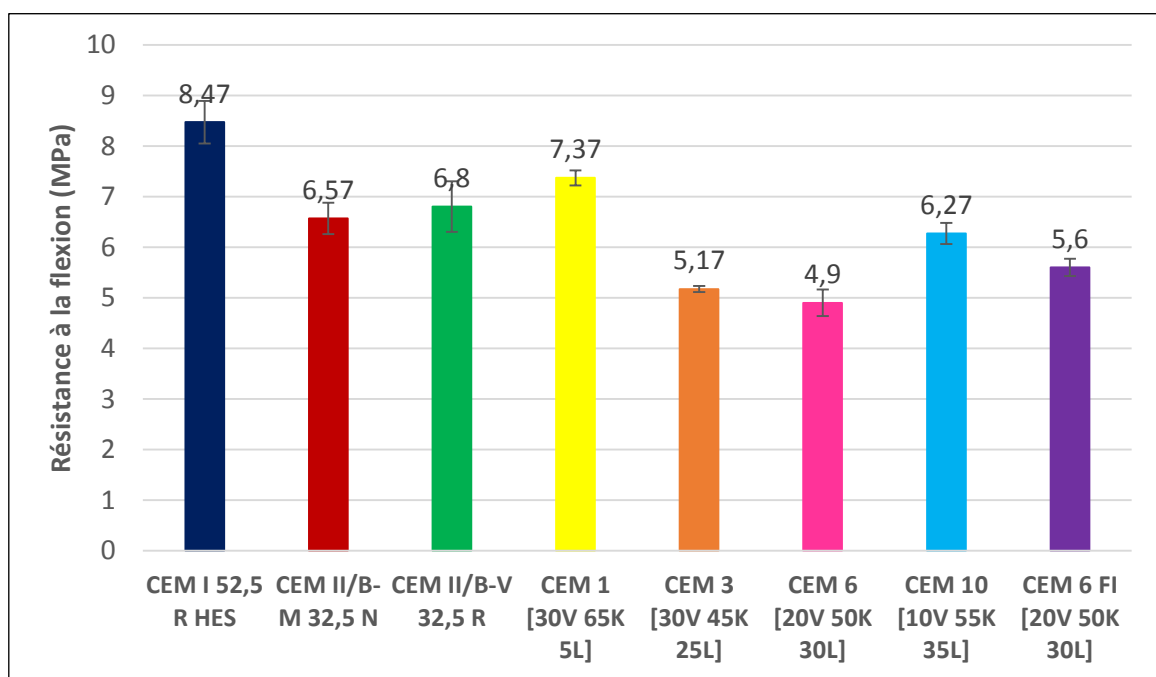


Figure 6-17 – Résistances à la flexion à 28 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³)

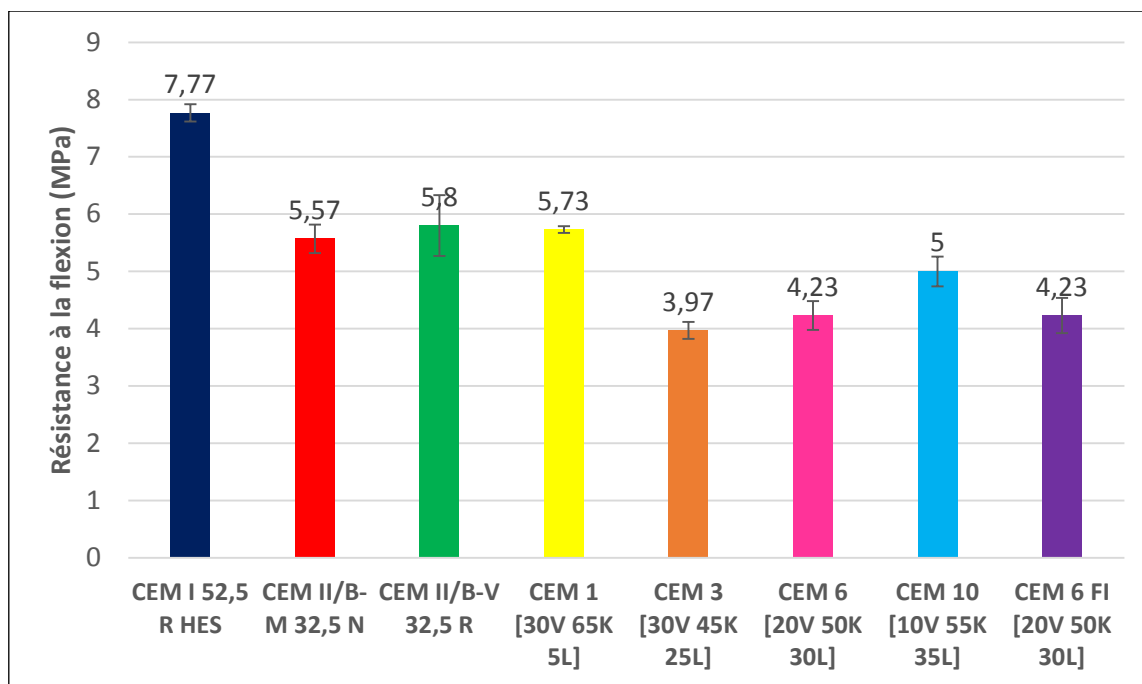


Figure 6-18 – Résistances à la flexion à 28 jours pour les bétons de type 2 (E/C de 0,55 et C de 300 kg/m³)

Les résistances en flexion des bétons à base des nouveaux ciments ternaires sont **inférieures** aux résistances des bétons de référence, sauf le CEM 1 [30V 65K 5L] qui a une résistance supérieure au CEM II/B-V 32,5 R pour le béton de type 1 et au CEM II/B-M 32,5 N pour le béton de type 2.

Tout comme pour la résistance en compression, la résistance en flexion semble principalement dépendre de la **teneur en clinker** des ciments et est inversement proportionnelle à la **teneur en filler**. A noter que la résistance en flexion est mesurée sur la 2^e gâchée du béton. Or, dans le cas du CEM 6 type 1 (Figure 6-17), la résistance en compression à 28 jours de cette deuxième gâchée paraît trop faible (voir Tableau 6-13), ce qui expliquerait cette résistance en flexion plus faible.

La présence de **filler impur** ne semble pas avoir d'influence sur la résistance en flexion.

Dans **CemCalc I**, les résistances en flexion étaient principalement inversement proportionnelles à la teneur en filler calcaire, en particulier pour le béton de type 2. Les résistances en flexion moyennes des ciments ternaires K-V-L sont toutes plus faibles que celles des ciments ternaires K-S-L de la recherche CemCalc I (voir Tableau 6-19).

Comme pour la résistance en compression, le laitier semblerait mieux contribuer aux résistances mécaniques du béton que les cendres volantes.

Les différences importantes entre les bétons à base de CEM I 52,5 R HES dans les deux recherches s'expliqueraient par la courbe granulométrique différente (plus d'éléments fins dans CemCalc II).

Béton	CemCalc II		CemCalc I		Différence II - I	
	$f_{cfm,28}$ [MPa]		$f_{cfm,28}$ [MPa]		[MPa]	%
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	8.47	CEM I 52,5 R HES	6.67	1.8	27%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	5.93		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	6.57				
	CEM II/B-V 32,5 R	6.8				
			CEM III/A 42,4 N LA	6.5		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	7.37	CEM 1 [30S 65K 5L]	8.17	-0.8	-10%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	5.17	CEM 3 [30S 45K 25L]	6.9	-1.73	-25%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	4.9	CEM 6 [20S 50K 30L]	6.07	-1.17	-19%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	6.27	CEM 10 [10S 55K 35L]	6.43	-0.16	-2%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	5.6				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	6.07			
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	7.77	CEM I 52,5 R HES	6.6	1.17	18%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	6		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	5.57				
	CEM II/B-V 32,5 R	5.8				
			CEM III/A 42,4 N LA	7.23		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	5.73	CEM 1 [30S 65K 5L]	6.27	-0.54	-9%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	3.97	CEM 3 [30S 45K 25L]	6.47	-2.5	-39%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	4.23	CEM 6 [20S 50K 30L]	5.53	-1.3	-24%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	5	CEM 10 [10S 55K 35L]	5.03	-0.03	-1%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	4.23				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	5.57			

Tableau 6-19 – Comparaison des résistances en flexion à 28 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55) des recherches CemCalc I et CemCalc II

La recherche **CEM X** n'a pas réalisé d'essai de flexion pour les compositions à base des cendres volantes.

La norme **NBN B 15-100** [19] ne renseigne pas de critère à respecter concernant les résistances en flexion.

6.2.6 Résistance à la traction par fendage

6.2.6.1 Principe et conditions de l'essai

Le principe de l'essai est le suivant (voir Figure 6-19) : une éprouvette cylindrique est soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression appliqué sur une zone étroite. Les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction.

La résistance à la traction par fendage est déterminée selon la norme NBN EN 12390-6 [23]. L'essai est effectué sur six carottes de 113 mm de diamètre et de 113 mm de haut prélevées dans des prismes de béton conservés sous eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$. Le béton est âgé de 28 jours au moment des essais. La vitesse de chargement est de 60 kN/min.

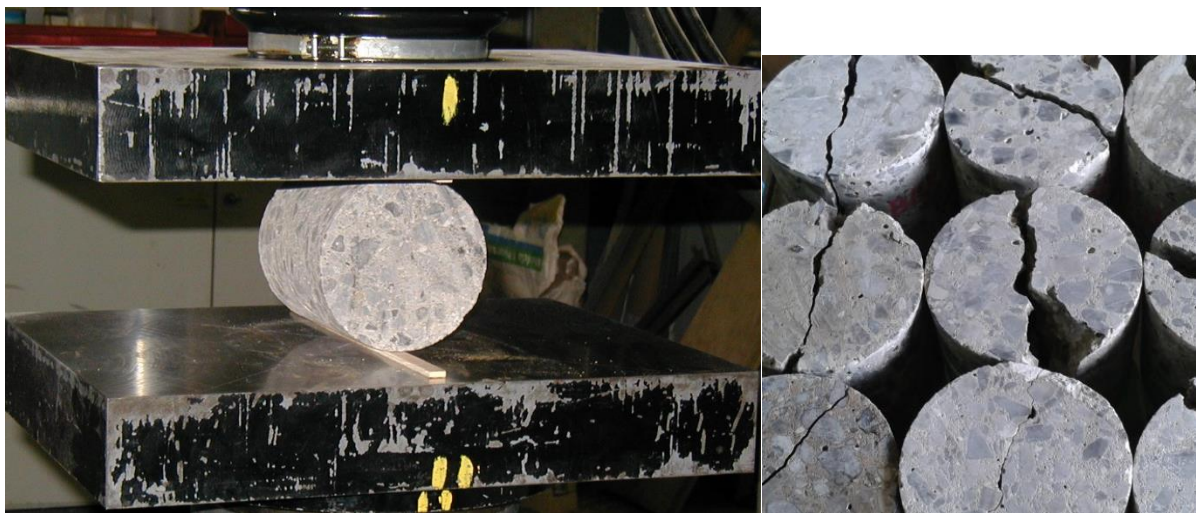


Figure 6-19 – Réalisation de l'essai de traction par fendage

6.2.6.2 Résultats obtenus

Les résistances à la traction à 28 jours des 6 carottes ainsi que les moyennes et les écarts-types obtenus sur les bétons de type 1 et 2 sont donnés au Tableau 6-20 et illustrées aux Figure 6-20 et Figure 6-21.

Les critères d'évaluation de la NBN B 15-100 concernant la résistance à la traction par fendage indiquent que 5 des 6 valeurs individuelles doivent se situer entre les limites suivantes :

- $f_{ct,sp,5\%} = 0.23 ((f_{cm,cube} / 1.2) - 8)^{2/3}$
- $f_{ct,sp,95\%} = 0.43 ((f_{cm,cube} / 1.2) - 8)^{2/3}$

Ces limites sont également reprises au Tableau 6-20.

Béton	Ciment	f _{ct,28} [MPa]						f _{ctm,28} [MPa]		NBN B 15-100	
		1	2	3	4	5	6	f _{ctm}	σ	f _{ct,sp,5%}	f _{ct,sp,95%}
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	5.09	6.25	5.75	5.4	5.78	6.14	5.74	0.44	3.48	6.50
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	4.76	4.36	4.21	4.3	3.97	4.24	4.31	0.26	2.31	4.32
	CEM II/B-V 32.5 R	4.25	4.37	4.19	4.34	4.21	4.68	4.34	0.18	2.53	4.73
	CEM 1 [30V 65K 5L]	4.84	4.73	4.08	4.34	5.12	4.3	4.57	0.39	2.70	5.05
	CEM 3 [30V 45K 25L]	3.08	3.43	3.3	3.48	3.6	3.53	3.40	0.19	1.76	3.30
	CEM 6 [20V 50K 30L]	3.99	3.32	3.32	3.41	3.45	3.26	3.46	0.27	1.84	3.44
	CEM 10 [10V 55K 35L]	3.77	3.81	3.66	3.75	4.03	4.02	3.84	0.15	2.11	3.94
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	3.46	3.43	3.44	3.25	3.6	3.31	3.42	0.12	1.76	3.29
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	4.76	4.43	5.04	5.02	5.12	4.63	4.83	0.27	2.96	5.53
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	3.52	3.86	4	3.35	3.49	3.18	3.57	0.31	1.75	3.28
	CEM II/B-V 32.5 R	3.47	3.57	3.06	3.21	3.51	3.33	3.36	0.20	1.99	3.73
	CEM 1 [30V 65K 5L]	4.17	3.74	3.44	3.72	3.54	3.28	3.65	0.31	1.83	3.41
	CEM 3 [30V 45K 25L]	2.68	2.60	2.98	2.7	2.86	2.89	2.79	0.15	0.99	1.85
	CEM 6 [20V 50K 30L]	2.74	2.69	2.36	3.08	2.87	3.11	2.81	0.28	1.21	2.25
	CEM 10 [10V 55K 35L]	2.74	3.24	2.99	3.24	3.45	2.84	3.08	0.27	1.21	2.25
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	2.95	2.78	2.54	2.87	3.02	2.75	2.82	0.17	1.19	2.22

Tableau 6-20 – Résistances à la traction par fendage à 28 jours des bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55) et critère d'évaluation de la norme NBN B 15-100
Valeur bleue : critère non respecté (mais supérieur à f_{ct,sp,95%})

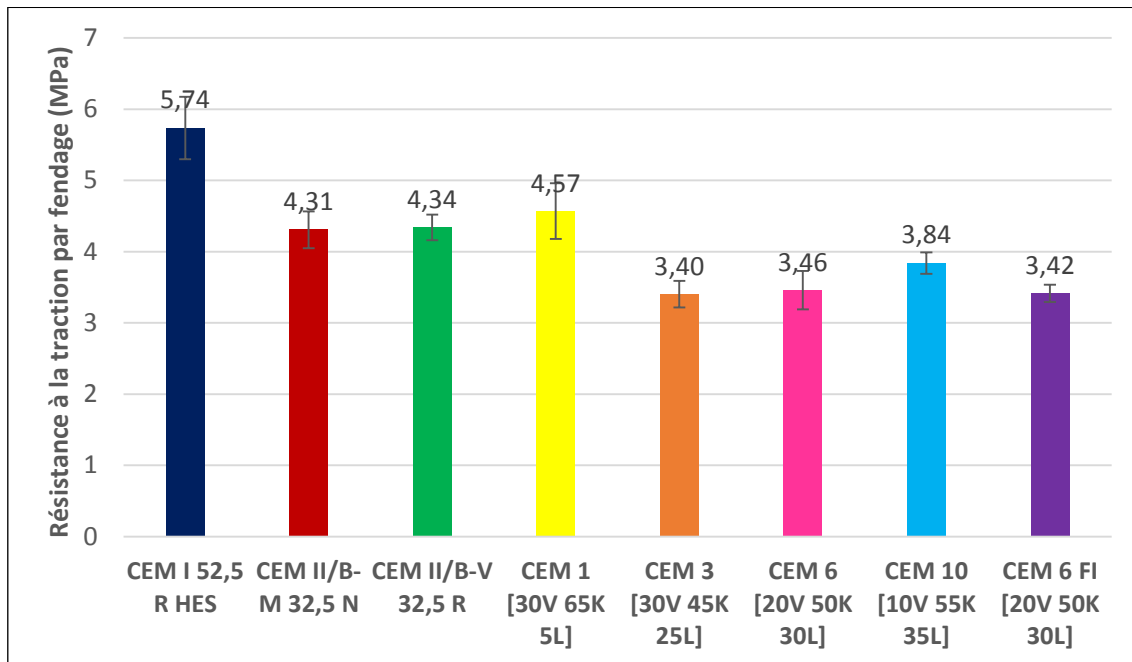


Figure 6-20 – Résistances à la traction par fendage à 28 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³)

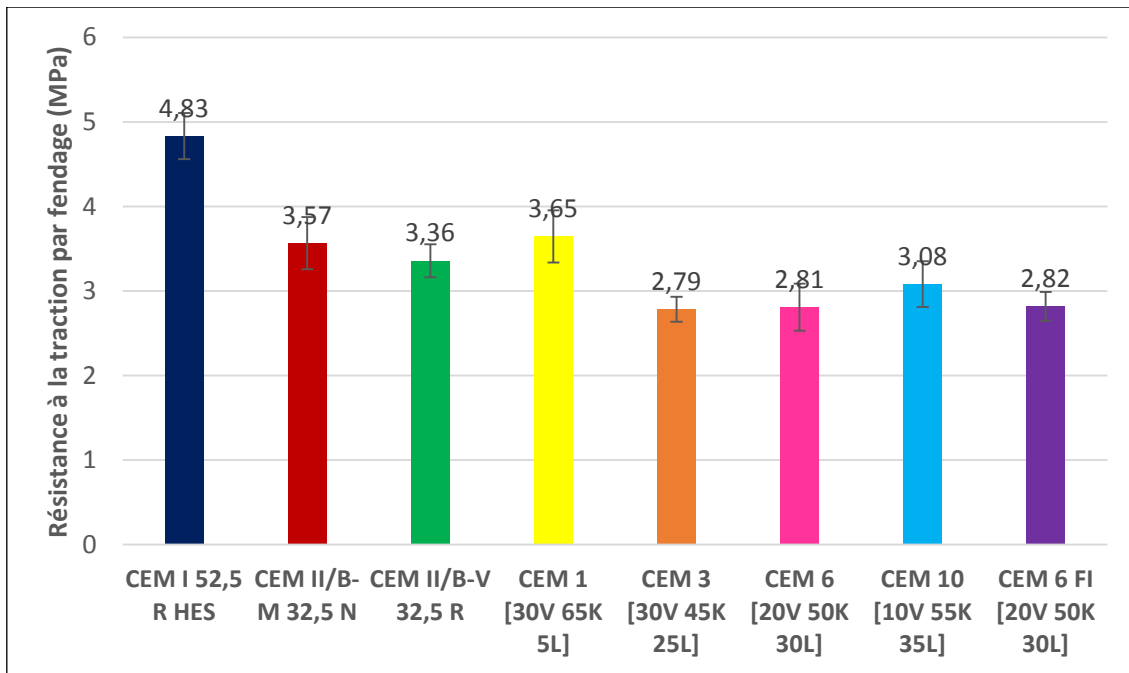


Figure 6-21 – Résistances à la traction par fendage à 28 jours pour les bétons de type 2 (E/C de 0,55 et C de 300 kg/m³)

Les résistances à la traction par fendage moyennes des bétons constitués des ciments ternaires étudiés sont **inférieures** à celles des bétons à base des ciments de référence, sauf pour les bétons à base de CEM 1 qui ont des résistances supérieures à celles des bétons à base de CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N et CEM II/B-V 32,5 R.

Il semble que la résistance à la traction par fendage soit surtout influencée par la **teneur en clinker**, tout comme les propriétés mécaniques précédentes (résistances en compression et en flexion).

La présence de **filler impur** ne semble pas avoir d'influence sur la résistance à la traction par fendage.

Dans **CemCalc I**, la traction par fendage a été réalisée pour quelques bétons de la deuxième série. La résistance avait tendance à être inversement proportionnelle à la teneur en filler calcaire. Le Tableau 6-21 suivant compare les résultats obtenus dans la présente recherche et ceux de CemCalc I.

Il est difficile d'observer des tendances dans ce cas vu qu'il n'y a que deux bétons à base de ciments ternaires de compositions comparables.

Béton	CemCalc II		CemCalc I		Différence II - I	
	$f_{ctm,28}$ [MPa]		$f_{ctm,28}$ [MPa]		[MPa]	%
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	5.74	CEM I 52,5 R HES	5.4	0.34	6%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	-		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	4.31				
	CEM II/B-V 32,5 R	4.34				
			CEM III/A 42,4 N LA	5.3		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	4.57	CEM 1 [30S 65K 5L]	-	-	-
	CEM 3 [30V 45K 25L]	3.40	CEM 3 [30S 45K 25L]	4.5	-1.1	-24%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	3.46	CEM 6 [20S 50K 30L]	-	-	-
	CEM 10 [10V 55K 35L]	3.84	CEM 10 [10S 55K 35L]	3.65	0.19	5%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	3.42				
			CEM 12 [30S 35K 35L]	5		

Tableau 6-21 – Comparaison des résistances à la traction par fendage à 28 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) pour les recherches CemCalc I et CemCalc II

La recherche **CEM X** n'a pas réalisé d'essai de traction par fendage pour les compositions à base des cendres volantes.

Les valeurs en bleu dans le Tableau 6-20 indiquent celles qui ne respectent pas les critères de la **NBN B 15-100**. Cependant, elles sont à chaque fois supérieures à la limite supérieure $f_{ct,sp,95\%}$, comme c'était le cas dans la recherche CemCalc I. Parmi les bétons à base des nouveaux ciments ternaires, seul celui à base du CEM 1 type 1 respecte le critère (5 des 6 valeurs doivent se situer entre les deux limites).

Le fait que la résistance à la traction soit supérieure à la limite supérieure admise permet d'avoir moins de fissuration à court terme et est intéressant pour un décoffrage rapide. Cependant, à long terme, une résistance à la traction trop grande pourrait poser certains problèmes. En effet, l'ouverture des fissures est proportionnelle à l'énergie accumulée dans le matériau. Cette énergie augmente lorsque la résistance à la traction du matériau est grande. Dès lors, lorsque la résistance est dépassée, on a une diminution brutale de l'énergie accumulée et une fissuration importante. Par conséquent, une résistance à la traction plus élevée nécessite une quantité plus élevée d'armatures afin de limiter la fissuration.

6.2.7 Module d'élasticité

6.2.7.1 Principe et conditions de l'essai

Le principe de l'essai consiste à mesurer les déformations longitudinales d'une éprouvette de béton durci soumise à un effort de compression croissant uniformément. Le module d'élasticité statique en compression E_c (en N/mm²) est calculé par la formule :

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

dans laquelle $\Delta\sigma$ et $\Delta\varepsilon$ sont les différences de contrainte et de déformation entre, respectivement, un niveau de chargement de 0,5 N/mm² et un niveau supérieur de chargement de 1/3 de la résistance à la compression du béton.

Le module d'élasticité est déterminé sur 3 prismes de dimensions 10 x 10 x 40 cm³ selon la norme NBN B 15-203 [24], au moyen d'une presse TONI-MFL d'une capacité maximale de 250 kN. Les déformations sont mesurées à l'aide de plots métalliques collés sur les quatre faces latérales des prismes et la charge maximale appliquée est égale au tiers de la résistance à la compression à 28 jours (voir Figure 6-22).

La résistance à la compression de chaque composition de béton a été déduite des résultats obtenus au point 6.2.4, en appliquant un facteur de conversion de 0,72 étant donné la différence de taille des éprouvettes. Ce facteur de conversion a été déterminé en utilisant la formule suivante :

$$\frac{f_{cx}}{f_{c\ cube\ 150}} = 0.62 + \frac{0.67}{\left(1 + \frac{\sqrt{S}}{20}\right) * \left(\frac{h}{\sqrt{S}}\right)^{1.05}} \quad [33]$$

dans laquelle $f_{c\ cube\ 150}$ est la résistance mesurée sur une éprouvette cubique de 150 mm d'arête et f_{cx} est la résistance correspondante obtenue sur une éprouvette de hauteur h (en cm) et de section S (en cm²).

Les prismes sont démoulés à 24 heures et sont ensuite conservés sous eau à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ pendant 7 jours puis en chambre climatique à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $60 \pm 5\%$ HR pendant 21 jours. Le béton est âgé de 28 jours au moment des essais.

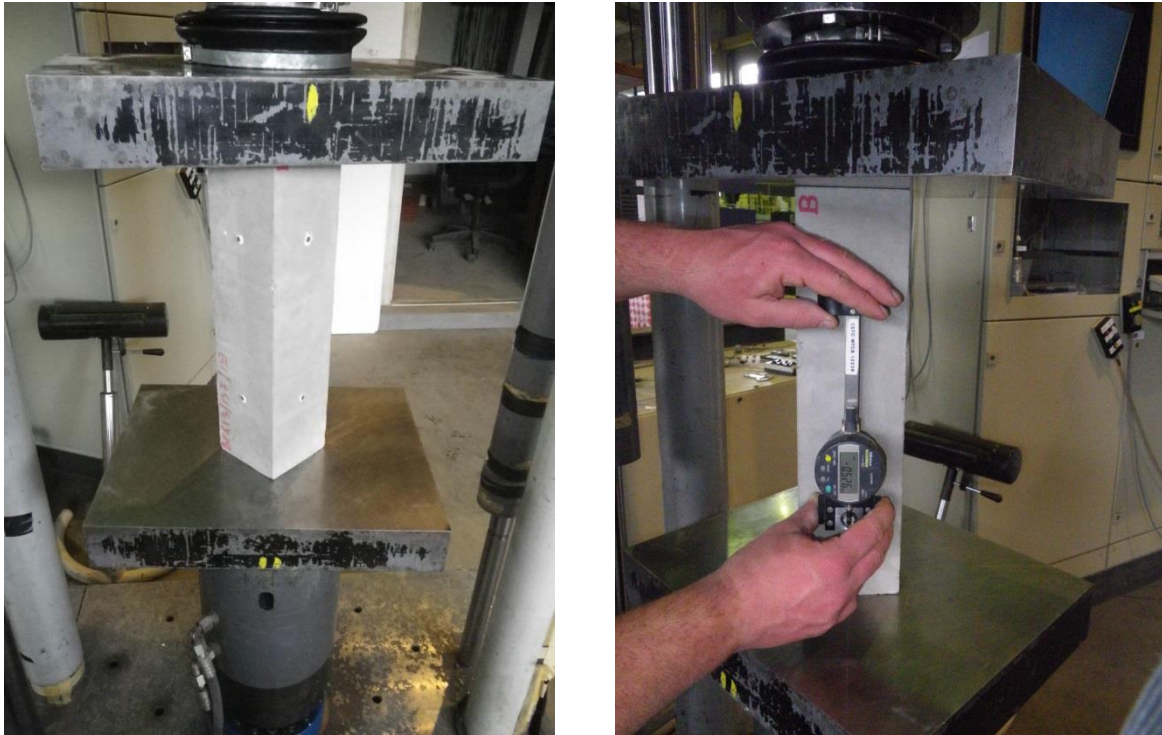


Figure 6-22 – Mesure du module d'élasticité

6.2.7.2 Résultats obtenus

Les modules d'élasticité à 28 jours (moyennes sur 3 prismes) ainsi que les écarts-types sont donnés au Tableau 6-22 suivant et illustrées aux Figure 6-23 et Figure 6-24. Celui-ci reprend également les limites inférieure E_{cm1} et supérieure E_{cm2} du module d'élasticité telles que définies dans la norme NBN B 15-100⁶ [19] et données ci-dessous :

- $E_{cm1} = 21 \left(\frac{(f_{cm,cube/1.2}) - 8}{10} \right)^{0.3}$
- $E_{cm2} = 23 \left(\frac{(f_{cm,cube/1.2}) + 8}{10} \right)^{0.3}$

⁶ Il est à mentionner que la norme stipule un total de six éprouvettes prélevées de trois mélanges différents alors que, dans la présente recherche, il s'agit de résultats issus de trois éprouvettes provenant d'un même mélange.

Béton	Ciment	Module d'élasticité à 28 jours [N/mm ²]		Critère de la NBN B 15-100 [N/mm ²]	
		E _{cm}	σ	E _{cm1}	E _{cm2}
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	38123	426	35736	42068
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	36327	591	29734	36793
	CEM II/B-V 32.5 R	36998	625	30957	37816
	CEM 1 [30V 65K 5L]	35998	126	31880	38607
	CEM 3 [30V 45K 25L]	33344	823	24399	32752
	CEM 6 [20V 50K 30L]	36037	973	26843	34509
	CEM 10 [10V 55K 35L]	34605	216	28523	35811
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	31200	231	26282	34090
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	39729*	655	33220	39784
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	34090	1519	26246	34064
	CEM II/B-V 32.5 R	33623	964	27809	35249
	CEM 1 [30V 65K 5L]	34025	654	26739	34430
	CEM 3 [30V 45K 25L]	30279	644	20318	30262
	CEM 6 [20V 50K 30L]	31454	877	22181	31324
	CEM 10 [10V 55K 35L]	32195	1798	22181	31324
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	28749	437	22017	31226

*Valeur estimée via une nouvelle mesure du module élastique à 308 jours

Tableau 6-22 – Modules d'élasticité à 28 jours des bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55) et critère d'évaluation du module d'élasticité de la NBN B 15-100
Valeur bleue : critère d'évaluation du module E non respecté (supérieur à la limite supérieure E_{cm2})

Le module élastique mesuré à 28 jours du béton de type 2 à base du CEM I 52,5 R HES s'élevait à une valeur aberrante de 44224 MPa. Les prismes ayant été conservés après l'essai de module élastique à 28 jours, il a alors été décidé de mesurer à nouveau le module d'élasticité sur ces mêmes prismes. La valeur obtenue est de 41429 ± 275 MPa à un âge de 308 jours. Les charges appliquées lors de l'essai de module élastique ne dépassant par un tiers de la résistance en compression, on reste dans le domaine élastique. Le fait que les prismes aient déjà été testés à 28 jours n'aurait donc pas d'influence sur la valeur mesurée à 308 jours.

L'Eurocode 2 donne une formule permettant d'estimer l'évolution du module d'élasticité avec le temps [30] :

$$E_{cm}(t) = \left(\frac{f_{cm}(t)}{f_{cm}} \right)^{0.3} E_{cm}$$

Avec :

- E_{cm}(t) et f_{cm}(t) = module élastique et résistance en compression à t jours
- E_{cm} et f_{cm} = module élastique et résistance en compression à 28 jours

Ne disposant pas d'une mesure de $f_{cm}(t)$ à 308 jours, il est possible de l'estimer avec la formule suivante :

$$f_{cm}(t) = \beta_{cc}(t) f_{cm}$$

Avec :

$$\beta_{cc}(t) = \exp \left\{ s \left(1 - \left(\frac{28}{t} \right)^{0.5} \right) \right\}$$

Où :

- s = coefficient qui dépend du type de ciment (comme déterminé au point 6.2.3)

Il est à noter que cette relation est valable pour des conditions de cure à 20°C et sous eau (ou en chambre humide à $\geq 95\%$ d'humidité relative).

En appliquant ces formules, on peut déduire le module élastique à 28 jours sur base de la mesure à 308 jours. Il s'élève alors à 39729 ± 264 MPa. Cette valeur reste toujours supérieure au module élastique du béton de type 1 mais elle paraît moins aberrante que la valeur initiale de 44224 MPa.

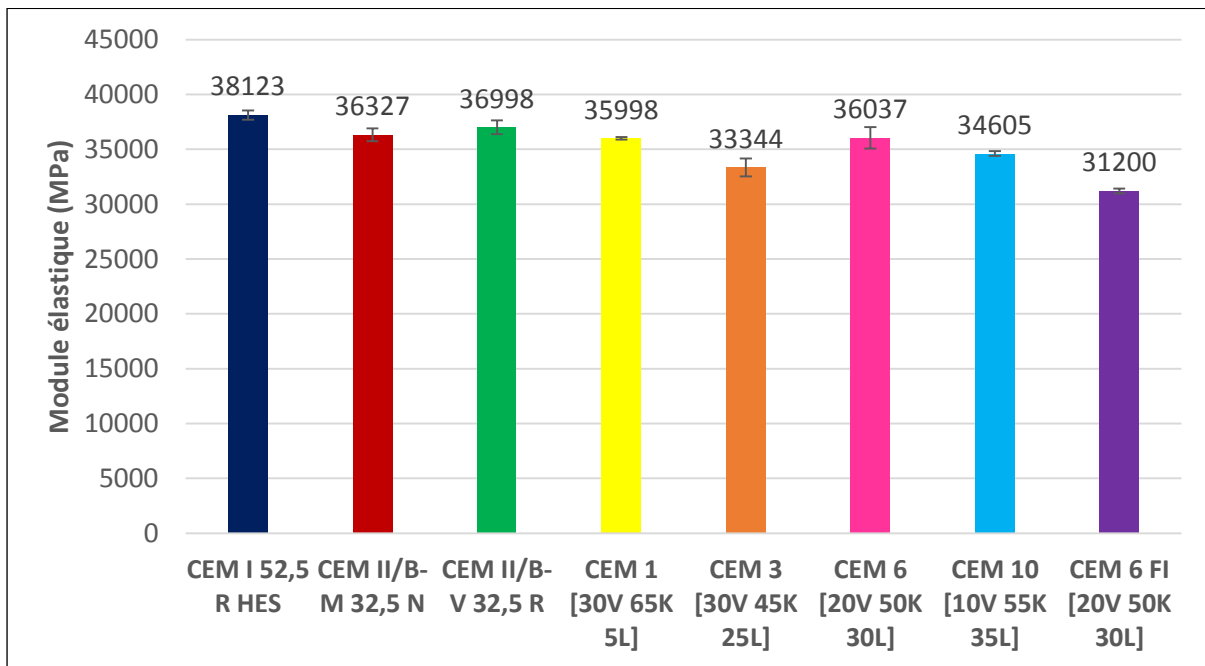
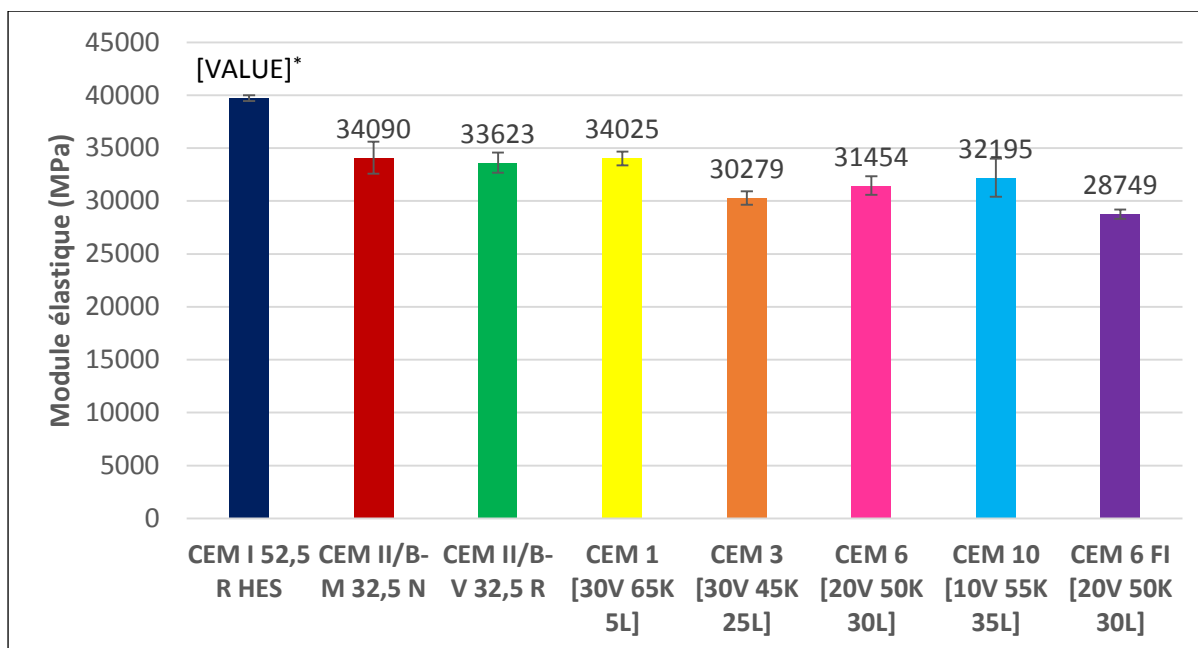


Figure 6-23 – Modules d'élasticité à 28 jours des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³)



* Valeur estimée via une nouvelle mesure du module élastique à 308 jours

Figure 6-24 – Modules d'élasticité à 28 jours des bétons de type 2 (E/C de 0,55 et C de 300 kg/m³)

Les modules d'élasticité des bétons constitués des nouveaux ciments ternaires sont **inférieurs** à ceux des bétons à base des ciments industriels de référence, sauf pour le CEM 1 type 2 qui est supérieur au CEM II/B-V 32,5 R. Comme déjà mentionné, le module élastique du béton de type 2 à base du CEM I 52,5 R HES semble trop élevé par rapport à la valeur obtenue sur le béton de type 1 avec un E/C plus faible.

Le module élastique semble être proportionnel à la **teneur en clinker** et être relativement inversement proportionnel à la **teneur en filler calcaire**.

Le **filler impur** semble avoir une influence vu que les bétons à base du CEM 6 FI présentent les modules élastiques les plus faibles.

Dans **CemCalc I**, les modules d'élasticité étaient relativement corrélés à la teneur en clinker lorsque l'on regarde uniquement les ciments K-V-L. Le Tableau 6-23 compare les modules obtenus dans les recherches CemCalc II et CemCalc I. Les modules sont plus faibles pour les ciments ternaires K-V-L par rapport aux ciments K-S-L. Comme pour les résistances en compression et en flexion, le laitier semblerait mieux contribuer aux propriétés mécaniques du béton que les cendres volantes.

Béton	CemCalc II		CemCalc I		Différence II - I	
	$E_{cm,28}$ [MPa]		$E_{cm,28}$ [MPa]		[MPa]	%
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	38123	CEM I 52,5 R HES	40139	-2016	-5%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	35911		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	36327				
	CEM II/B-V 32,5 R	36998				
			CEM III/A 42,4 N LA	38837		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	35998	CEM 1 [30S 65K 5L]	38519	-2521	-7%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	33344	CEM 3 [30S 45K 25L]	38876	-5532	-14%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	36037	CEM 6 [20S 50K 30L]	38095	-2058	-5%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	34605	CEM 10 [10S 55K 35L]	37894	-3289	-9%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	31200				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	36241			
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	39729	CEM I 52,5 R HES	35485	4244	12%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	33852		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	34090				
	CEM II/B-V 32,5 R	33623				
			CEM III/A 42,4 N LA	35488		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	34025	CEM 1 [30S 65K 5L]	35378	-1353	-4%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	30279	CEM 3 [30S 45K 25L]	35289	-5010	-14%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	31454	CEM 6 [20S 50K 30L]	35491	-4037	-11%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	32195	CEM 10 [10S 55K 35L]	34553	-2358	-7%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	28749				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	33728			

Tableau 6-23 – Comparaison des modules d'élasticité à 28 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55) des recherches CemCalc I et CemCalc II

La recherche **CEM X** n'a pas réalisé d'essai de module élastique pour les compositions à base des cendres volantes.

La **relation** entre le **module d'élasticité** moyen et la **résistance à la compression** moyenne à 28 jours est illustrée à la Figure 6-25. Cette figure reprend :

- Le fuseau de la norme NBN B 15-100 compris entre les limites E_{cm1} et E_{cm2} ;
- Le module d'élasticité théorique moyen calculé selon la norme NBN EN 1992-1-1 [30] par la formule :

$$E_{cm}(GPa) = 22 \left(\frac{f_{cm,cyl}(MPa)}{10} \right)^{0.3} \quad \text{avec } f_{cm,cyl} = 0.8 f_{cm,cube}$$

- Les limites inférieure (-30%) et supérieure (+30%) de ce module d'élasticité théorique moyen E_{cm} , telles que préconisées par le « Model Code » de 1978 ;
- Le positionnement des différents bétons par rapport à cette relation $E_{cm} - f_{cm}$.

Les valeurs en bleu dans le Tableau 6-22 indiquent les modules d'élasticité qui ne respectent pas les critères de la **NBN B 15-100**. Tout comme pour CemCalc I, ces modules sont à chaque fois supérieurs à la limite supérieure E_{cm2} . Les compositions qui ne satisfont pas au critère sont les bétons à base des ciments CEM 3 et CEM 6 pour le type 1 et à base des ciments

CEM 3, CEM 6 et CEM 10 pour le type 2. Les modules qui dépassent la limite supérieure E_{cm2} se situent toutefois entre les limites +30% et -30% du module d'élasticité théorique, préconisées dans le « Model Code » de 1978.

Par ailleurs, la relation entre le module d'élasticité et la résistance en compression des bétons confectionnés dans le cadre de cette recherche suit la même tendance que la courbe théorique de la norme NBN EN 1992-1-1.

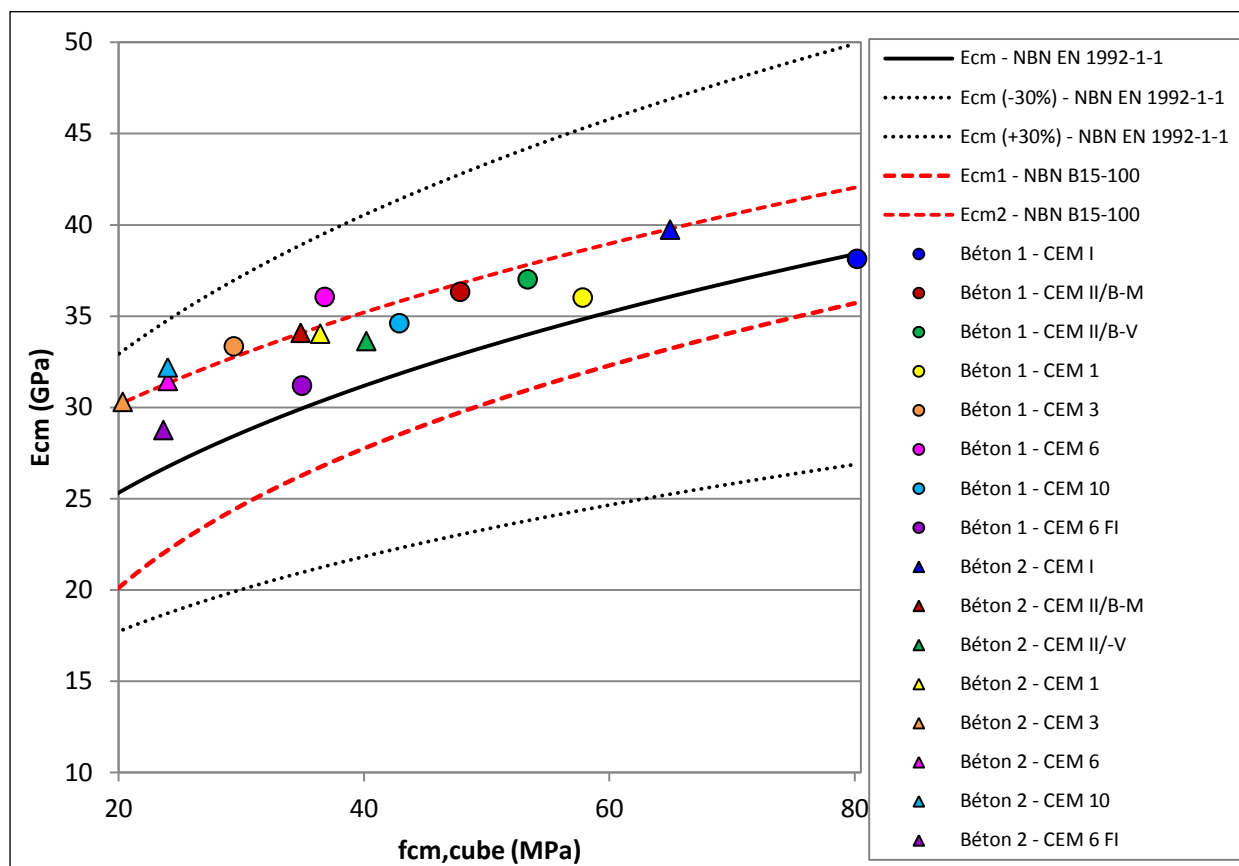


Figure 6-25 – Relation entre le module d'élasticité et la résistance en compression moyenne à 28 jours

Les modules élevés obtenus pourraient s'expliquer par la grande dureté des granulats calcaires utilisés. En effet, la résistance à la fragmentation des granulats 10/14 avait été mesurée dans la recherche CemCalc I. Le coefficient Los Angeles obtenu s'élevait à 20. Cette valeur très faible indique une grande dureté des granulats.

Le fait que les modules d'élasticité soient supérieurs à la limite théorique est un point positif pour de nombreuses applications. La structure se raidit plus vite et les flèches sont moins importantes. Cela permet de décoffrer plus tôt. Par contre, pour des applications de type « sols industriels » ou dans lesquelles il y a du retrait empêché (voile encastré dans un radier par exemple), les contraintes qui se développent à cause des déformations empêchées pourraient être plus élevées lorsque le module d'élasticité est plus élevé.

6.2.8 Retrait

La déformation totale de retrait se compose de la déformation due au retrait de dessiccation et de la déformation due au retrait endogène : $\epsilon_{\text{tot}} = \epsilon_{\text{dessiccation}} + \epsilon_{\text{endogène}}$.

La déformation due au retrait de dessiccation évolue lentement car elle est fonction de la migration de l'eau au travers du béton durci. La déformation due au retrait endogène se développe au cours du durcissement du béton. Elle se produit par conséquent en majeure partie au cours des premiers jours suivant le coulage et est une fonction linéaire de la résistance du béton.

Dans le cas de cet essai de retrait, on mesure la déformation totale de retrait ϵ_{tot} .

6.2.8.1 Principe et conditions de l'essai

L'essai de retrait consiste à mesurer, en fonction du temps, la variation de longueur d'éprouvettes de béton, conservées dans des conditions thermiques et hygrométriques constantes.

Les mesures sont réalisées sur trois prismes de dimensions 10 x 10 x 40 cm³ selon la norme NBN B 15-216 [26], à l'aide de plots métalliques collés sur les quatre faces latérales (voir Figure 6-26). Les prismes sont démoulés à 24 heures. Contrairement à la norme⁷, ils sont ensuite conservés sous eau à 20 ± 2°C pendant 7 jours puis en chambre climatique à 20 ± 2°C et 60 ± 5% HR pendant toute la période de mesure. La mesure de longueur initiale est effectuée à 7 jours en sortant les prismes de l'eau. Les déformations linéaires sont mesurées régulièrement de 7 à 84 jours.



Figure 6-26 – Mesure du retrait

6.2.8.2 Résultats obtenus

Les résultats de retraits moyens ainsi que les écarts-types (moyennes sur 12 mesures, à savoir 3 prismes/composition et 4 faces/prisme) sont donnés au Tableau 6-24 suivant et

⁷ La cure de la norme NBN B 15-216 n'a pas été suivie de manière à avoir une cure identique pour les éprouvettes soumises aux essais de module d'élasticité, de fluage et de retrait et qui soit conforme à la norme NBN B 15-228 relative aux essais de fluage.

présentés aux Figure 6-27 et Figure 6-28 suivantes (béton de type 1 à E/C de 0,45) (béton de type 2 à E/C de 0,55), en fonction de l'âge des bétons.

Béton	Ciment	Retrait de séchage [$\mu\text{m}/\text{m}$] vs Age du béton [jours]				
		14 j	28 j	42 j	63 j	91 j
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	155 ± 14	288 ± 24	355 ± 27	398 ± 22	408 ± 30
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	118 ± 17	287 ± 20	347 ± 17	412 ± 16	426 ± 17
	CEM II/B-V 32.5 R	114 ± 4	247 ± 3	316 ± 2	380 ± 4 (70 j)	402 ± 16
	CEM 1 [30V 65K 5L]	195 ± 14	348 ± 17	400 ± 18	431 ± 16	477 ± 27
	CEM 3 [30V 45K 25L]	94 ± 10	265 ± 84	283 ± 11	321 ± 5	352 ± 10
	CEM 6 [20V 50K 30L]	94 ± 8	241 ± 7	309 ± 12	352 ± 13	375 ± 16
	CEM 10 [10V 55K 35L]	143 ± 20	298 ± 44	341 ± 24	395 ± 24	421 ± 19
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	88 ± 4	222 ± 28	298 ± 8	344 ± 14	350 ± 33
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	195 ± 13	365 ± 5	448 ± 7	494 ± 4	513 ± 4
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	126 ± 23	274 ± 12	333 ± 11	410 ± 12	425 ± 8
	CEM II/B-V 32.5 R	114 ± 5	236 ± 9	311 ± 20	392 ± 20	427 ± 23
	CEM 1 [30V 65K 5L]	163 ± 6	331 ± 20	398 ± 23	437 ± 20	505 ± 32
	CEM 3 [30V 45K 25L]	84 ± 6	221 ± 12	279 ± 11	328 ± 10	357 ± 12
	CEM 6 [20V 50K 30L]	73 ± 7	235 ± 7	302 ± 8	352 ± 6	378 ± 5
	CEM 10 [10V 55K 35L]	126 ± 8	259 ± 9	322 ± 10	374 ± 9	393 ± 13
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	99 ± 13	253 ± 15	324 ± 6	360 ± 4	393 ± 7

Tableau 6-24 – Mesures de retrait pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55)

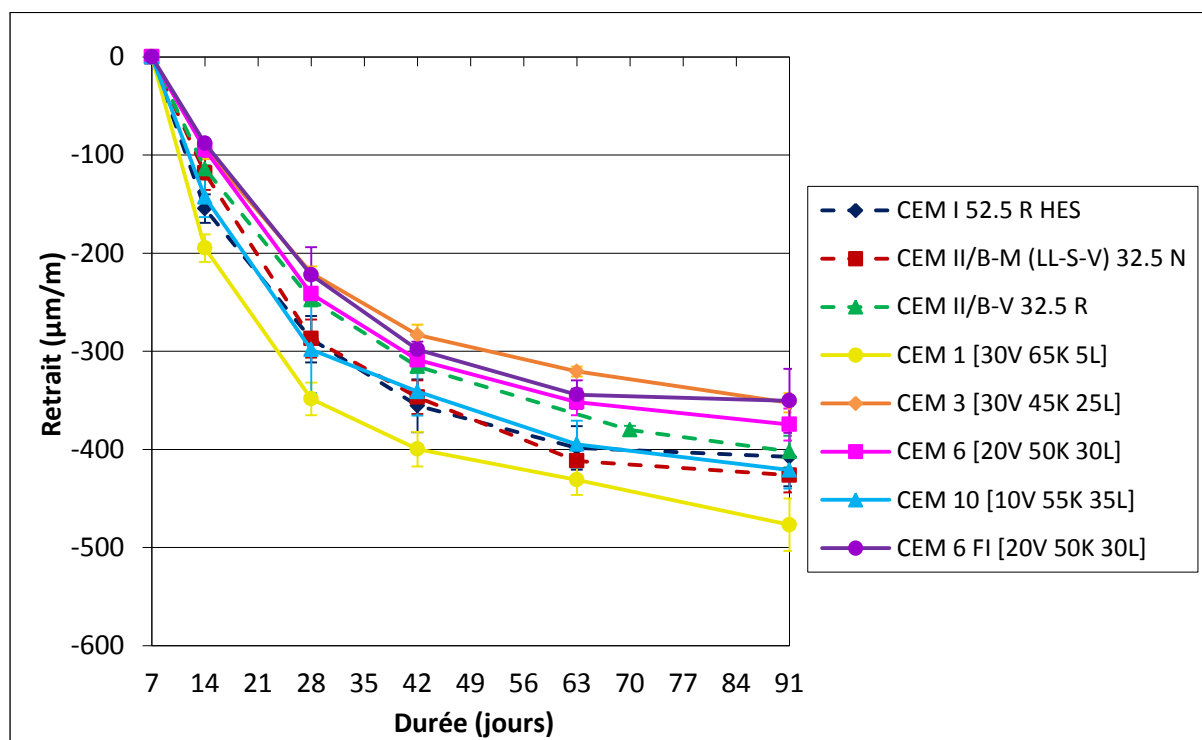


Figure 6-27 – Retrait des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³)

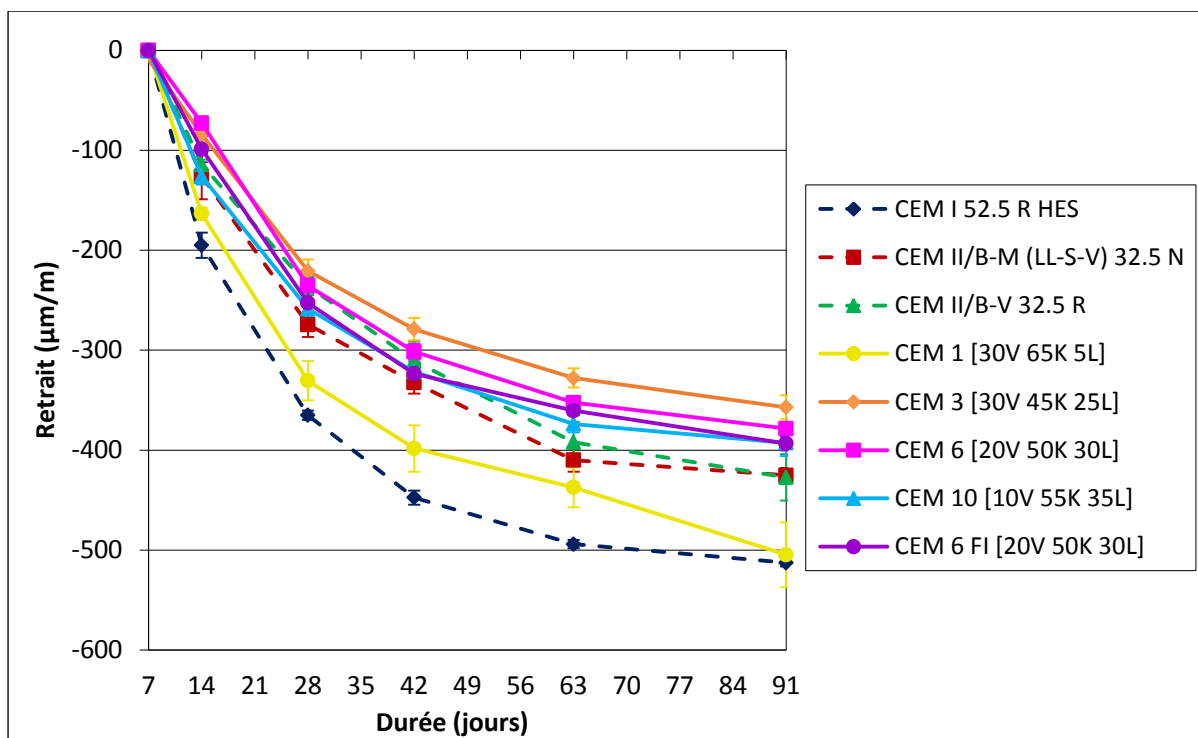


Figure 6-28 – Retrait des bétons de type 2 (E/C de 0,55 et C de 300 kg/m³)

Le retrait des bétons à base des nouveaux ciments K-V-L présentent des retrait **inférieurs** ou égaux au retrait des bétons de référence, sauf le béton de type 1 à base de CEM 1 qui a un retrait plus important.

Le retrait semblerait être relativement proportionnel à la **teneur en clinker** et inversement proportionnel à la **teneur en filler calcaire**, mais cela est moins manifeste pour les bétons de type 1. La présence de cendres volante ne semble pas influencer significativement le retrait.

Le **filler impur** ne semble pas avoir d'influence vu que les bétons à base des CEM 6 et CEM 6 FI ont des retraits similaires.

L'évolution du retrait dans le temps avec les deux types de béton étudiés, qui ont des rapports E/C et des teneurs en ciment C différents, semble être similaire. Cette constatation a également été observée dans la recherche précédente CemCalc I. Les effets contraires sur le retrait d'un E/C plus faible et d'une teneur en ciment plus grande pourraient expliquer cette situation.

Dans **CemCalc I**, les retraits présentaient aussi une tendance à augmenter lorsque la teneur en clinker augmente et lorsque la teneur en filler calcaire diminue. La présence de filler calcaire aurait un effet positif sur le retrait.

Les retraits mesurés dans CemCalc I sont inférieurs à ceux de CemCalc II, comme le montre le Tableau 6-25 ci-dessous.

Béton	CemCalc II		CemCalc I		Différence II - I	
	Retrait à 91 jours [$\mu\text{m}/\text{m}$]		Retrait à 91 jours [$\mu\text{m}/\text{m}$]		[$\mu\text{m}/\text{m}$]	%
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	408	CEM I 52,5 R HES	438	-30	-7%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	350		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	426				
	CEM II/B-V 32,5 R	402				
			CEM III/A 42,4 N LA	387		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	477	CEM 1 [30S 65K 5L]	369	108	29%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	352	CEM 3 [30S 45K 25L]	342	10	3%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	375	CEM 6 [20S 50K 30L]	344	31	9%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	421	CEM 10 [10S 55K 35L]	363	58	16%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	350				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	316			
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	513	CEM I 52,5 R HES	468	45	10%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	343		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	425				
	CEM II/B-V 32,5 R	427				
			CEM III/A 42,4 N LA	392		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	505	CEM 1 [30S 65K 5L]	417	88	21%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	357	CEM 3 [30S 45K 25L]	360	-3	-1%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	378	CEM 6 [20S 50K 30L]	357	21	6%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	393	CEM 10 [10S 55K 35L]	361	32	9%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	393				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	322			

Tableau 6-25 – Comparaison des mesures de retrait à 91 jours pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) et type 2 (E/C de 0,55) de CemCalc I et CemCalc II

La recherche **CEM X** n'a pas réalisé de mesures de retrait pour les compositions contenant des cendres volantes.

Si on se réfère aux critères d'évaluation de la norme **NBN B 15-100** [19], celui relatif au retrait⁸ stipule que la courbe de retrait expérimentale du béton confectionné avec le nouveau ciment doit être comprise entre -49% et +49% de la courbe de retrait théorique donnée dans la norme NBN EN 1992-1-1 [30].

Ainsi, pour chaque ciment ternaire, la courbe de retrait expérimentale a été comparée avec la courbe de retrait théorique, et ses limites inférieure (-49%) et supérieure (+49%), calculée à l'aide du programme ShInt® « Shrinkage_Interactive »⁹, une application développée par l'Antenne Normes « Eurocodes » du CSTC (www.normes.be/eurocodes).

⁸ Il est à mentionner que la norme stipule un total de six éprouvettes prélevées de trois mélanges différents alors que, dans la présente recherche, il s'agit de résultats issus de trois éprouvettes provenant d'un même mélange.

⁹ « Shrinkage Interactive » est une application permettant de calculer facilement le retrait (de dessiccation et endogène) d'un élément en béton en fonction de ses caractéristiques et des conditions ambiantes (humidité relative et température). Le calcul est basé sur les modèles de la norme NBN EN 1992-1-1.

Pour chaque composition de béton, les informations introduites dans le programme de modélisation sont les suivantes (voir Tableau 6-26) :

- Classe de résistance du ciment : voir Tableau 6-12
- Classe de résistance du béton : voir Tableau 6-17
- Rayon moyen de la section transversale h_0 (selon la norme NBN EN 1992-1-1) : 50 mm
- Humidité relative : 60 %
- Cure : 7 jours

Pour les ciments CEM 3 et CEM 6 FI qui n'atteignent pas de classe de résistance, des valeurs minimales ont été choisies afin d'estimer leur retrait théorique. Les ciments CEM 3 et CEM 6 possèdent une résistance en compression sur mortiers supérieure à 10 MPa à 2 jours (voir Tâche 3), ce qui correspond à une classe de ciment de 32,5 R selon la norme NBN EN 197-1 [4]. A 28 jours, leur résistance est juste inférieure au seuil de 32,5 MPa.

Béton	Ciment	Classe résistance ciment	Classe résistance béton	HR [%]	h_0 [mm]	Cure sous eau [j]
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM 1 [30V 65K 5L]	52.5 N	C40/50	60	50	7
	CEM 3 [30V 45K 25L]	32,5 R	C16/20	60	50	7
	CEM 6 [20V 50K 30L]	32.5 R	C20/25	60	50	7
	CEM 10 [10V 55K 35L]	32.5 R	C25/30	60	50	7
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	32,5 R	C20/25	60	50	7
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM 1 [30V 65K 5L]	52.5 N	C20/25	60	50	7
	CEM 3 [30V 45K 25L]	32,5 R	C12/15	60	50	7
	CEM 6 [20V 50K 30L]	32.5 R	C12/15	60	50	7
	CEM 10 [10V 55K 35L]	32.5 R	C12/15	60	50	7
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	32,5 R	C12/15	60	50	7

Tableau 6-26 – Informations introduites dans le programme ShInt® pour les bétons de type 1 et type 2 à base des ciments ternaires

Valeur bleue : classes minimales supposées pour les ciments CEM 3 et CEM 6 FI

La courbe expérimentale (EXP) ainsi que les courbes théoriques (TH, TH (-49%) et TH (+49%)) de retrait total de chaque composition de béton à base des ciments ternaires K-V-L sont présentées aux Figure 6-29 et Figure 6-30.

Quel que soit le type de béton, il apparaît que le retrait expérimental des bétons ternaires est inférieur ou égal au retrait théorique. La courbe de retrait expérimentale est comprise entre -49% et +49% de la courbe théorique. Seule la valeur à 14 jours du CEM 6 type 2 sort de la limite inférieure théorique (-49%). Ceci pourrait s'expliquer par la cure de 7 jours sous eau appliquée aux éprouvettes et entraînement un gonflement qui n'a pas été pris en compte par le programme de modélisation.

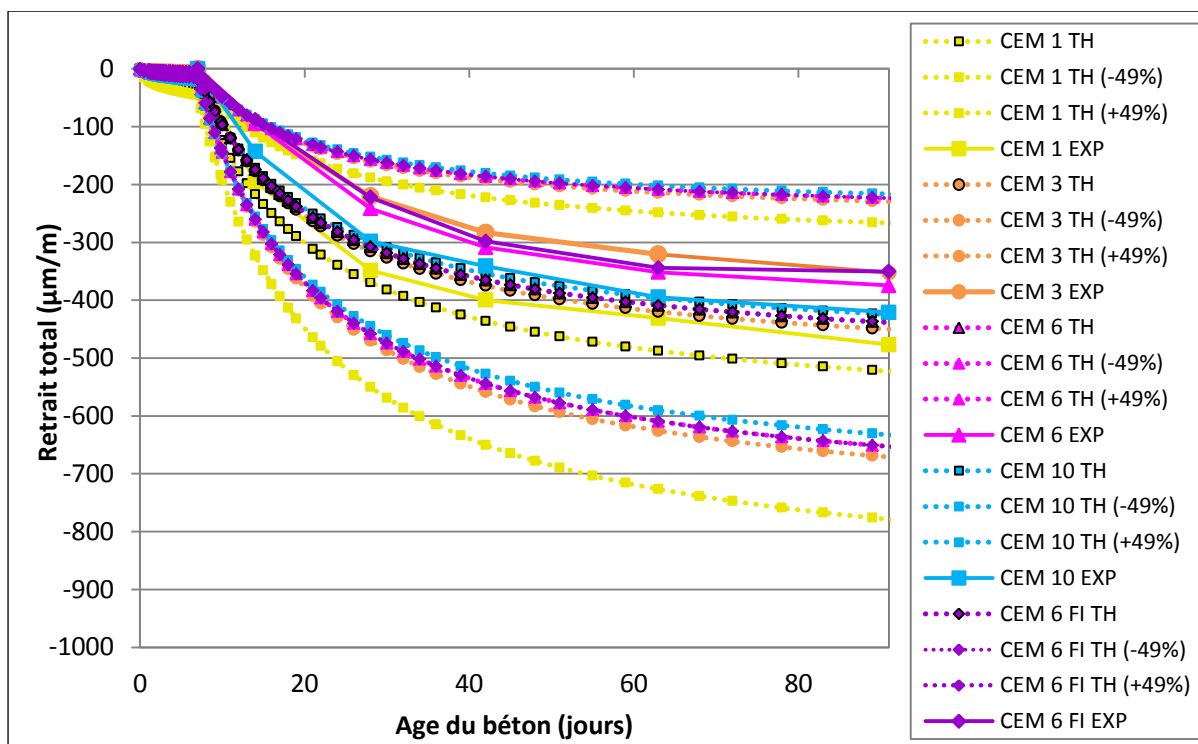


Figure 6-29 – Retraits expérimental et théorique des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) à base des ciments ternaires

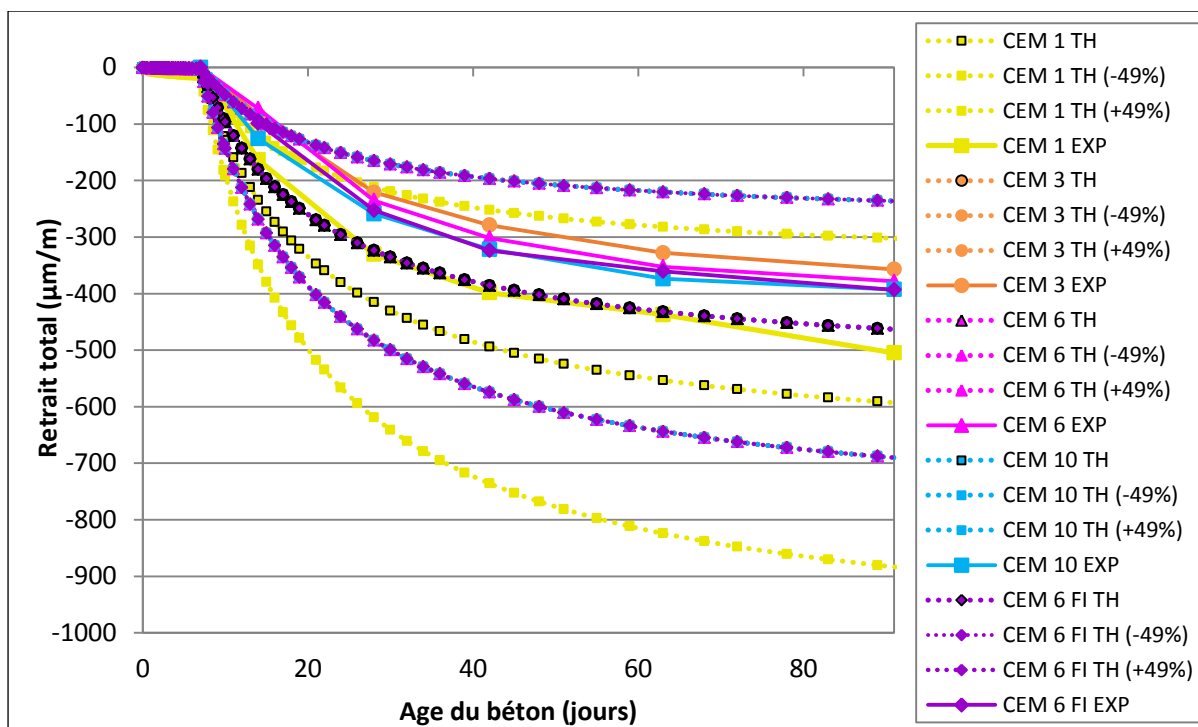


Figure 6-30 – Retraits expérimental et théorique des bétons de type 2 (E/C de 0,55 et C de 300 kg/m³) à base des ciments ternaires

6.2.9 Fluage

6.2.9.1 Principe et conditions de l'essai

L'essai de fluage consiste à mesurer les déformations longitudinales d'éprouvettes en béton durci soumises à un effort de compression constant durant une longue période. Conventionnellement, la déformation de fluage (ϵ_f) se calcule en soustrayant des déformations totales sous charge (ϵ_t), d'une part, la déformation instantanée sous la même charge (ϵ_i) et, d'autre part, les déformations de retrait (ϵ_r) mesurées sur des éprouvettes identiques non chargées et conservées dans les mêmes conditions (voir résultats du point 6.2.8) : $\epsilon_{\text{fluage}} = \epsilon_{\text{tot}} - \epsilon_i - \epsilon_{\text{retrait}}$. La déformation instantanée (ϵ_i) est déterminée par la formule :

$$\epsilon_i = \frac{\sigma_f}{E_{cm,28}}$$

avec : σ_f = la contrainte de fluage appliquée

Les mesures sont réalisées sur trois prismes de dimensions 10 x 10 x 40 cm³ selon la norme NBN B 15-228 [25], à l'aide des équipements présentés à la Figure 6-31. Les prismes sont démoulés à 24 heures ; ils sont ensuite conservés sous eau à 20 ± 2°C pendant 7 jours puis en chambre climatique à 20 ± 2°C et 60 ± 5% HR pendant 21 jours. Le béton est âgé de 28 jours au début des essais et ces derniers durent 6 mois.



Figure 6-31 – Réalisation de l'essai de fluage

6.2.9.2 Résultats obtenus

Les coefficients de fluage moyens (moyennes sur 3 prismes) sont présentés à la Figure 6-32. Ils sont obtenus en divisant les déformations de fluage (ϵ_f) par la déformation instantanée (ϵ_i) :

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{fluage}}{\varepsilon_i}$$

La déformation instantanée (ε_i) est ici obtenue par la formule :

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_{fi}}{E_{cm,28}} = \frac{F_i/S}{E_{cm,28}}$$

avec :

- σ_{fi} = la contrainte de fluage appliquée moyenne initiale (= à la première mesure)
- F_i = la force appliquée moyenne initiale (= à la première mesure)
- S = surface où la charge est appliquée (= 100 mm x 100 mm)
- $E_{cm,28}$ = module élastique moyen à 28 jours

Etant donné le coût des dispositifs de fluage et la durée de ces essais (6 mois), seuls les bétons de type 1 (E/C de 0,45) à base des ciments CEM II/B-V 32,5 R, CEM 6 et CEM 6 FI ont été étudiés. Entre le 70^e et le 140^e jour, une perte de données s'est produite suite à un problème non détecté à temps. Dix mesures ont été manquées mais ces mesures intermédiaires ne sont pas critiques pour l'allure de la courbe.

Les valeurs des ε_i obtenues pour les bétons à base des ciments testés sont indiquées dans le Tableau 6-27 suivant :

Ciment	F_i [kN]	$E_{cm,28}$ [MPa]	ε_i [%]
CEM II/B-V 32,5 R	128.9	36998	0.0348
CEM 6 [20V 50K 30L]	77.5	36037	0.0215
CEM 6 FI [20V 30K 50L]	86.4	31200	0.0277

Tableau 6-27 : Calcul des déformations instantanées ε_i pour le fluage

Outre les courbes expérimentales, cette figure présente également les courbes de fluage théoriques relatives à chaque composition de béton ainsi que leurs limites inférieures (-34%) et supérieures (+34%). Ces courbes théoriques ont été calculées selon la norme NBN EN 1992-1-1 [30] en utilisant les valeurs de résistance en compression à 28 jours et de module d'élasticité des bétons, ainsi que les paramètres et hypothèses suivants :

- $f_{ck,cyl} = (0.8 f_{cm,cube}) - 8$
- Humidité relative : 60%
- Age des bétons au début des essais t_0 : 28 jours
- Ciments à prise normale au sens des formules de la norme (type N¹⁰)
- Rayon moyen de la section transversale h_0 : 50 mm

¹⁰ Le ciment CEM 6 FI n'entre pas dans une classe de résistance du fait de sa résistance en compression sur mortiers à 28 jours inférieure à 32,5 MPa. Par contre, à 2 jours, le ciment rentre dans la classe 32,5 R, ce qui correspond à un ciment de type N.

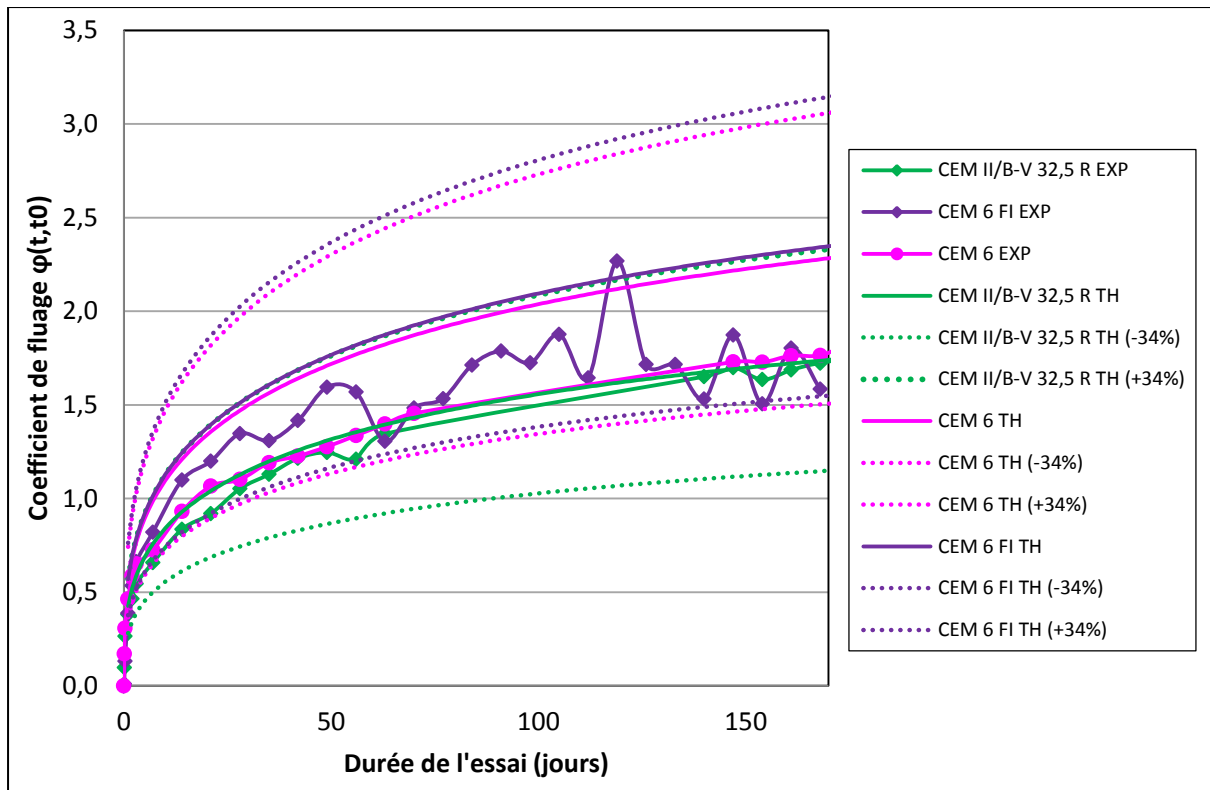


Figure 6-32 – Coefficients de fluage expérimental et théorique des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) à base des ciments CEM II/B-V 32,4 R, CEM 6 et CEM 6 FI

Les bétons à base du nouveau ciment ternaire CEM 6 [20V 50K 30L] présente un coefficient de fluage **semblable** à celui du béton de référence avec le ciment CEM II/B-V 32,5 R. Ce résultat peut sembler étonnant vu que la résistance en compression et le module d'élasticité sont différents. Néanmoins, le module élastique du CEM 6 (36037 MPa) semble fortement élevé par rapport à celui du CEM 6 FI (31200 MPa). Le fluage du béton à base du CEM 6 FI [20V 50K 30L] présente des fluctuations importantes par rapport aux deux autres courbes. Des pertes de charge dues à un problème de fermeture des vannes sont en cause.

Il est difficile de pouvoir déduire des corrélations vu que seulement trois ciments ont été testés, dont les CEM 6 et CEM 6 FI qui ont les mêmes proportions des constituants (20% de cendres volantes, 50% de clinker et 30% de filler calcaire). Le coefficient de fluage aurait tendance à augmenter lorsque la **teneur en cendres volantes** diminue et lorsque la **teneur en filler calcaire** augmente.

La présence de **filler impur** semblerait augmenter le fluage (CEM 6 FI par rapport à CEM 6). Mais il est difficile de tirer des constatations à cause des fluctuations dues à un problème de vanne.

Dans **CemCalc I**, le fluage avait été réalisé sur les ciments CEM II/B-M (L-S) 32,5 R, CEM 1 [30S 65K 5L], CEM 10 [10S 55K 35L] et CEM 12 [30S 35K 35L]. La Figure 6-33 ci-dessous présente les courbes de coefficient de fluage des compositions de CemCalc I et de CemCalc II.

Le fluage des bétons à base des ciments ternaires K-S-L semblent augmenter lorsque la teneur en laitier diminue. Le fluage semble être inversement proportionnel à la résistance en compression. Mais si toutes les courbes sont prises en compte (CemCalc I et CemCalc II), aucune tendance ne ressort.

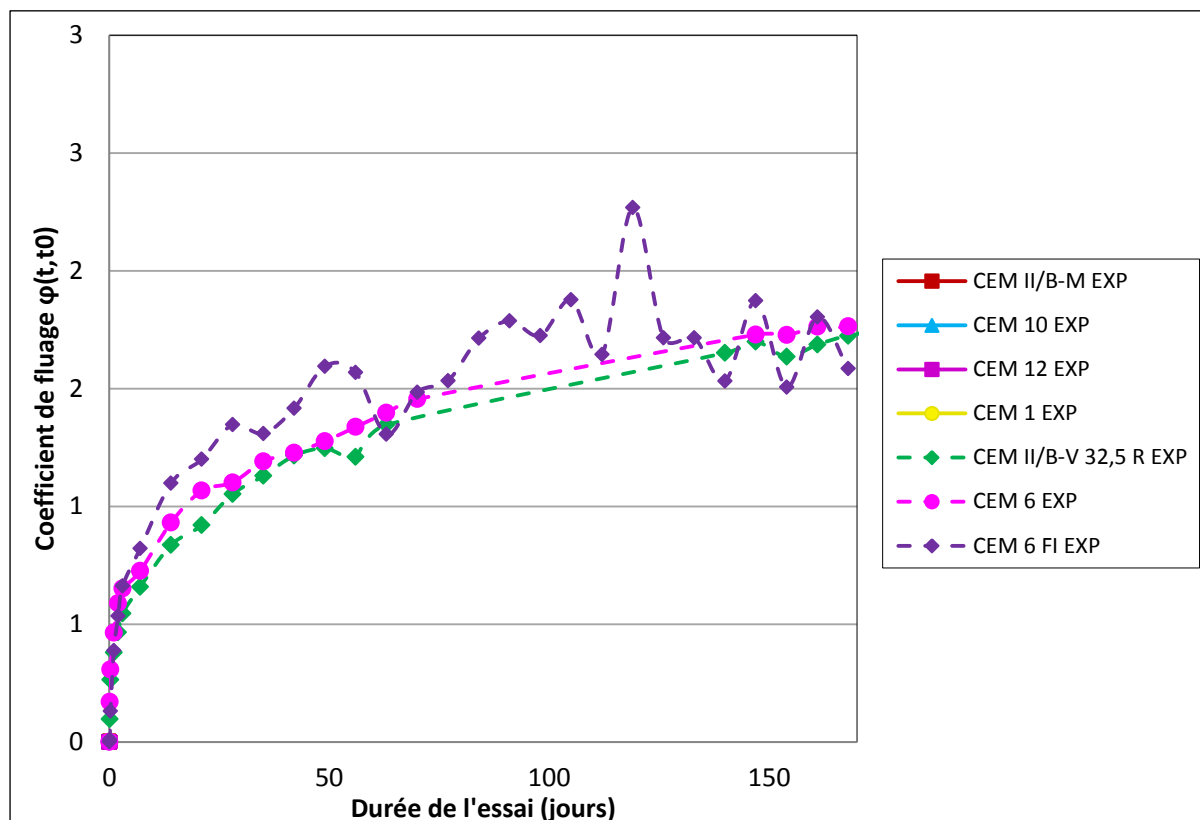


Figure 6-33 – Coefficients de fluage des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) des recherches CemCalc I et CemCalc II

La recherche **CEM X** n'a pas réalisé de mesures du fluage pour les compositions contenant des cendres volantes.

Si on se réfère aux critères d'évaluation de la norme **NBN B 15-100** [19], celui relatif au fluage¹¹ stipule que la courbe de fluage expérimentale du béton confectionné avec le nouveau ciment doit être comprise entre -34% et +34% de la courbe de fluage théorique calculée selon la norme NBN EN 1992-1-1 [30].

¹¹ Il est à mentionner que la norme stipule un total de six éprouvettes prélevées de trois mélanges différents alors que, dans la présente recherche, il s'agit de résultats issus de trois éprouvettes provenant d'un même mélange.

Ainsi, si on compare la courbe de fluage expérimentale de chaque composition de béton avec sa courbe théorique et le fuseau d'évaluation de la NBN B 15-100 correspondant (Figure 6-32), il apparaît que les courbes expérimentales se trouvent bien dans leur fuseau. Le fluage du béton à base de CEM 6 est inférieur au fluage théorique mais reste bien dans le fuseau. Le fluage du béton à base de CEM 6 FI frôle la courbe théorique inférieure (-34%) mais reste dans le fuseau.

Le fait que le fluage soit inférieur à la valeur prédite est un point positif pour de nombreuses applications car on limite ainsi théoriquement les flèches à long terme sous charge permanente. Cependant, pour des applications de type « sols industriels » ou dans lesquelles il y a du retrait empêché, étant donné qu'il y a un développement de contrainte en traction dans celles-ci, un fluage plus faible (une relaxation plus faible en traction), entraînerait un module élastique E' plus élevé et donc des contraintes en traction et des fissurations plus grandes.

Etant donné que les valeurs de résistance à la traction et de module d'élasticité sont supérieures à la valeur moyenne prédite, et que celles de fluage sont inférieures à la valeur prédite, il serait intéressant de réaliser des ring tests (ASTM C1550) afin d'évaluer la fissuration due au retrait empêché pour les applications concernées.

Par ailleurs, le modèle théorique de l'Eurocode n'est peut-être pas adapté à ces types de ciments composés. Il est donc difficile de tirer des conclusions.

6.2.10 Conclusions

La Tâche 6.2 avait pour objectif de comparer les **performances mécaniques** des bétons à base des cinq nouveaux ciments ternaires K-V-L avec celles des bétons à base des ciments industriels de référence.

Des essais sur **béton frais**, il en ressort que les nouveaux ciments ternaires sont assez sensibles au dosage du superplastifiant mais ne nécessitent pas un dosage plus important en adjuvant que les ciments industriels de référence, ce qui est en accord avec la Tâche 5 précédente.

Des essais de **prise** ont été réalisés selon la méthode d'arrachement Kelly-Bryant. Ceux-ci montrent que le temps de prise des bétons à base des ciments ternaires K-V-L est compris entre le temps de prise des bétons industriels de référence à base de CEM I et à base de CEM II, excepté pour le CEM 3.

Les **résistances en compression** des bétons constitués des nouveaux ciments ternaires sont inférieures à celles des bétons de référence, excepté pour le CEM 1 qui est proche des résistances des CEM II/B-M 32,5 N et CEM II/B-V 32,5 R. La classe de résistance visée C35/45 pour le béton de type 1 (E/C de 0,45) a été obtenue avec le CEM 1. Une résistance minimale de 35 MPa est obtenue pour le béton de type 1.

En ce qui concerne les **résistances à la flexion** des bétons constitués des nouveaux ciments ternaires, celles-ci sont inférieures à celles des bétons à base des ciments de référence, sauf pour le CEM 1.

Les **résistances à la traction par fendage** des bétons à base des nouveaux ciments ternaires sont toutes inférieures à celles des bétons à base des ciments de référence, excepté le CEM 1.

Les **modules d'élasticité** des bétons à base des nouveaux ciments sont inférieurs à ceux des bétons à base des ciments de référence, sauf pour le béton type 1 à base du CEM 6 et le béton type 2 à base du CEM 1 qui sont du même ordre.

Le **retrait** total a également été évalué pour chaque composition de béton. Les bétons constitués des nouveaux ciments ternaires K-V-L, sauf celui à base de CEM 1, présentent un retrait plus faible ou équivalent aux bétons de référence.

Finalement, le **fluage** a été déterminé sur les bétons à base du ciment de référence CEM II/B-V 32,5 R ainsi que les nouveaux ciments ternaires CEM 6 et CEM 6 FI. La courbe du coefficient de fluage du CEM 6 est fort semblable à celle de la référence. Par contre, la courbe du CEM 6 FI est légèrement supérieure à celle du CEM 6 mais présente également des fluctuations dues en partie à un problème de fermeture de vanne des postes d'essai.

Le Tableau 6-28 suivant reprend les **facteurs d'influence** (composition, effet de la mauvaise cure, influence du filler impur) prépondérants pour chaque essai réalisé dans cette recherche et présente la comparaison avec la biennale précédente **CemCalc I**. Le premier facteur cité est le plus important. Les facteurs d'influence ont été déterminés par analyse du coefficient de corrélation linéaire (coefficient de corrélation $\geq 0,75$). Pour rappel, un coefficient de corrélation nul ne signifie pas l'absence de toute relation entre les grandeurs. Et l'existence d'une corrélation, aussi bonne soit elle, n'est jamais la preuve d'une relation de cause à effet.

Essais	Facteurs d'influence	
	CemCalc II (K-V-L)	CemCalc I (K-S-L)
Béton frais	<ul style="list-style-type: none"> • Fort sensible au dosage du SP • Effet négatif du filler impur 	<ul style="list-style-type: none"> • Peu sensible au dosage du SP
Prise Kelly-Bryant	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à [K] • Pas influence du filler impur 	<ul style="list-style-type: none"> • Si on compare que les nouveaux ciments ternaires : proportionnel à 1/[L]
Résistance en compression	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à [K] et à 1/[L] • Légère influence mauvaise cure • Pas influence du filler impur 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à 1/[L] • Résistances plus élevées que CemCalc II
Résistance en flexion	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à [K] et à 1/[L] • Corrélation avec Rc • Pas influence du filler impur 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à 1/[L] • Résistances plus élevées
Résistance à la traction par fendage	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à [K] et à 1/[L] • Corrélation avec Rc • Pas influence du filler impur 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à 1/[L] • Résistances semblables (mais que 2 compositions comparables)
Module élastique	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à [K] et à 1/[L] mais moins manifeste • Corrélation avec Rc • Effet négatif du filler impur 	<ul style="list-style-type: none"> • Si on compare que les nouveaux ciments ternaires : proportionnel à [K] • Résistances plus élevées
Retrait	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à [K] et à 1/[L] mais moins manifeste pour le type 1 • Corrélation avec Rc • Pas influence du filler impur 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à [K] et à 1/[L] • Retraits plus faibles
Fluage	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à 1/[V] et à [L] mais seulement 3 ciments testés • Corrélation avec Rc • Pas influence du filler impur 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à 1/[S] • Non comparable avec CemCalc II car pas les mêmes compositions testées

Tableau 6-28 – Synthèse des facteurs d'influence pour chaque essai et comparaison avec la recherche précédente CemCalc I

Pour résumer, sur base des choix réalisés dans cette étude, les conclusions suivantes ont été observées :

- Le temps de prise est principalement influencé par la teneur en clinker [K] des ciments.
- Les propriétés mécaniques sont principalement proportionnelles à la teneur en clinker [K] et inversement proportionnelles à la teneur en filler calcaire [L]. Toutes les propriétés mécaniques sont corrélées à la résistance en compression.
- La mauvaise cure des bétons entraîne une légère influence sur les résistances en compression.
- La présence de filler impur a une influence sur les propriétés du béton frais et généralement pas sur les propriétés mécaniques à l'état durci.
- Le laitier (CemCalc I) semble mieux contribuer aux résistances mécaniques par rapport aux cendres volantes (CemCalc II).

Les résultats obtenus pour chaque performance ont par ailleurs été comparés aux **critères d'évaluation de la norme NBN B 15-100** [19]. Le Tableau 6-29 suivant synthétise les exigences qui sont respectées ou non.

Béton	Ciment	Durcis- sement Facteur s	f _{ck} Classe	Traction f _{ct,5%} ↔ f _{ct,95%}	Module E E _{cm1} ↔ E _{cm2}	Retrait -49% ↔ +49% TH	Fluage -34% ↔ +34% TH
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.20	C50/60	✓	✓	✓	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.38	C30/37	X ^(X)	✓	✓	
	CEM II/B-V 32.5 R	0.25	C35/45	✓	✓	✓	✓
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.20	C40/50	✓	✓	✓	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	-	C16/20	X ^(X)	X ^(*)	✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.25	C20/25	X ^(X)	X ^(*)	✓	✓
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.25	C25/30	X ^(X)	✓	✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	-	C20/25	X ^(X)	✓	✓	✓
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.20	C45/55	✓	X ^(*)	✓	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.38	C20/25	X ^(X)	X ^(*)	✓	
	CEM II/B-V 32.5 R	0.25	C25/30	✓	✓	✓	
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.20	C20/25	X ^(X)	✓	✓	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	-	-	X ^(X)	X ^(*)	✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.25	C12/15	X ^(X)	X ^(*)	✓	
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.25	C12/15	X ^(X)	X ^(*)	✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	-	-	X ^(X)	✓	✓	
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.20	C50/60				
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.20	C25/30				
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.25	C16/20				

Tableau 6-29 – Critères d'évaluation de la NBN B 15-100

✓ : critère respecté – X : critère non respecté – ND : critère non déterminé

(*) : critère de la NBN B 15-100 non respecté mais critère du Model Code de 1978 respecté

(^X) : critère de la NBN B 15-100 non respecté mais résistance à la traction supérieure à la limite supérieure

f_{ct,95%}

Pour résumer, sur base des choix réalisés dans cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires ont des résistances mécaniques plus faibles que les ciments de référence.
- Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires ont un bon comportement en retrait et en fluage. Les valeurs de traction et de module élastique sont supérieures aux limites théoriques correspondantes, ce qui est positif pour de nombreuses applications, sauf pour celles où il y a du retrait empêché (ex : sols industriels). Il serait intéressant de réaliser des ring tests (ASTM C1550) afin d'évaluer la fissuration due au retrait empêché pour les applications concernées.

Nous insistons sur le fait que ces conclusions sont valables en premier lieu pour les choix réalisés dans cette étude (matériaux, formulations, cures, méthodes d'essais, etc.). Il n'est pas opportun de généraliser.

Les principaux résultats de cette étude de performances mécaniques des bétons à base des nouveaux ciments ternaires sont résumés au Tableau 6-30 suivant.

Les valeurs seuils sont les classes de résistance pour la résistance en compression. A partir de ces classes, les valeurs seuils pour la résistance à la traction et pour le module élastique sont calculées par des relations de l'Eurocode. Les valeurs seuils des autres propriétés sont définies en prenant le minimum et le maximum des valeurs, sans compter les valeurs du CEM I 52,5 R HES qui sont trop extrêmes.

Ciment	Composition [%]				Résistance compression 28 jours [MPa]					Résistance flexion 28 jours [MPa]		Résistance traction 28 jours [MPa]		Module élastique 28 jours [MPa]		Retrait à 90 jours [µm/m]		Fluage coefficient à 168 jours
	V	K	L	S	Mortier	Type 1 - BC	Type 1 - MC	Type 2	Type 3	Type 1 - BC	Type 2	Type 1 - BC	Type 2	Type 1 - BC	Type 2	Type 1 - BC	Type 2	Type 1 - BC
CEM I 52,5 R HES		100				80.2	78.3	65	70.1	8.47	7.77	5.74	4.83	38123	39729	408	513	
CEM I 52,5 R HSR		100																
CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	9	71	13	7		47.9		34.8		6.57	5.57	4.31	3.57	36327	34090	426	425	
CEM II/B-V 32,5 R	22	78				53.4	48.6	40.2		6.8	5.8	4.34	3.36	36998	33623	402	427	1.72
CEM 1 [30V 65K 5L]	30	65	5			57.9		36.5	43.5	7.37	5.73	4.57	3.65	35998	34025	477	505	
CEM 3 [30V 45K 25L]	30	45	25			35.1		20.4		5.17	3.97	3.4	2.79	33344	30279	352	357	
CEM 6 [20V 50K 30L]	20	50	30			36.8	34.5	24	29.5	4.9	4.23	3.46	2.81	36037	31454	375	378	1.76
CEM 10 [10V 55L 35L]	10	55	35			42.9		24		6.27	5	3.84	3.08	34605	32195	421	393	
CEM 6 FI [20V 50K 30L]	20	50	30			35	37.5	23.7		5.6	4.23	3.42	2.82	31200	28749	350	393	1.58
Critères					< 32.5	< 25				< 5		< 3		< 29000		> 450		> 1.7
					32.5 - 42.5	25 - 35				5 - 6		3 - 4		29000 - 32000		400 - 450		1.6 - 1.7
					> 42.5	> 35				> 6		> 4		> 32000		< 400		< 1.6

Tableau 6-30 – Synthèse des résultats de l'étude (propriétés mécaniques)

6.3 Tâche 6.3– Performances de durabilité

6.3.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de comparer les performances de durabilité des bétons (mortiers) à base des cinq nouveaux ciments K-V-L avec celles des bétons (mortiers) à base des ciments industriels de référence.

L'étude comparative a été réalisée sur base des essais suivants :

- Résistance à la **carbonatation** selon la norme NBN EN 13295 [35] ;
- Résistance au **gel-dégel en présence de sels de déverglaçage** selon la méthode du Slab-Test de la spécification technique européenne CEN/TS 12390-9 [36] ;
- Résistance au **gel-dégel interne** selon la version en cours de révision de la NBN B 15-100 [37] pour les bétons de classe EE3 ;
- Résistance à la **diffusion des chlorures** selon la spécification technique européenne CEN/TS 12390-11 [38] ;
- Résistance aux **attaques sulfatiques** par des essais de gonflement à 20°C selon la CUR 48 [39] et par des mesures de module d'élasticité et de vitesse sonore à 5°C.

D'autre part, la mesure de la porosité des bétons constitue un indicateur de durabilité important. Ces propriétés **d'absorption d'eau** selon la norme NBN B 15-215 [40] et de **perméabilité à l'air** selon l'AFGC-AFREM [41] sont également présentées dans ce chapitre.

La méthodologie suivie pour l'interprétation des résultats est la suivante :

- Les résultats obtenus avec les nouveaux ciments ternaires K-V-L sont comparés aux ciments de référence ;
- Les facteurs d'influence (composition) sont analysés sur base de leur coefficient de corrélation linéaire¹², en considérant un facteur de corrélation supérieur à 0,75 comme étant significatif ;
- Les influences de la cure ainsi que de la présence de filler impur sont également analysés ;
- Les résultats sont comparés avec les résultats obtenus dans la recherche précédente CemCalc I sur les nouveaux ciments ternaires K-S-L ;
- Les résultats sont aussi comparés avec ceux de la recherche CEM X ainsi que des recherches effectuées dans le passé (Filltech, BeSlag, Cendres Volantes, Gel-dégel et Attaque sulfatique) ;
- Les critères de la norme NBN B 15-100 sont appliqués ;

¹² Il est à noter qu'un coefficient de corrélation nul ne signifie pas l'absence de toute relation entre les deux grandeurs. Il peut exister une relation non linéaire entre elles. En outre, l'existence d'une corrélation, aussi bonne soit elle, n'est jamais la preuve d'une relation de cause à effet (P. Magain, Institut Astro, ULg, in http://www.astro.ulg.ac.be/cours/magain/STAT/Stat_Main_Fr/Home.html, consulté le 1/10/15).

- Les résultats sont confrontés à ce qui se trouve dans la littérature (ouvrages de référence comme le Neville, articles scientifiques, etc.).

Le Tableau 6-31 reprend l'ensemble des essais effectués sur chaque composition de béton et de mortiers ainsi que les cures appliquées pour chacun d'eux.

Type	Ciment	E_{eff}/C	CO ₂	Gel sels	Gel interne	Cl ⁻	Abs eau	Permé-abilité	CO ₂	Gel sels	Cl ⁻	Permé-abilité	Sulfates
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.45	•	•		•	•	•	•	•	•	•	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.45	•	•		•	•	•					
	CEM II/B-V 32.5 R	0.45	•	•		•	•	•	•	•	•	•	
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.45	•	•		•	•	•					
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.45	•	•		•	•	•					
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.45	•	•		•	•	•	•	•	•	•	
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.45	•	•		•	•	•					
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.45	•	•		•	•	•	•	•	•	•	
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.55	•					•					
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.55	•					•					
	CEM II/B-V 32.5 R	0.55	•					•					
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.55	•					•					
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.55	•					•					
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.55	•					•					
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.55	•					•					
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.55	•					•					
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.50	•		•								
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.50	•		•								
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.50	•		•								
MORTIERS	CEM I 52.5 R HES	0.50											•
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.50											•
	CEM II/B-V 32.5 R	0.50											•
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.50											•
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.50											•
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.50											•
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.50											•
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.50											•
CURE			Bonne cure : 91 jours sous eau à 20°C						Mauvaise cure : 28 jours en chambre climatique à 20°C				28 jours sous eau à 20°C

Tableau 6-31 – Récapitulatif des essais de durabilité effectués sur les bétons et mortiers

6.3.2 Résistance à la carbonatation

Le pH élevé du béton jeune conduit à la formation d'une couche d'hydroxyde de fer (couche de passivation) autour des barres d'armature. Cette couche de protection est quasiment impénétrable et empêche la corrosion de l'acier. La réaction du CO₂ contenu dans l'air avec les composants alcalins du béton (réaction dite de *carbonatation*) peut toutefois entraîner une diminution du pH. Par conséquent, la couche de passivation située autour des armatures devient instable et perd sa capacité protectrice dès que le front de carbonatation atteint l'armature. Une corrosion à grande échelle et relativement généralisée est ainsi enclenchée [42].

La carbonatation est un phénomène de diffusion à travers le système des pores du béton. Si le béton est saturé, la diffusion est fortement ralentie, et si le béton est sec, le CO₂ ne peut pas se dissoudre pour réagir. La vitesse de carbonatation est maximale à une humidité relative de 50% à 70%.

Cet essai a pour but d'évaluer, par un essai de laboratoire accéléré, la résistance à la carbonatation des bétons constitués des nouveaux ciments ternaires en la comparant à celle des bétons constitués des ciments industriels de référence. Pour cela, la profondeur de carbonatation ainsi que le coefficient de carbonatation seront déterminés pour toutes les compositions de béton.

La relation entre la profondeur de carbonatation d_k et le coefficient de carbonatation k_c est donnée par la formule suivante, avec t représentant l'âge du béton (en années) :

$$d_k = k_c \sqrt{t} \quad [43]$$

6.3.2.1 Principe et conditions de l'essai

La résistance à la carbonatation des bétons est mesurée en laboratoire par un essai accéléré qui consiste à exposer des échantillons dans une atmosphère contenant 1% de CO₂¹³ selon les recommandations de la norme NBN EN 13295 [35]. Les essais sont réalisés sur trois prismes de dimensions 10 x 10 x 40 cm³. Après démoulage, les prismes sont conservés sous eau à 20 ± 2°C pendant 91 jours.

À la fin de la période de cure, les échantillons sont placés :

- Pendant 14 jours en chambre climatique à 20°C et 60% HR jusqu'à masse constante ;
- Et enfin dans une cellule de carbonatation (voir Figure 6-34) dans une atmosphère à 1% de CO₂ à 20 ± 2°C et 60 ± 10% HR pendant toute la durée de l'essai.

¹³ Une concentration de 1% de CO₂ dans l'air permet d'obtenir les mêmes produits de carbonatation qu'une atmosphère normale contenant 0,03% de CO₂.



Figure 6-34 – Cellule pour l’essai de carbonatation accélérée

Après 7, 14, 28, 56 et 91 jours d’exposition dans la cellule, la **profondeur de carbonatation** est mesurée en cassant chaque échantillon par fendage et en appliquant sur la cassure une solution de phénolphthaléine utilisée comme indicateur coloré (voir Figure 6-35), conformément au mode opératoire spécifié dans la norme NBN EN 14630 [44]. Le même échantillon est utilisé plusieurs fois pour mesurer la progression du front de carbonatation en fonction du temps, en cassant une petite tranche de l’échantillon à chaque mesure.

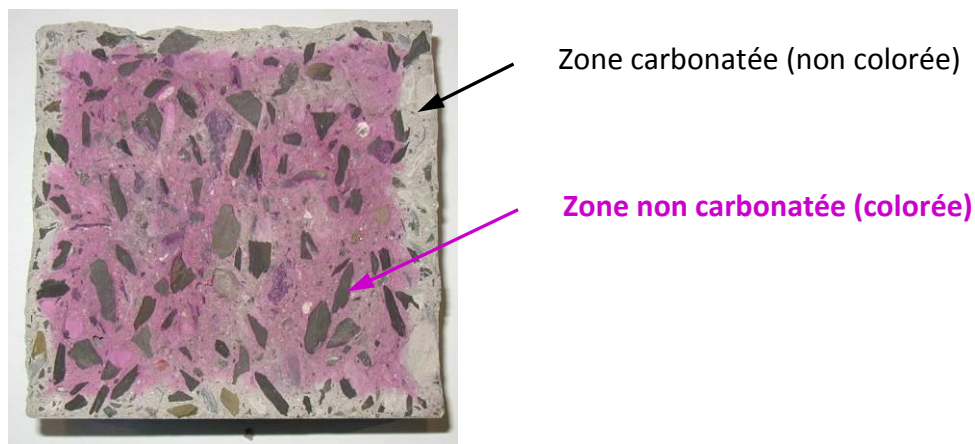


Figure 6-35 – Mesure de profondeur de carbonatation par application d’un indicateur coloré

En portant en graphique la profondeur de carbonatation moyenne en fonction de la racine carrée de la durée d’exposition ($\sqrt{\text{jours}}$), on obtient une droite de régression linéaire dont la pente fournit le **coefficient de carbonatation** k_c (en mm/ $\sqrt{\text{jours}}$) (voir Figure 6-36) [43].

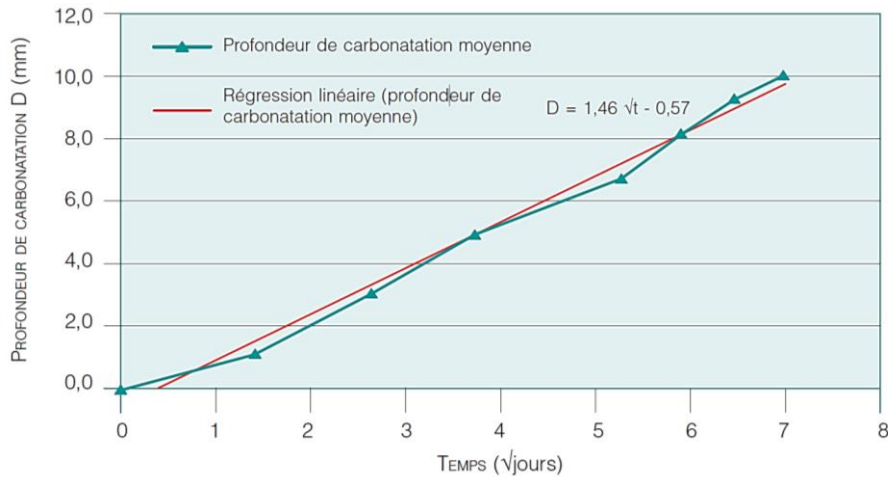


Figure 6-36 – Détermination du coefficient de carbonatation par régression linéaire

6.3.2.2 Résultats obtenus

Le Tableau 6-32 suivant présente les résultats de profondeur de carbonatation moyenne à 7, 14, 28, 56 et 91 jours (moyenne sur 12 mesures : 3 prismes/composition et 4 faces/prisme) ainsi que les coefficients de carbonatation moyens de l'ensemble des compositions des bétons. Ces coefficients sont la moyenne des trois coefficients de carbonatation calculés pour chaque prisme d'une même composition. Les échantillons ayant subi la mauvaise cure ont également été étudiés et les résultats sont présentés au Tableau 6-33.

Pour les bétons CEM 6 FI type 1 et type 2 ainsi que les bétons de type 3, les mesures à 91 jours n'ont pas pu être réalisées à cause d'un problème de la chambre CO₂. Le coefficient de carbonatation a donc été calculé par régression linéaire jusqu'à la profondeur de 56 jours.

Le fait que les bétons de type 1 et de type 3 à base de CEM I 52,5 R HES ne présentent aucune profondeur de carbonatation a également été observé lors de la première biennale CemCalc I pour le béton de type 1 (2^e série). Il est à noter que la couleur rose indique la présence de Ca(OH)₂ mais n'indique pas nécessairement une totale absence de carbonatation [45].

Béton	Ciment	Profondeur de carbonatation moyenne d_k [mm]					k_c
		7 j	14 j	28 j	56 j	91 j	[mm/vjours]
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0*
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.8 ± 0.2	1.9 ± 0.1	3.9 ± 0.8	6.2 ± 0.3	7.5 ± 0.3	0.86 ± 0.01
	CEM II/B-V 32.5 R	0.8 ± 0.1	0.9 ± 0	3.9 ± 0.4	4.1 ± 1.1	6.3 ± 0.2	0.72 ± 0.08
	CEM 1 [30V 65K 5L]	1.4 ± 0.2	2.3 ± 0.2	4.4 ± 0.4	7.4 ± 0.2	8.7 ± 0.5	0.72 ± 0.08
	CEM 3 [30V 45K 25L]	4.7 ± 0.2	5.7 ± 0.2	8.9 ± 0.3	12.2 ± 0.4	16.3 ± 0.2	1.58 ± 0.02
	CEM 6 [20V 50K 30L]	3.6 ± 0.2	4.9 ± 0.2	7.6 ± 0.1	10.3 ± 0.2	13.3 ± 0.4	1.34 ± 0.04
	CEM 10 [10V 55K 35L]	2.3 ± 0.4	3.9 ± 0.1	5.5 ± 0.5	8.3 ± 0.3	10.7 ± 0.6	1.11 ± 0.05
	CEM 6 [20V 50K 30L] – FI	0.3 ± 0.1	2.7 ± 0.5	5.4 ± 0.6	9.7 ± 0.7	-	1.35 ± 0.10
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0 ± 0	1.1 ± 0.3	1.1 ± 0.3	1.6 ± 0.7	2.7 ± 0.4	0.28 ± 0.03
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	2.1 ± 0.3	3.3 ± 0.3	6.7 ± 0.3	8.8 ± 0.4	10.8 ± 0.1	1.19 ± 0.01
	CEM II/B-V 32.5 R	1.2 ± 0.1	4 ± 0.4	6.1 ± 0.2	6.7 ± 0.2	9.8 ± 0.2	1.06 ± 0.05
	CEM 1 [30V 65K 5L]	2.4 ± 0.4	3.5 ± 0.4	6.1 ± 0.3	9.4 ± 0.3	12.1 ± 0.3	1.21 ± 0.08
	CEM 3 [30V 45K 25L]	6.4 ± 1.1	7.5 ± 0.6	11.5 ± 1.2	16.4 ± 0.8	21.6 ± 0.5	2.07 ± 0.03
	CEM 6 [20V 50K 30L]	4.9 ± 0.2	7.8 ± 0	10.4 ± 0.2	14.2 ± 0.6	18.5 ± 0.9	1.84 ± 0.04
	CEM 10 [10V 55K 35L]	3.4 ± 0.4	5.7 ± 0.3	8.5 ± 0.3	12.7 ± 1.2	17.1 ± 0.8	1.75 ± 0.08
	CEM 6 [20V 50K 30L] – FI	0.6 ± 0.3	4.1 ± 0.7	7.2 ± 0.8	13 ± 0.7	-	1.80 ± 0.12
TYPE 3 (E/C = 0,50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	0 ± 0	-	0 ± 0*
	CEM 1 [30V 65K 5L]	1.5 ± 0.5	4.2 ± 0.2	5.5 ± 0.4	6.9 ± 0.3	-	0.98 ± 0.07
	CEM 6 [20V 50K 30L]	1.6 ± 0	5.1 ± 0.6	5.5 ± 0.2	9 ± 0.4	-	1.22 ± 0.04

* Le béton de type 1 à base de CEM I 52,5 R HES n'a pas semblé carbonater. En effet, à 91 jours, la profondeur de carbonatation était toujours négligeable.

Tableau 6-32 – Profondeur de carbonatation et coefficient de carbonatation des trois types de béton ayant subi un bonne cure

Béton	Ciment	Profondeur de carbonatation moyenne d_k [mm]					k_c
		7 j	14 j	28 j	56 j	91 j	[mm/vjours]
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	2.4 ± 0.1	5.6 ± 0.1	6.2 ± 0	6 ± 0.2	6.6 ± 0.2	0.8 ± 0.05
	CEM II/B-V 32.5 R	5.7 ± 0.5	6.7 ± 1	8.9 ± 0.4	11.2 ± 0.1	12.1 ± 0.3	0.99 ± 0.03
	CEM 6 [20V 50K 30L]	7 ± 0.6	9.8 ± 0.1	14.4 ± 0.4	18.4 ± 0.3	21.6 ± 0.9	1.25 ± 0
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	7.9 ± 0.1	10.4 ± 0.3	13.1 ± 0.4	18.5 ± 0.4	21.7 ± 1	1.45 ± 0.11

Tableau 6-33 – Profondeur de carbonatation et coefficient de carbonatation des bétons de type 1 (E/C de 0,45) ayant subi une mauvaise cure

L'évolution de la profondeur de carbonatation moyenne en fonction du temps d'exposition dans la cellule et les coefficients de carbonatation moyens sont présentés aux Figure 6-37 et Figure 6-38 pour les bétons de type 1, aux Figure 6-39 et Figure 6-40 pour les bétons de type 1 ayant subi une mauvaise cure, aux Figure 6-41 et Figure 6-42 pour les bétons de type 2 et aux Figure 6-43 et Figure 6-44 pour les bétons de type 3.

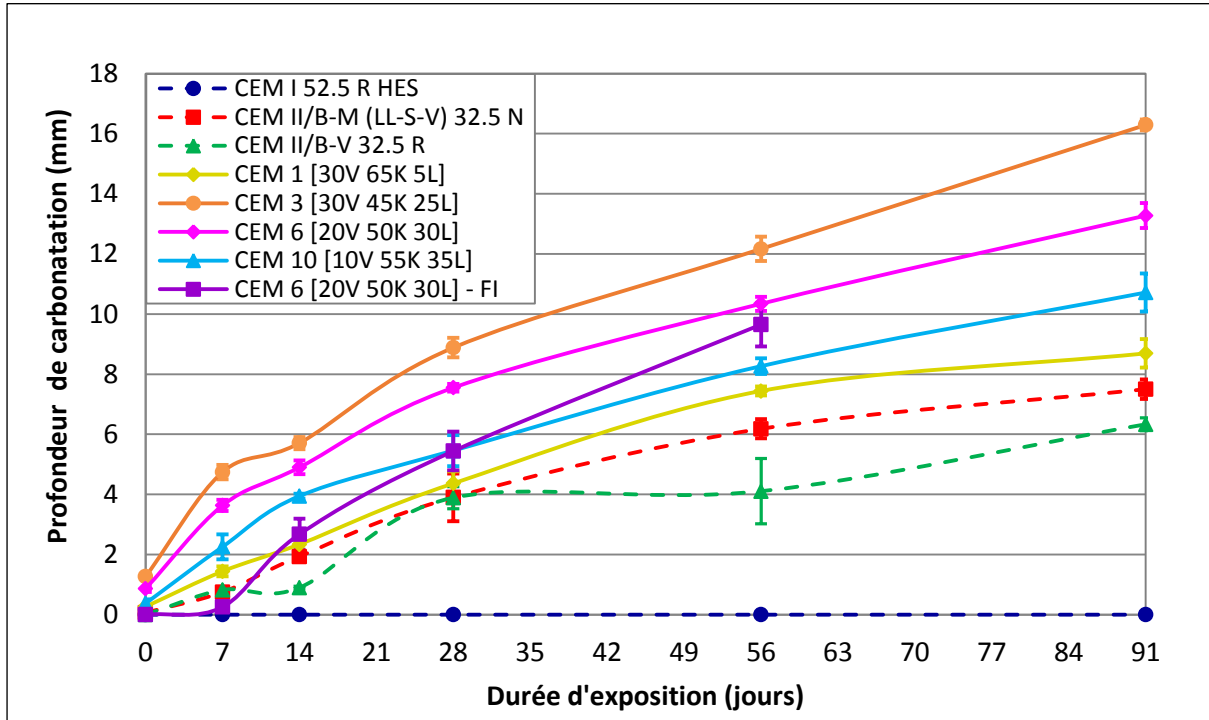


Figure 6-37 – Evolution de la profondeur de carbonatation moyenne des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) ayant subi une bonne cure

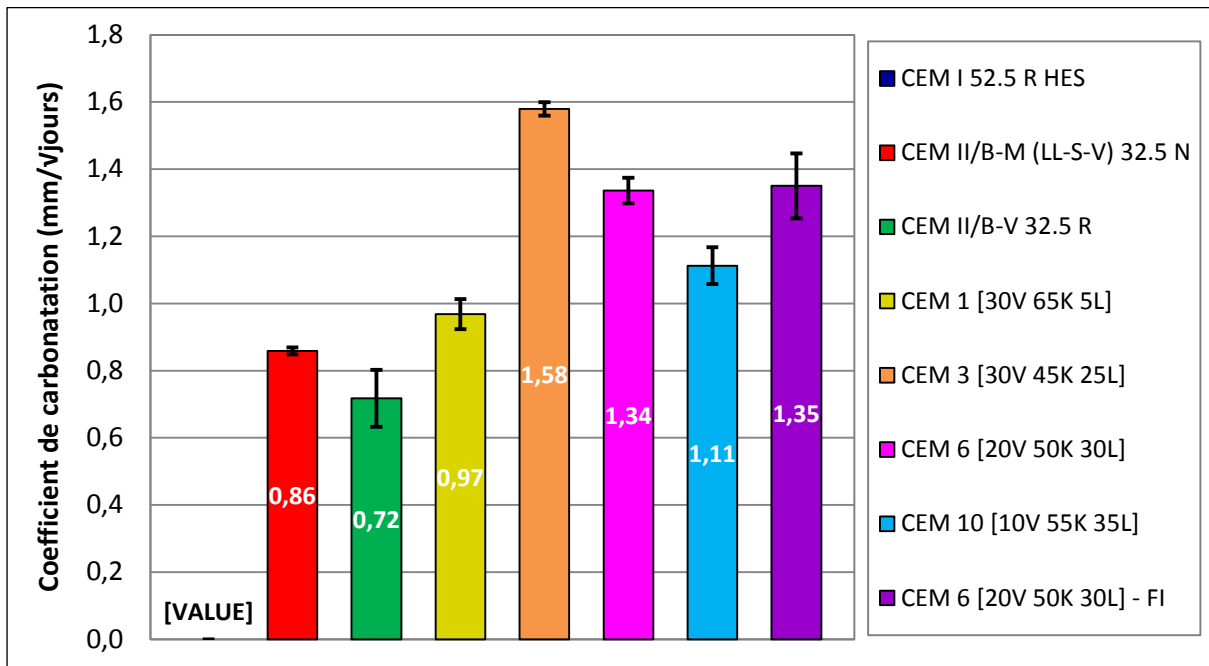


Figure 6-38 – Coefficient de carbonatation moyen des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) ayant subi une bonne cure

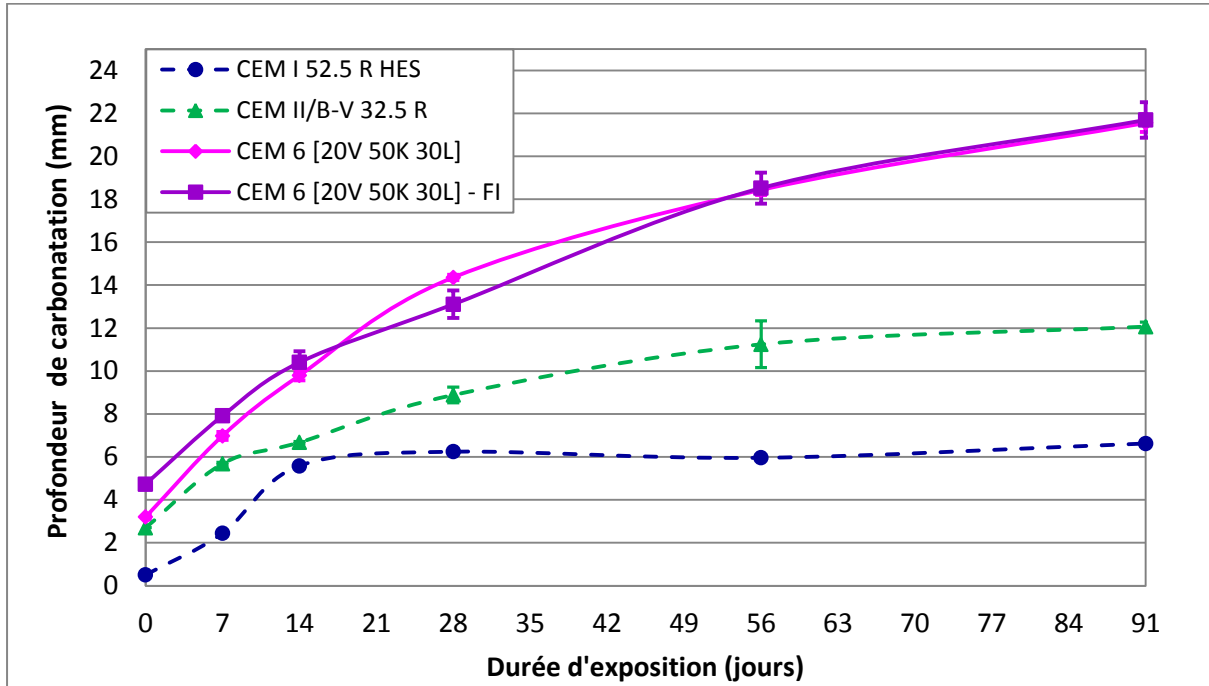


Figure 6-39 – Evolution de la profondeur de carbonatation moyenne des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) ayant subi une mauvaise cure

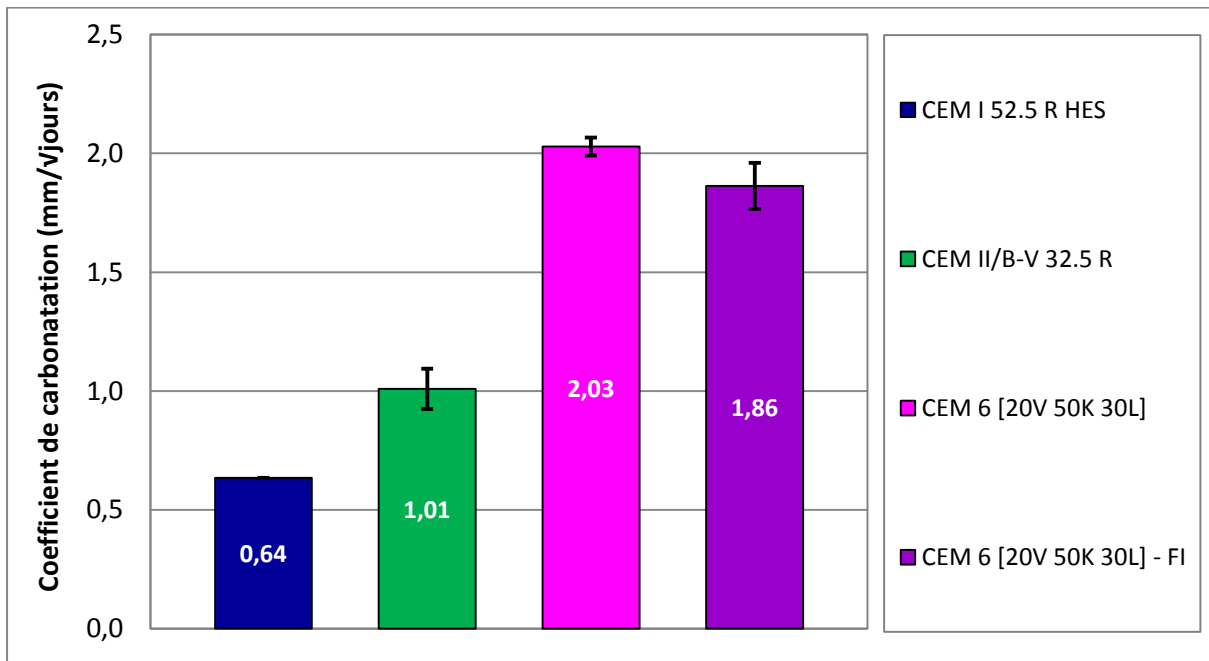


Figure 6-40 – Coefficient de carbonatation moyen des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) ayant subi une mauvaise cure

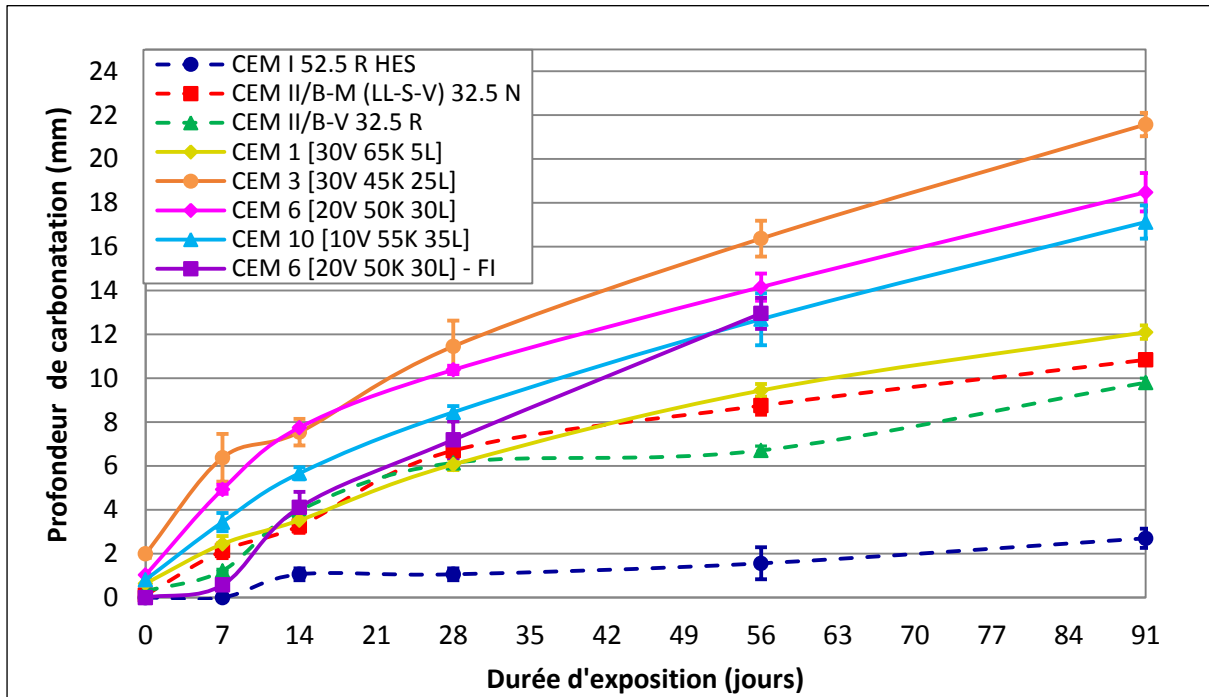


Figure 6-41 – Evolution de la profondeur de carbonatation moyenne des bétons de type 2 (E/C de 0,55 et C de 300 kg/m³) ayant subi une bonne cure

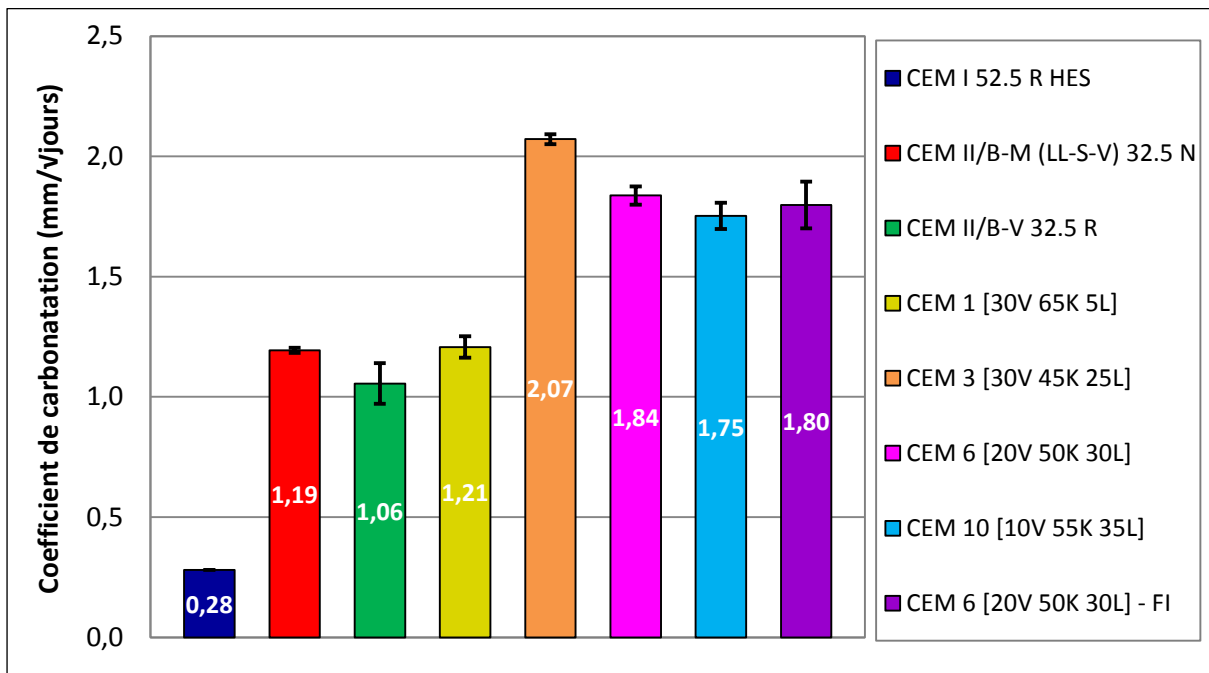


Figure 6-42 – Coefficient de carbonatation moyen des bétons de type 2 (E/C de 0,55 et C de 300 kg/m³) ayant subi une bonne cure

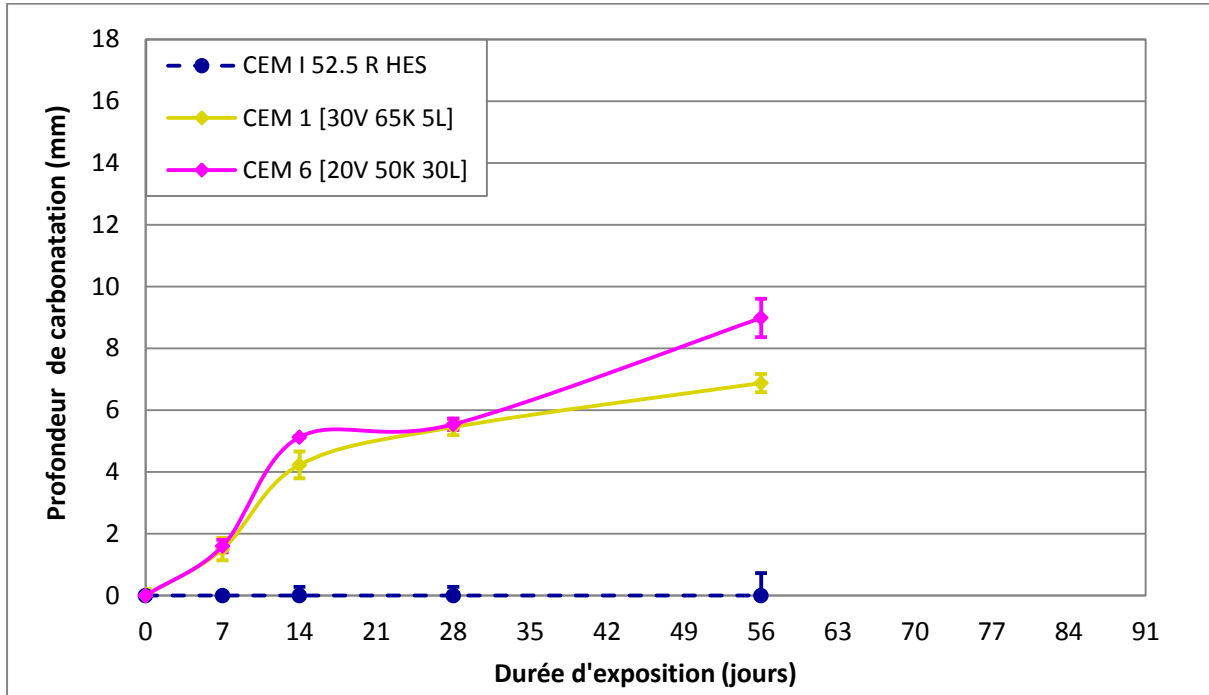


Figure 6-43 – Evolution de la profondeur de carbonatation moyenne des bétons de type 3 (E/C de 0,50 et C de 320 kg/m³) ayant subi une bonne cure

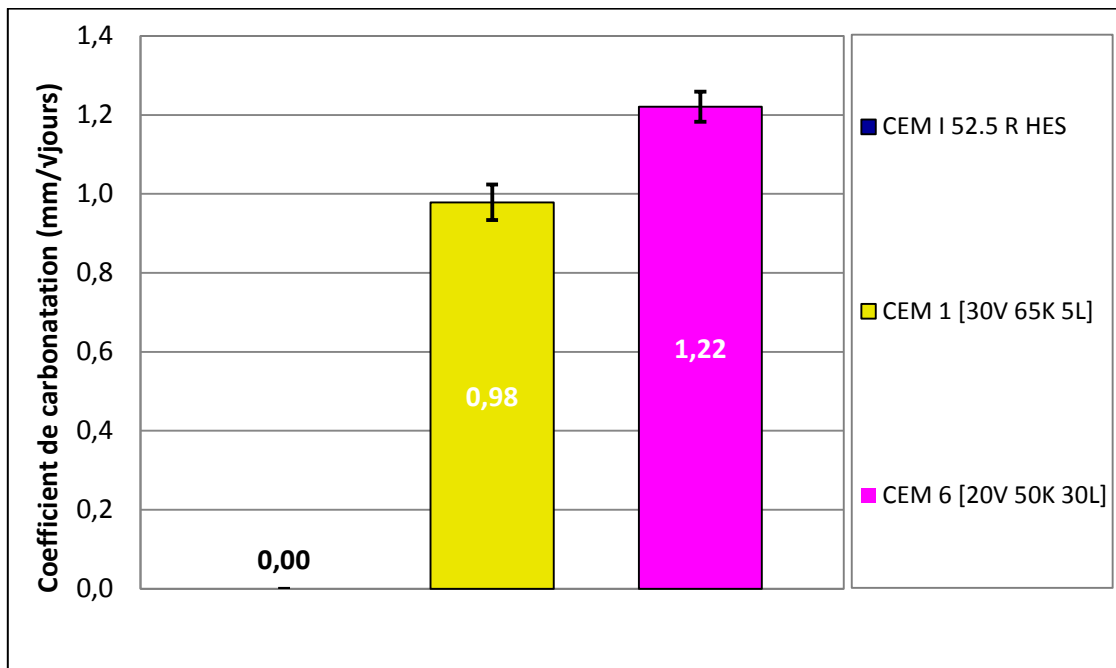


Figure 6-44 – Coefficient de carbonatation moyen des bétons de type 3 (E/C de 0,50 et C de 320 kg/m³) ayant subi une bonne cure

Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires présentent tous des profondeurs de carbonatation **plus importantes** que les bétons de référence. En effet, la carbonatation a tendance à augmenter lorsque la **teneur en clinker** diminue et relativement lorsque la **teneur en filler calcaire** augmente. Cela est en accord avec la **littérature**. En effet, lors de la carbonatation, le CO₂ présent dans l'atmosphère réagit avec les produits d'hydratation du ciment comme la portlandite Ca(OH)₂. Une teneur plus élevée en portlandite permet de ralentir la chute du pH et donc le risque de corrosion des armatures. La quantité de portlandite dans béton contenant des cendres volantes est réduite à cause de la réaction pouzzolanique et la teneur en clinker plus faible [45, 46].

Le béton à base de CEM 1 se rapproche plus des références car il contient 65% de clinker. A noter que la carbonatation pour les bétons de type 2 a été mesurée sur la 1^{ère} gâchée. Le béton de type 2 à base de CEM 10 semble avoir une profondeur de carbonatation trop importante par rapport au CEM 6, qui serait due à une résistance en compression trop faible de la première gâchée (21,5 MPa) par rapport à la deuxième (26,5 MPa) comme l'indique le Tableau 6-30 à la Tâche 6.2.

Le **filler impur** ne semble pas avoir d'influence dans ce cas-ci. Les bétons à base des CEM 6 et CEM 6 FI présentent des comportements similaires vis-à-vis de la carbonatation.

Les bétons présentent une certaine **sensibilité à la cure** en ce qui concerne la carbonatation. En effet, la mauvaise cure entraîne une augmentation de profondeur à 56 jours de plus de 35% pour les bétons à base de CEM 6 et CEM 6 FI et plus de 173% pour le béton à base de CEM II/B-V 32,5 R.

L'influence du type de béton sur la carbonatation est surtout visible avec le béton de type 2.

Dans **CemCalc I**, l'essai de carbonatation a été réalisé pour les bétons de type 2. Dans une deuxième série de bétons, la carbonatation a été déterminée sur quelques bétons de type 1 et de type 2.

La profondeur de carbonatation était proportionnelle à la teneur en filler calcaire et relativement inversement proportionnelle à la teneur en clinker. Le Tableau 6-34 suivant compare les profondeurs de carbonatation à 56 jours des recherches CemCalc I (première série) et CemCalc II. Cela est également illustré à la Figure 6-45. Le Tableau 6-35 suivant compare les profondeurs de carbonatation à 56 jours des recherches CemCalc I (deuxième série) et CemCalc II.

Les profondeurs obtenues dans CemCalc I sont plus faibles, cela signifie que les bétons à base des ciments K-S-L carbonatent moins que les ciments K-V-L. Cela a également été observé dans la recherche CEM X [16]. Le béton A3 [30V 64K 6L] présente une profondeur de carbonatation 45% plus élevée que le béton R3 [30S 64K 6L]. Une raison pourrait être que le laitier de haut-fourneau contribue à un matériau plus dense que les cendres volantes car il s'hydrate plus rapidement (il présente une activité pouzzolanique mais également hydraulique) [47].

Béton	CemCalc II		CemCalc I (1ère série)		Différence II - I	
	Profondeur à 56 j [mm]		Profondeur à 56 j [mm]		[mm]	%
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52,5 R HES	1.6	CEM I 52,5 R HES	4.8	-3.2	-67%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	4.9		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	8.8				
	CEM II/B-V 32,5 R	6.7				
			CEM III/A 42,4 N LA	6.5		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	9.4	CEM 1 [30S 65K 5L]	7	2.4	34%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	16.4	CEM 3 [30S 45K 25L]	9	7.4	82%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	14.2	CEM 6 [20S 50K 30L]	10.1	4.1	41%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	12.7	CEM 10 [10S 55K 35L]	12.3	0.4	3%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	13				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	11.1			

Tableau 6-34 – Comparaison de la profondeur de carbonatation à 56 jours des bétons de type 2 (E/C de 0,45) pour les recherches CemCalc II et CemCalc I (1^{ère} série)

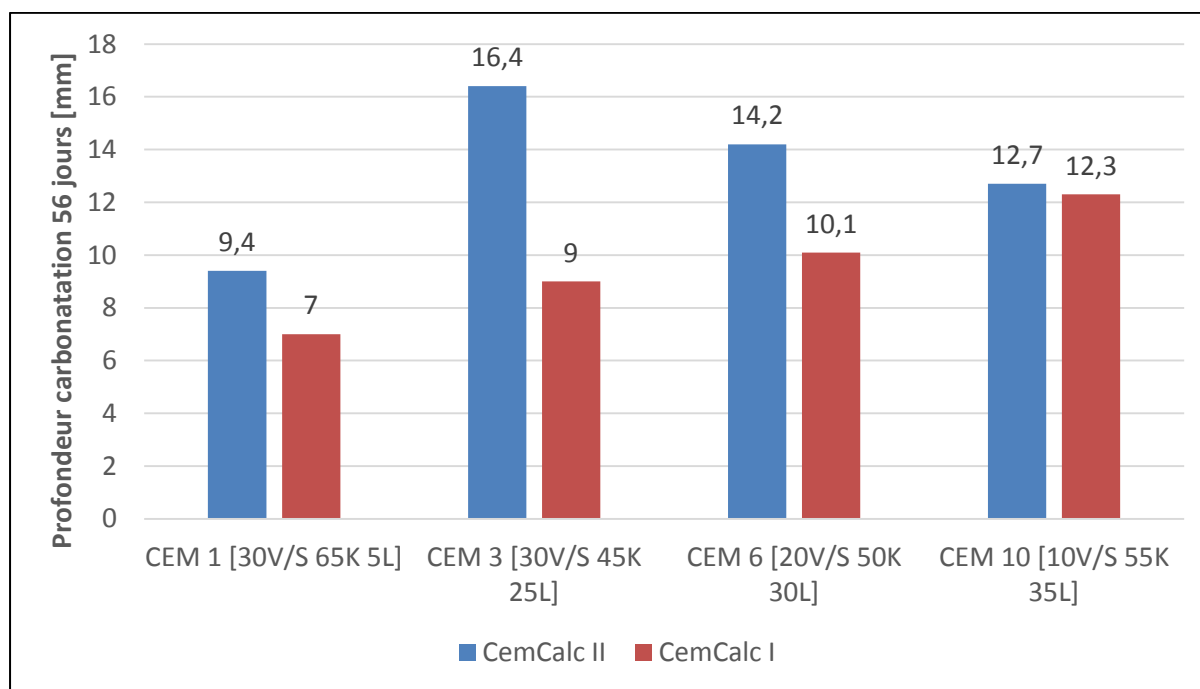


Figure 6-45 – Comparaison de la profondeur de carbonatation à 56 jours des bétons de type 2 (E/C de 0,55) à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L et K-S-L

Béton	CemCalc II		CemCalc I (2e série)		Différence II - I	
	Profondeur à 56 j [mm]		Profondeur à 56 j [mm]		[mm]	%
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m³)	CEM I 52,5 R HES	0	CEM I 52,5 R HES	0	0	0%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	-		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	6.2				
	CEM II/B-V 32,5 R	4.1				
			CEM III/A 42,4 N LA	1.21		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	7.4	CEM 1 [30S 65K 5L]	-	-	-
	CEM 3 [30V 45K 25L]	12.2	CEM 3 [30S 45K 25L]	5.04	7.16	142%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	10.3	CEM 6 [20S 50K 30L]	-	-	-
	CEM 10 [10V 55K 35L]	8.3	CEM 10 [10S 55K 35L]	6.25	2.05	33%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	9.7				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	-			
TYPE 2 (E/C = 0,55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52,5 R HES	1.6	CEM I 52,5 R HES	1.38	0.22	16%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	-		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	8.8				
	CEM II/B-V 32,5 R	6.7				
			CEM III/A 42,4 N LA	-		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	9.4	CEM 1 [30S 65K 5L]	-	-	-
	CEM 3 [30V 45K 25L]	16.4	CEM 3 [30S 45K 25L]	7.46	8.94	120%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	14.2	CEM 6 [20S 50K 30L]	-	-	-
	CEM 10 [10V 55K 35L]	12.7	CEM 10 [10S 55K 35L]	-	-	-
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	13				
		CEM 12 [30S 35K 35L]	-			

Tableau 6-35 – Comparaison de la profondeur de carbonatation à 56 jours des bétons de type 2 (E/C de 0,45) pour les recherches CemCalc II et CemCalc I (2^e série)

Dans la recherche **CEM X**, les bétons à base des ciments A3 [30V 64K 6L] et A4 [20V 50K 30L] présentent des profondeurs de carbonatation à 56 jours de 9,9 et de 13,5 mm respectivement. Ces résultats sont proches des profondeurs des bétons de type 2 à base des ciments CEM 1 [30V 65K 5L] et CEM 6 [20V 50K 30L] avec 9,4 et 14,2 mm de profondeur respectivement.

Si on se réfère à la norme **NBN B 15-100** [19] définissant une méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de ciments et d'additions de type II destinés au béton, le critère d'évaluation relatif à la carbonatation¹⁴ stipule que la profondeur de carbonatation moyenne, mesurée après une carbonatation accélérée de 56 jours, du béton à tester doit être :

$$d_{k,56,\text{béton à tester}} \leq 1.20 d_{k,56,\text{béton de référence}}$$

¹⁴ Il est à mentionner que la norme stipule une cure idéale de 55 jours sous eau alors que, dans la présente recherche, les éprouvettes ont subi une cure de 91 jours sous eau.

Selon la NBN B 15-100, le béton de référence doit être celui à base du ciment CEM I. Ce dernier présente une profondeur de carbonatation à 56 jours de 0, 1,6 et 0 mm pour les bétons de type 1, type 2 et type 3 respectivement. Le critère à respecter pour les bétons à base des nouveaux ciments ternaires est donc de ne pas dépasser 0, 1,92 et 0 mm de profondeur. Aucun béton ne satisfait à ces exigences.

Mais si l'on prend comme référence le béton à base de CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N, qui a une profondeur de carbonatation de 6,2 mm à 56 jours pour le béton de type 1 et de 8,8 mm pour le type 2, les bétons à base de CEM 1 passent les critères de 7,4 mm (type 1) et de 10,6 mm (type 2).

Pour les bétons ayant subi une mauvaise cure, le béton de référence CEM I 52,5 R HES présente une profondeur de carbonatation à 56 jours de 6 mm. Le critère à respecter est donc de 7,2 mm. Aucun béton ne satisfait à ces exigences.

6.3.3 Résistance aux cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage

La résistance au gel-dégel a été évaluée sur l'ensemble des formulations de béton de type 1 (E/C de 0,45) en présence de sels de déverglaçage. Cette méthode est plus agressive et permet de distinguer plus aisément les différences de comportement d'un ciment à l'autre.

Les cycles de gel-dégel en présence de sels de déverglaçage entraînent un écaillage à la surface du béton. Le détachement progressif de fragments à la surface constitue d'une part, un problème d'ordre esthétique, et d'autre part, un problème plus grave lorsque l'épaisseur d'enrobage est significativement réduite. C'est le type de dégradations associés au gel le plus fréquent.

6.3.3.1 Principe et conditions de l'essai

La résistance aux cycles de gel-dégel a été déterminée suivant la méthode du « slab test » décrite dans la spécification technique européenne CEN/TS 12390-9 [36].

L'essai est effectué sur 4 carottes de 113 mm de diamètre et 50 mm de haut prélevées à l'âge de 91 jours dans des prismes de béton conservés sous eau à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ depuis le démoulage (24 heures). Les carottes sont ensuite placées en chambre climatique à une température de $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $60 \pm 5\%$ d'humidité relative pendant 14 jours.

Après cette période, les quatre éprouvettes de chaque formulation ont été préparées (voir Figure 6-46) pour ensuite être testées (la face d'essai est la face sciée). L'électrolyte est une solution à 3% de NaCl.

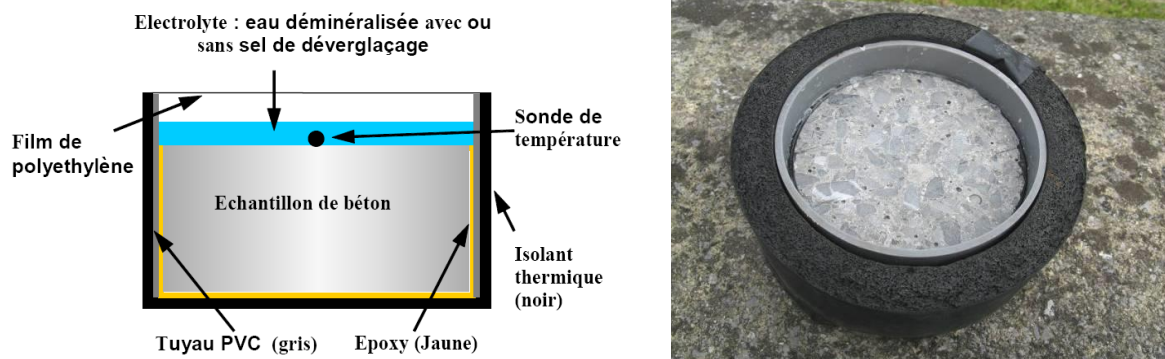


Figure 6-46 – Echantillon préparé suivant la méthode du slab-test

L'essai de gel proprement dit débute lorsque le béton est âgé d'environ 110 jours et consiste à faire subir au béton 56 cycles de gel-dégel de 24 heures chacun, suivant le fuseau de température présenté à la Figure 6-47.

Après 7, 14, 28, 42 et 56 cycles, la matière écaillée à la surface de l'échantillon est récoltée, rincée et pesée après séchage en étuve à $105 \pm 5^\circ\text{C}$. La solution à base de NaCl est renouvelée à chaque mesure.

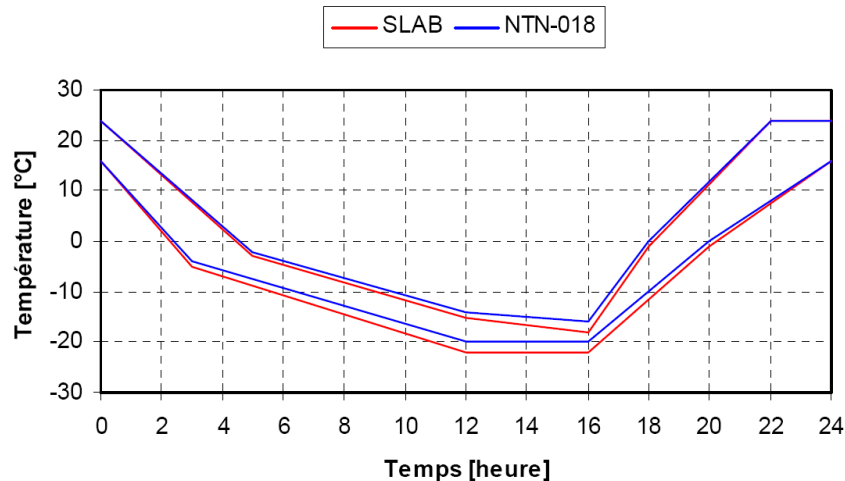


Figure 6-47 – Cycle de température du slab-test

6.3.3.2 Résultats obtenus

Les résultats sont exprimés sous la forme de la quantité de cumulée de matière écaillée moyenne par unité de surface (en kg/m²) après n cycles S_n (moyenne de 4 éprouvettes). Ceux-ci sont présentés au Tableau 6-36 et à la Figure 6-48 et au Tableau 6-37 et à la Figure 6-49 pour les bétons ayant subi une mauvaise cure.

Béton	Ciment	Perte de matière cumulée moyenne après n cycles – S _n [kg/m ²]				
		7	14	28	42	56
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.1 ± 0.1	0.3 ± 0.2	1.1 ± 0.5	2 ± 0.7	3 ± 0.8
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.4 ± 0.1	1.2 ± 0.2	3 ± 0.3	4.7 ± 0.5	6.5 ± 0.4
	CEM II/B-V 32.5 R	0.1 ± 0	0.3 ± 0.1	0.9 ± 0.1	1.6 ± 0.1	2.3 ± 0.2
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.5 ± 0.2	1.4 ± 0.3	2.8 ± 0.4	4.1 ± 0.3	5.3 ± 0.5
	CEM 3 [30V 45K 25L]	2.4 ± 0.1	3.8 ± 0.2	5.9 ± 0.5	7.5 ± 0.5	9.4 ± 0.8
	CEM 6 [20V 50K 30L]	2 ± 0.2	3.8 ± 0.5	4.8 ± 0.5	7.3 ± 0.4	9.4 ± 0.6
	CEM 10 [10V 55K 35L]	1.6 ± 0.8	4.8 ± 0.8	8.7 ± 1.2	12.5 ± 1.4	15.7 ± 1.7
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	2 ± 0.2	3.5 ± 0.3	6.1 ± 0.2	7.6 ± 0.5	8.8 ± 0.7

Tableau 6-36 – Résultats des essais de gel-dégel avec sels de déverglage pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) ayant subi une bonne cure

Béton	Ciment	Perte de matière cumulée moyenne après n cycles – S _n [kg/m ²]				
		7	14	28	42	56
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.4 ± 0.3	1.1 ± 0.7	2.6 ± 1.9	4 ± 2.8	4.8 ± 3.3
	CEM II/B-V 32.5 R	0.3 ± 0	2.5 ± 0.4	3.4 ± 0.4	5.1 ± 0.4	6.5 ± 0.4
	CEM 6 [20V 50K 30L]	1.5 ± 0.4	4.6 ± 0.5	8.8 ± 0.4	12.6 ± 0.4	16.1 ± 0.6
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	1.7 ± 0.4	5.2 ± 1.1	9 ± 1.7	12 ± 1.8	14.6 ± 1.9

Tableau 6-37 – Résultats des essais de gel-dégel avec sels de déverglage pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) ayant subi une mauvaise cure

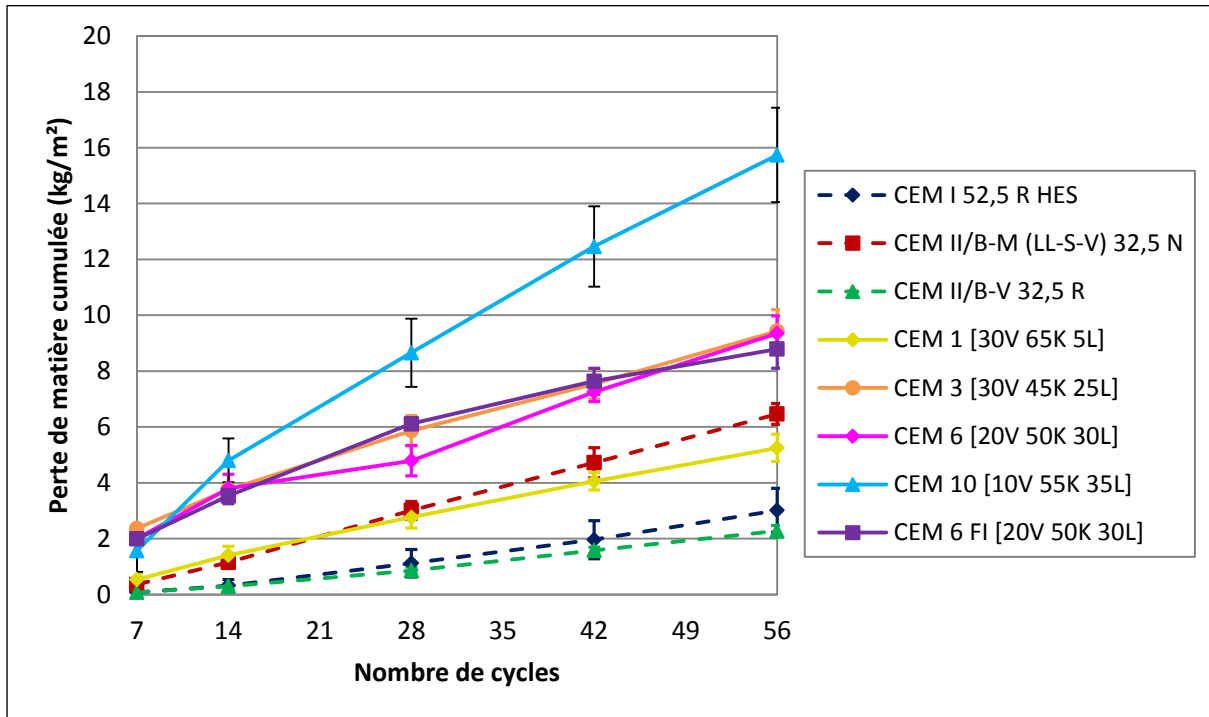


Figure 6-48 – Résultats des essais de gel-dégel avec sels de déverglaçage pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 320 kg/m³) ayant subi une bonne cure

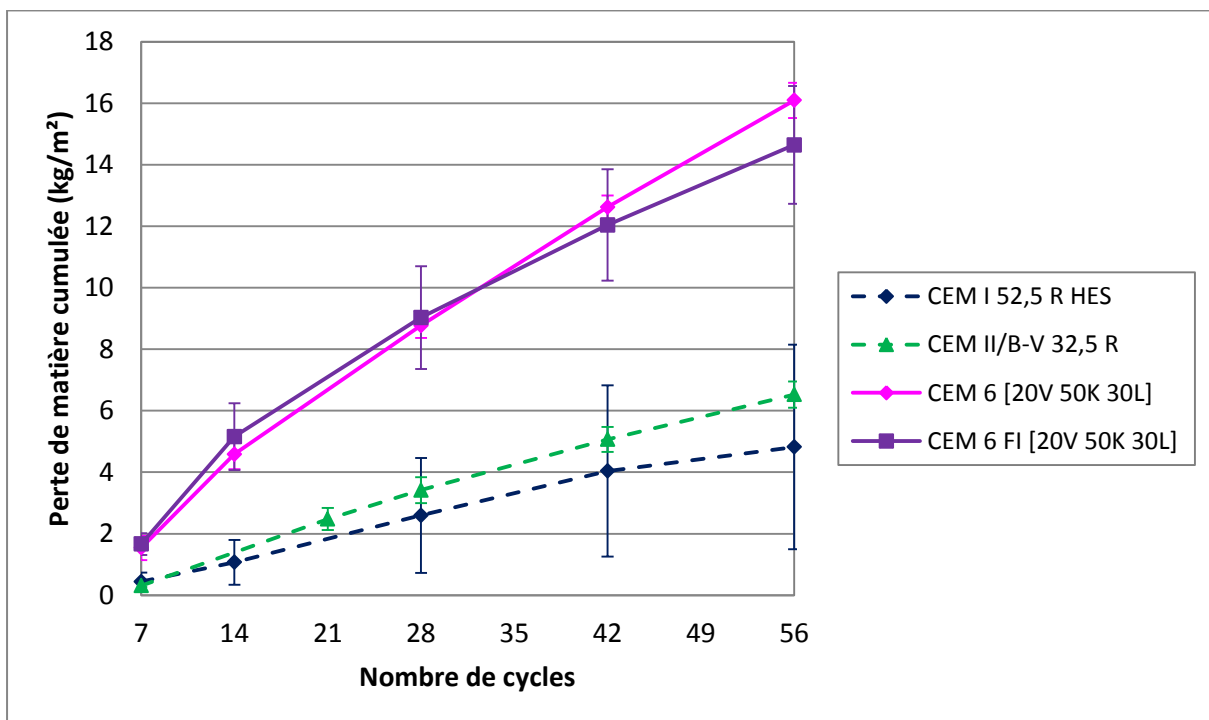


Figure 6-49 – Résultats des essais de gel-dégel avec sels de déverglaçage pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 320 kg/m³) ayant subi une mauvaise cure

Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L ont des pertes de matière **plus importantes** que celles des bétons à base des ciments de référence, sauf celui à base de CEM 1 qui a une résistance supérieure au béton à base du CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N. Les dégradations dues au gel en présence de sels de déverglaçage étant principalement des dommages physiques, les bétons à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L présentent des pertes de matière supérieures car ils ont des résistances mécaniques inférieures.

Dans la **littérature**, il est également observé que les bétons à base de cendres volantes présentent une plus faible résistance aux cycles de gel avec sels de déverglaçage que des bétons de référence sans cendres volantes [46, 48].

La résistance au gel-dégel semble principalement diminuer lorsque la **teneur en filler calcaire** augmente. En effet, le béton à base de CEM 1 contient 5% de filler calcaire et résiste mieux que le béton à base de CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N qui contient 13% de filler calcaire. En outre, le béton à base de CEM 10, contenant 35% de filler calcaire, est celui qui résiste le moins bien avec plus de 15 kg/m² de perte de matière après 56 cycles.

Dans la recherche **Gel-dégel** [49], menée par le CSTC, le CRIC et le CRR, il a également été observé que le ciment binaire CEM II/A-LL 42,5 R (contenant 13% de filler calcaire) présentait les pertes de matière les plus importantes pour le béton B2 sans air entraîné (340 kg/m² de ciment et E/C de 0,45).

Le **filler impur** ne semble pas avoir un impact sur la résistance au gel-dégel avec sels. En effet, les performances des bétons à base des CEM 6 et CEM 6 FI sont similaires.

Cet essai de gel-dégel présente une **forte sensibilité à la cure**. En effet, les bétons ayant subi une mauvaise cure ont une moins bonne résistance, que ce soit pour le béton à base du ciment de référence CEM I 52,5 R HES, ou pour ceux à base des ciments ternaires CEM 6 et CEM 6 FI. La mauvaise cure entraîne une augmentation de plus de 60% de perte de matière cumulée pour le CEM I 52,5 R HES.

La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus lors de la première biennale **CemCalc I**, sur les bétons de la 2^e série, est présentée au Tableau 6-38 suivant et illustrée à la Figure 6-50. Le laitier semble avoir un effet bénéfique pour la résistance au gel. Les bétons à base de cendres volantes dans cette présente recherche ont des pertes de matière cumulées plus importantes. Selon la **littérature** [45, 48], la présence de laitier de haut-fourneau semblerait être positive ou négative par rapport au gel avec sels de déverglaçage, selon les cas. La présence de cendres volantes par contre est défavorable pour cet essai.

Béton	CemCalc II		CemCalc I		Différence II - I	
	S ₅₆ [kg/m ²]		S ₅₆ [kg/m ²]		[kg/m ²]	%
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	3	CEM I 52,5 R HES	3.63	-0.63	-17%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	-		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	6.5				
	CEM II/B-V 32,5 R	2.3				
			CEM III/A 42,4 N LA	1.4		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	5.3	CEM 1 [30S 65K 5L]	-	-	-
	CEM 3 [30V 45K 25L]	9.4	CEM 3 [30S 45K 25L]	1.72	7.68	447%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	9.4	CEM 6 [20S 50K 30L]	-	-	-
	CEM 10 [10V 55K 35L]	15.7	CEM 10 [10S 55K 35L]	4.96	10.74	217%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	8.8				
			CEM 12 [30S 35K 35L]	-		

Tableau 6-38 – Comparaison des résistances au gel-dégel après 56 cycles pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) des recherches CemCalc I (2^e série) et CemCalc II

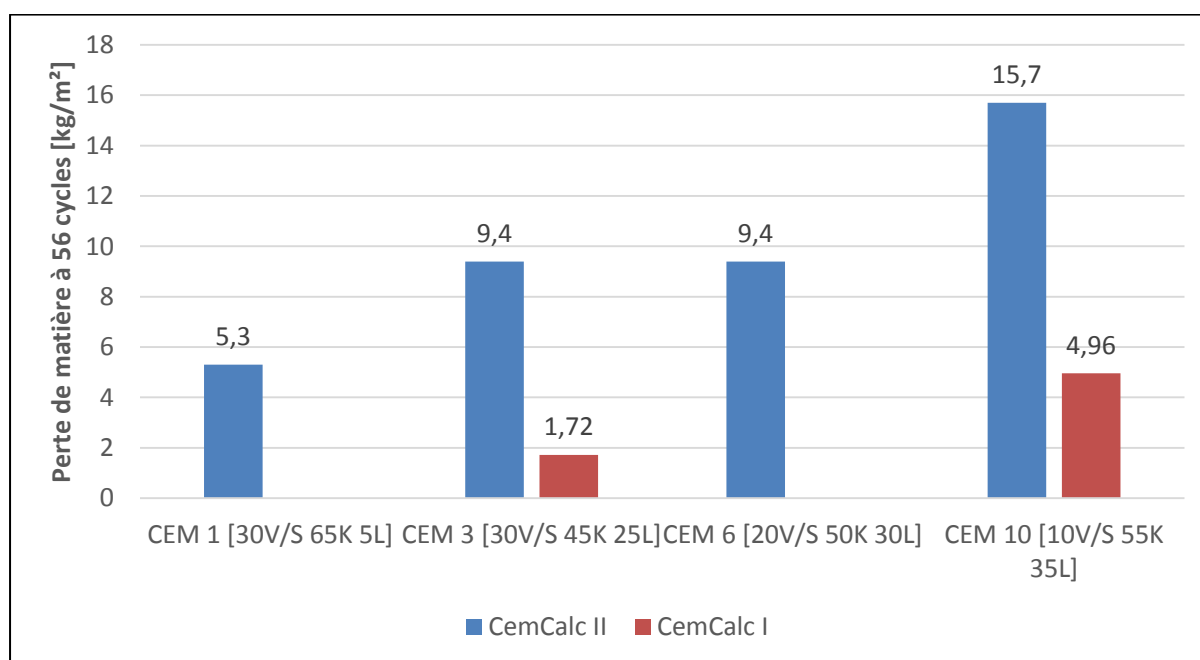


Figure 6-50 – Comparaison des résistances au gel-dégel après 56 cycles pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L et K-S-L

Dans la recherche **CEM X**, l'essai de gel-dégel avec sels de déverglaçage n'a pas été réalisé pour les compositions contenant des ciments K-V-L.

Le critère d'évaluation de la norme **NBN B 15-100** [19] relatif à la résistance aux sels de déneigement¹⁵ stipule que la perte de matière cumulée moyenne, mesurée après 28 cycles de gel-dégel, du béton à tester doit être :

$$S_{28,\text{béton à tester}} \leq 1.20 * S_{28,\text{béton de référence}}$$

La norme NBN B 15-100 impose de prendre un béton à base de CEM I ou de CEM III/A comme référence pour les essais sur béton de type EE4 (bétons de type 1). Le béton à base de CEM I 52,5 R HES testé présente une perte de matière cumulée moyenne de 1,1 kg/m² après 28 cycles de gel-dégel. Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires doivent avoir des pertes de matière inférieures à 1,32 kg/m². Aucun ne respecte ce critère.

Pour les bétons ayant subi une mauvaise cure, le béton de référence CEM I 52,5 R HES présente une perte de matière cumulée moyenne de 2,6 kg/m² après 28 cycles de gel-dégel. Le critère à respecter est donc de 3,12 kg/m². Aucun béton ne satisfait à ces exigences.

Toutefois, comme relevé par Michael Thomas [46], l'essai de gel-dégel avec sels de déverglaçage en laboratoire n'est pas bien corrélé à la pratique. Dans son article, Michael Thomas cite plusieurs cas pratiques qui présentaient une bonne résistance. Cela est également confirmé par ATILH [48]. Dans la réalité, les mois d'été permettent de sécher le béton. La chute de résistance du béton au gel-dégel se produit pour une humidité relative élevée (85% à 90%) [45].

¹⁵ Il est à mentionner que la norme stipule une cure idéale de 55 jours sous eau alors que, dans la présente recherche, les éprouvettes ont subi une cure de 91 jours sous eau.

6.3.4 Résistance aux cycles de gel-dégel interne

La résistance au gel interne est un essai qui a été rajouté pour les bétons de classe d'environnement EE3 car il s'agit d'un environnement soumis au gel et à la pluie, sans sels de déverglaçage. Les ciments testés sont : la référence CEM I 52,5 R HES et les nouveaux ciments ternaires CEM 1 et CEM 6.

Les cycles de gel-dégel sans sels fondants entraînent une fissuration interne dans toute la masse du béton. La dissolution de la portlandite et des sulfoaluminates et la croissance d'hydrates secondaires fibreux causent une intense microfissuration de la pâte de ciment et donc une augmentation de la porosité capillaire et une réduction de la cohésion [48].

6.3.4.1 Principe et conditions de l'essai

Selon la version en cours de révision de la NBN B 15-100 [37], la résistance au gel interne du béton doit être déterminée par un essai accéléré basé sur le « beam test » décrit dans le rapport technique CEN/TR 15177 [50] et par un essai mécanique de traction par fendage.

Les dommages internes causés par le gel sont alors évalués sur base de la diminution **du module d'élasticité dynamique** et de la **résistance à la traction par fendage** et sur base de **l'absorption d'eau** des éprouvettes après 56 cycles de gel-dégel.

L'essai a été réalisé sur six prismes¹⁶ de 100 mm x 100 mm x 400 mm par composition de béton. Après avoir subi une cure idéale de 91 jours, les échantillons ont été conservés en chambre climatique à $20 \pm 2^\circ\text{C}$ et $60 \pm 5\%$ d'humidité relative pour des raisons de disponibilité des frigos servant aux tests de gel interne (voir Figure 6-51). Onze jours après la fin de la cure, 3 échantillons sur 6 par béton ont été soumis aux cycles de gel-dégel et les 3 autres ont été soumis à la traction par fendage (l'essai a été décrit précédemment au point 6.2.6) (traction par fendage) [23]. Les prismes sont fendus en trois endroits : d'abord au milieu puis chaque demi prisme encore en deux.

Les cycles de gel-dégel ont commencé 15 jours après la fin de la cure. La procédure de mesure du module d'élasticité dynamique relatif utilisée ici consiste à mesurer le temps de transit de l'impulsion ultrasonique à l'aide de deux transducteurs, comme illustrée à la Figure 6-52. Le module élastique dynamique relatif est alors calculé comme suit :

$$RDM_{UPTT,n} = \left(\frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 \cdot 100 \text{ [%]}$$

Avec :

- $t_{s,0}$: le temps de transit de l'impulsion ultrasonique initiale en μs
- $t_{s,n}$: le temps de transit de l'impulsion ultrasonique après n cycles en μs

¹⁶ Il est à mentionner que la nouvelle norme NBN B 15-100 stipule un total de dix éprouvettes.



Figure 6-51 – Frigo de gel-dégel interne



Figure 6-52 – Mesure du temps de transit de l'impulsion ultrasonique

L'absorption d'eau est également calculée via des mesures de masse :

$$\Delta m_n = \frac{m_n - m_0}{m_0} \cdot 100 \text{ [%]}$$

Avec :

- m_0 : la masse de l'échantillon juste avant le début des cycles en g
- m_n : la masse de l'échantillon après n cycles en g

L'essai de gel consiste à faire subir au béton 56 cycles de gel-dégel de 12h chacun, suivant le fuseau de température présenté à la Figure 6-53. La période de gel se fait dans l'air et celle de dégel se fait dans l'eau. Les mesures non destructives sont prises après 0, 14, 28, 42 et 56 cycles.

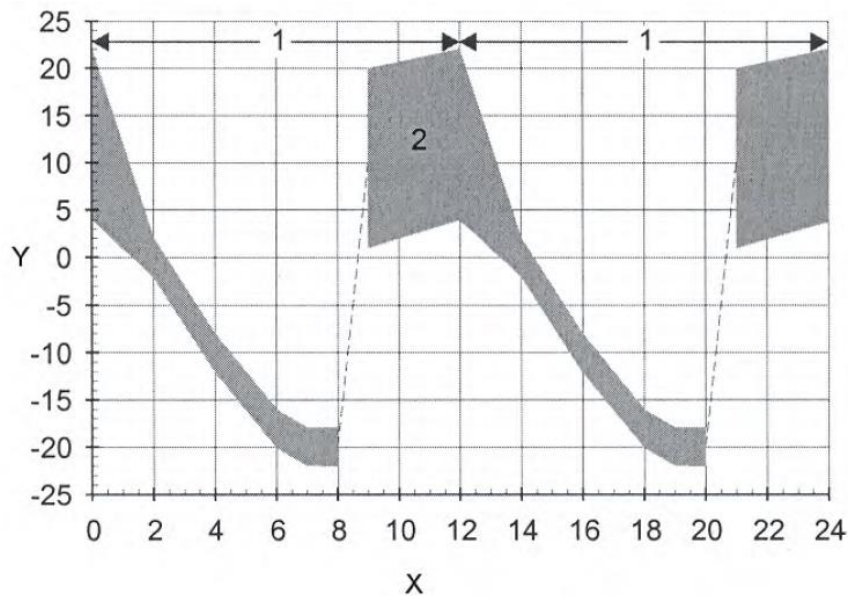


Figure 6-53 – Cycle de température du Beam-Test – 1 : cycle de gel-dégel, 2 : plage de température du prisme de référence, Y : température en °C, X : temps en heure [50]

Après les 56 cycles de gel-dégel, les trois éprouvettes par composition ont été soumises à l'essai de traction par fendage après les cycles.

6.3.4.2 Résultats obtenus

Les résultats de temps d'impulsion, de module élastique dynamique relatif, de résistance à la traction par fendage et d'absorption d'eau et sont présentés aux tableaux et figures suivants.

Béton	Ciment	t (μs) après n cycles				
		0	14	28	42	56
TYPE 3 (E/C = 0,50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	83.3 ± 0.2	84.5 ± 0.3	85.7 ± 0.9	88.9 ± 2.3	97.6 ± 5.8
	CEM 1 [30V 65K 5L]	84.9 ± 1.1	86.1 ± 0.5	86.4 ± 0.8	87.1 ± 0.5	88.6 ± 0.5
	CEM 6 [20V 50K 30L]	87 ± 1.2	88.4 ± 1.2	88.5 ± 1.3	88.2 ± 1.4	88.1 ± 1.1

Tableau 6-39 – Temps de transit de l'impulsion ultrasonique après n cycles de gel-dégel pour les bétons de type 3 (E/C de 0,50)

Béton	Ciment	RDM _{UTTP,n} (%) après n cycles					Perte (%)
		0	14	28	42	56	
TYPE 3 (E/C = 0,50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	100 ± 0	97 ± 1	94 ± 2	88 ± 4	73 ± 9	27%
	CEM 1 [30V 65K 5L]	100 ± 0	97 ± 1	97 ± 1	95 ± 2	92 ± 2	8%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	100 ± 0	97 ± 0	97 ± 0	97 ± 0	98 ± 0	2%

Tableau 6-40 – Module élastique dynamique relatif après n cycles de gel-dégel pour les bétons de type 3 (E/C de 0,50)

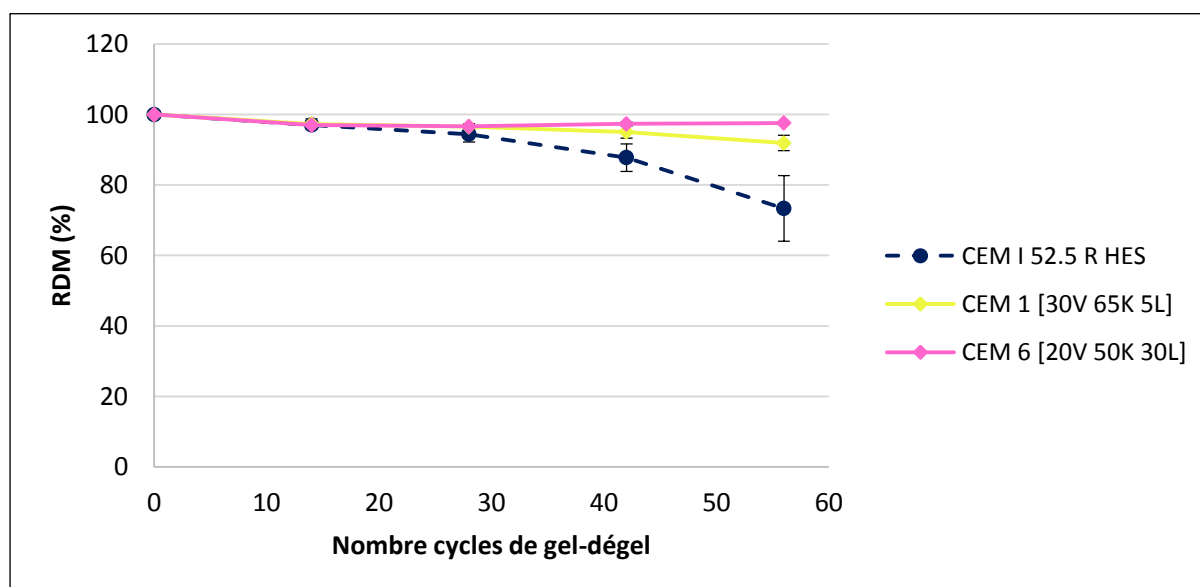


Figure 6-54 – Module élastique dynamique relatif après n cycles de gel-dégel pour les bétons de type 3 (E/C de 0,50 et C de 300 kg/m³)

Au fur et à mesure des cycles de gel-dégel, l'onde met plus de temps pour parcourir l'échantillon de béton. Dans le Tableau 6-39, une augmentation de 17% est observée pour le béton à base du ciment de référence CEM I 52,5 R HES entre la fin des cycles et initialement. Ces mesures résultent en une perte de module élastique dynamique relatif (RDM) comme illustré au Tableau 6-40 et Figure 6-54. Le béton à base de CEM I 52,5 R HES présente une perte de RDM de plus de 26%.

Ces résultats sont fortement corrélés avec la perte de résistance à la traction par fendage présentée ci-dessous aux Tableau 6-41 et Figure 6-55. Le béton de référence présente la plus grande perte avec 35% de résistance en moins après les 56 cycles de gel-dégel, bien qu'il ait la résistance la plus élevée initialement.

Les bétons à base des nouveaux ciments K-V-L testés sembleraient ainsi **plus résistants** au gel que le béton de référence. Il semblerait que la perte de résistance mécanique soit proportionnelle à la **teneur en clinker** et inversement proportionnel à la **teneur en cendres volantes**. La présence de cendres volantes serait donc bénéfique contre le gel interne. Mais il est difficile de tirer ces conclusions avec certitude vu le peu de ciments testés.

Dans la **littérature**, l'influence des matériaux cimentaires comme le laitier et les cendres volantes sur la résistance au gel interne n'est pas encore bien connue [51]. Les additions minérales n'apporteraient pas d'amélioration significative selon l'ATILH (Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques) [48].

Béton	Ciment	fct (MPa) avant et après		Perte (%)
		0	56	
TYPE 3 (E/C = 0,50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	5.1 ± 0.8	3.3 ± 0.2	35%
	CEM 1 [30V 65K 5L]	4.9 ± 0.6	4.2 ± 0.3	15%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	4.6 ± 0.2	4 ± 0.5	12%

Tableau 6-41 – Résistance à la traction par fendage avant et après les cycles de gel-dégel pour les bétons de type 3 (E/C de 0,50)

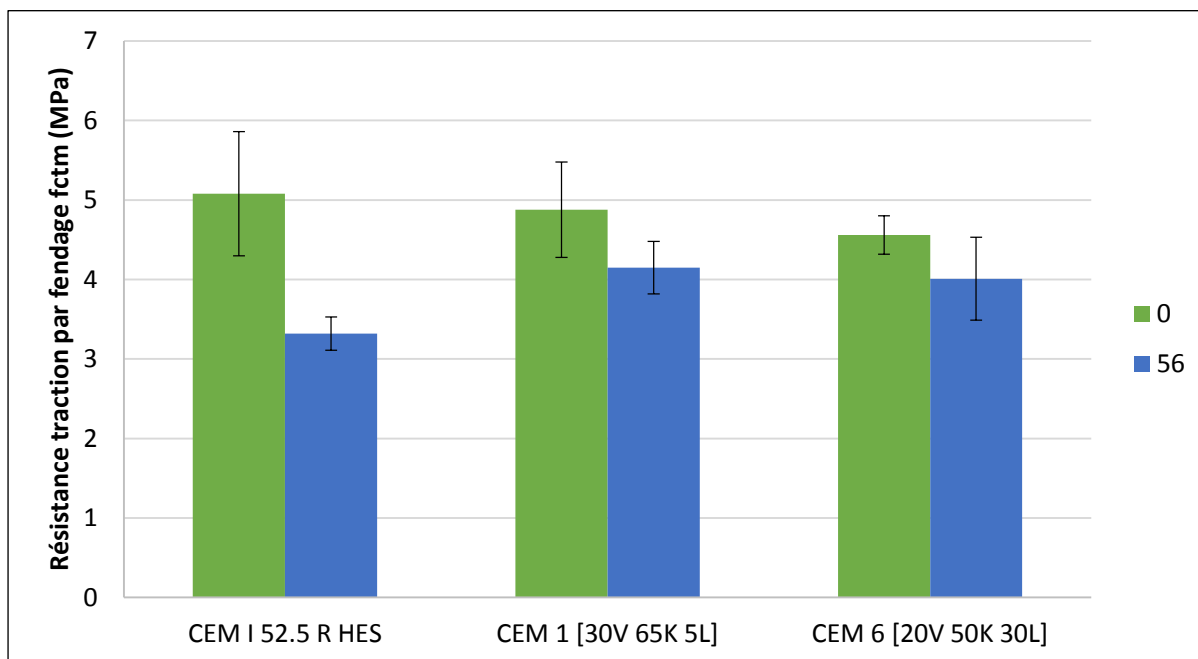


Figure 6-55 – Résistance à la traction par fendage avant et après les cycles de gel-dégel pour les bétons de type 3 (E/C de 0,50 et C de 300 kg/m³)

Dans la biennale précédente **CemCalc I**, l'essai de gel interne n'avait pas été réalisé vu que les bétons de type EE3 (gel sans sels) ont été rajoutés dans cette présente recherche.

La recherche **CEM X** n'a pas réalisé d'essai de gel interne pour les compositions à base de cendres volantes. Toutefois, il a également été observé que certaines compositions sont plus résistantes au gel interne que les compositions de référence, comme par exemple le CEM X CC [34S 60K 6L] ou le R2 [40S 42K 18L].

Dans la recherche **Gel-dégel** [49], menée par le CSTC, le CRIC et le CRR, des essais de gel interne ont été réalisés sur des compositions contenant différents types de ciment. Ces bétons sont caractérisés par un E/C de 0,55 et un dosage en ciment de 300 kg/m³, sans air entraîné. Le béton B3.7 à base de cendres volantes (88 kg/m³ de cendres volantes et 265 kg/m³ de CEM I 52,5 N) présente une perte de 1,4% de vitesse de son, ce qui équivaut à une perte de 3% sur le RDM. Le béton B3.1 à base de CEM I 52,5 N présente quant à lui une perte de 2,7% de vitesse, ce qui correspond à une perte de 5% sur le RDM. Ces résultats montrent donc que le béton contenant des cendres volantes sous forme d'addition résiste mieux au gel interne que le béton de référence.

Néanmoins, des essais de flexion ont également été réalisés (au lieu de la traction par fendage). Le béton B3.7 présente une perte de résistance de 9,5% contre 6% pour le béton B3.1. Contrairement à cette présente recherche, les résultats de vitesse sonore ne sont pas corrélés aux résultats de flexion.

Des mesures de masse des échantillons permettent de déterminer une **absorption d'eau** due aux cycles de gel-dégel, comme calculée dans le Tableau 6-42, selon la formule ci-dessous. Le béton à base du ciment de référence CEM I 52,5 R HES a l'absorption d'eau la plus faible avec 0,8%.

$$\Delta m = \frac{m_{56} - m_0}{m_0} \cdot 100 [\%]$$

Béton	Ciment	Masse (g) avant et après		Abs eau
		0	56	Δm
TYPE 3 (E/C = 0,50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	9964.7 ± 96.4	10045.7 ± 102.2	0.8%
	CEM 1 [30V 65K 5L]	9659.3 ± 166.7	9756.3 ± 164.8	1.0%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	9666.3 ± 235.1	9782 ± 222.4	1.2%

Tableau 6-42 – Masses avant et après les cycles de gel-dégel et calcul de l'absorption d'eau des bétons de type 3 (E/C de 0,50)

Le béton à base de CEM I 52,5 R HES présente la plus grande perte de résistance mais son absorption d'eau est la plus faible. Ce constat paraît à première vue étonnant. Ce béton de référence à base de CEM I 52,5 R HES a un très bon comportement au gel avec sels comme présenté précédemment mais il présente une résistance au gel interne plus faible que les ciments ternaires CEM 1 et CEM 6. L'explication suivante est une hypothèse : il semblerait que l'absorption d'eau soit le paramètre le plus important pour l'essai de gel avec sels vu que le béton est en permanence en contact avec la solution de NaCl. Dès lors, le béton à base de CEM I 52,5 R HES, qui a une absorption d'eau plus faible, a une bonne résistance. Concernant l'essai de gel interne, il semblerait que la vitesse de diffusion de l'eau à l'intérieur des pores soit un paramètre important. Cette vitesse est plus grande lorsque la porosité est plus grande, ce qui permet de diminuer les pressions internes dues à l'action du gel-dégel.

L'essai de gel interne décrit dans la norme **NBN B 15-100** [19] n'est pas le même que celui décrit dans la norme en cours de révision [37], lequel a été suivi ici. Toutefois, il est toujours possible d'appliquer également le critère de 20% suivant :

$$\Delta f_{ct} \leq 1.20 * \Delta f_{ct,référence}$$

Dans ce cas, les bétons à base des nouveaux ciments ternaires testés satisfont à ce critère vu que la perte de résistance à la traction par fendage du béton de référence est la plus élevée (35% contre 15% et 12% pour le CEM 1 et le CEM 6).

Le critère d'évaluation de la version en révision de la **NBN B15-100** [37] est appliqué d'abord sur la résistance à la traction par fendage après 56 cycles de gel-dégel. Si la perte de résistance du béton est inférieure ou égale à 5%, la résistance au gel interne est démontrée. Dans le cas présent, les pertes de résistances sont de l'ordre de 10% pour les bétons à base des nouveaux ciments ternaires CEM 1 et CEM 6. Il faut alors procéder à l'évaluation de la perte de résistance par rapport au béton de référence, selon la méthode reprise dans la

nouvelle version de la NBN B 15-100 [37] qui est basée sur la méthode issue de la CUR 48 [39]. Le Tableau 6-43 indique que les bétons à base des nouveaux ciments ternaires CEM 1 et CEM 6 satisfont au critère.

Béton	Ciment	Gel-dégel interne (Δf_{sp56} [MPa])						dj	30%
		Réf		A évaluer		Calcul			
		mr	sr	mt	st	s	n	Tj	Limite
TYPE 3 ($f_c = 0.50$ et $C = 320 \text{ kg/m}^3$)	CEM I 52,5 R HES	1.76	0.42				3		1.53
	CEM 1 [30V 65K 5L]			0.73	0.47	0.63		2.84	
	CEM 6 [20V 50K 30L]			0.55	0.46	0.62		3.37	

Tableau 6-43 – Evaluation du gel interne via la méthode de la norme NBN B 15-100 en cours de révision

6.3.5 Résistance à la diffusion des chlorures

Les chlorures en tant que tels sont inoffensifs pour le béton. Cependant, si leur concentration est relativement élevée dans l'eau contenue dans la structure poreuse entourant les armatures, ils peuvent donner lieu à des foyers locaux de corrosion appelés piqûres de corrosion (Figure 6-56) et ce, même dans le béton non carbonaté, où une couche de passivation protège l'armature. Cette corrosion peut être très dangereuse d'un point de vue structurel. Contrairement à la corrosion par carbonatation qui se manifeste par des éclats de béton ou des fissures, il n'est pas aisé de détecter le problème. Les chlorures peuvent être mélangés au béton (granulats), y être introduits par diffusion (surface saturée d'eau) ou par absorption capillaire suivie de diffusion (surface sèche).

Le phénomène de corrosion se produit surtout lorsque l'humidité relative tourne autour de 70% à 80%. En effet, si le béton est sec ou complètement saturé, la diffusion de l' O_2 est difficile [45].

Il est à noter que ce n'est pas la teneur totale en chlorures qui est pertinente pour la corrosion. En effet, une partie des ions Cl^- sont liés chimiquement avec les produits d'hydratation du ciment (en particulier le C_3A et le C_4AF) et forment des sels de Friedel. Les ions chlorures sont également liés physiquement par adsorption à la surface des pores de gel (des CSH). Enfin, il reste un tiers des chlorures qui sont libres et qui présentent dès lors un risque de réaction agressive avec les armatures [45].



Figure 6-56 – Dégradation d'une armature : piqûres de corrosion dues aux chlorures

L'essai de résistance à la diffusion des chlorures a pour but d'évaluer, par un essai de laboratoire accéléré en régime non stationnaire, la résistance à la diffusion des chlorures des bétons constitués des nouveaux ciments ternaires en la comparant à celle des bétons constitués des ciments industriels de référence.

En régime non stationnaire, le coefficient de diffusion du béton D_{nss} peut être calculé à partir de profils de concentration en chlorures dans des échantillons ayant été en contact avec des solutions de concentration connue en laboratoire. Le prélèvement d'échantillons à différentes profondeurs et l'analyse de la teneur en chlorures permettent d'établir un profil. Le coefficient de diffusion peut alors être déterminé à l'aide de la seconde loi de Fick :

$$\frac{dC}{dt} = D_{nss} \frac{d^2C}{dx^2}$$

En utilisant la condition initiale, $C_x = C_s$ pour $x = 0$ et $t > 0$, on obtient l'équation suivante, qui permet de calculer le coefficient de diffusion D_{nss} :

$$C(x, t) = C_i + (C_s - C_i) * \left(1 - \operatorname{erf}\left(\frac{x}{\sqrt{4 * D_{nss} * t}}\right) \right)$$

Où :

- $C(x,t)$ = teneur en chlorures mesurée à une profondeur moyenne x et pour un temps d'exposition t (en % en masse de béton)
- C_s = teneur en chlorures calculée au niveau de la surface exposée (en % en masse de béton)
- C_i = teneur initiale en chlorures (en % en masse de béton)
- x = profondeur sous la surface exposée jusqu'au centre de la couche de grignotage (en m)
- D_{nss} = coefficient de diffusion des chlorures en régime non stationnaire (en m^2/s)
- t (s) = temps d'exposition (en s)
- erf (fonction d'erreur) =

$$\operatorname{erf}(z) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^z \exp(-u^2) du$$

Ainsi, pour chaque composition de béton de type 1 (E/C de 0,45), le **profil de pénétration** des chlorures, la **concentration de surface C_s** en chlorures ainsi que le **coefficient de diffusion D_{nss}** en régime non stationnaire sont déterminés.

6.3.5.1 Principe et conditions de l'essai

La résistance à la pénétration des chlorures a été évaluée par un essai de diffusion à l'état non stationnaire, selon les recommandations de la spécification technique européenne

CEN/TS 12390-11 [38], comme suggéré dans la version en cours de révision de la NBN B 15-100 [37].

Après la cure sous eau, deux prismes de dimension 15 x 15 x 30 cm³ sont carottés et sciés pour obtenir 4 carottes de 100 mm de diamètre et 70 mm de haut. La quatrième carotte est conservée dans une chambre climatique à 20 ± 2°C et 60 ± 5% HR comme réserve pour la détermination de la teneur initiale. A noter que la concentration initiale a été déterminée après un temps d'environ 3 mois en chambre climatique¹⁷.

Les opérations suivantes sont alors réalisées sur chaque carotte :

- Saturation préalable d'eau de l'échantillon sous vide : après avoir mis l'échantillon dans un récipient sous vide et réduit la pression à une valeur comprise entre 10 et 50 mbar pendant 3 heures, le récipient est rempli d'eau distillée ou déminéralisée et la pression est maintenue pendant une heure supplémentaire ;
- Séchage à l'air jusqu'au blanchiment de sa surface pendant 2 à 4h ;
- Scellement des faces à l'aide d'une résine (epoxy), sauf la face d'essai (face sciée et rectifiée) ;
- Immersion dans une solution saturée en Ca(OH)₂ pendant minimum 18h ;
- Immersion dans une solution de chlorures à 3% en masse de NaCl à 20 ± 2°C pendant 91 jours, comme illustré à la Figure 6-57 suivante ;
- A la fin de la période d'exposition, prélèvement de poudre par érosion de 10 couches¹⁸ parallèles à la surface exposée, millimètre par millimètre.

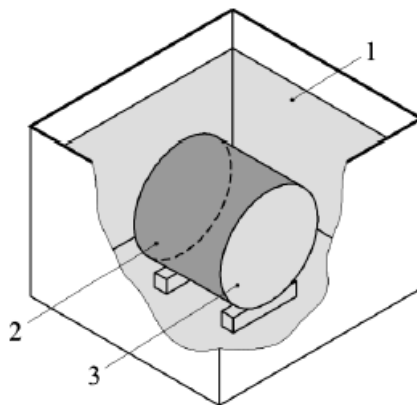


Figure 6-57 – Immersion des carottes dans la solution de chlorures selon la CEN/TS 12390-11
1 : solution de NaCl , 2 : surfaces étanches, 3 : surface exposée

La teneur en ions chlorures de chaque prélèvement de poudre selon la norme NBN EN 14629¹⁹ [52], la concentration de surface (C_s) ainsi que le coefficient de diffusion (D_{nss}) sont ensuite calculés.

¹⁷ Dans la norme CEN/TS 12390-11, l'éprouvette pour la concentration initiale en chlorures doit être utilisée immédiatement ou conservée sous sac plastique hermétique.

¹⁸ La norme CEN/TS 12390-11 [39] indique qu'il est nécessaire de grignoter des couches jusqu'à atteindre une couche de teneur $C_i + 0,015\%$. Dans cette présente recherche, nous nous sommes limités à 10 couches.

6.3.5.2 Résultats obtenus

Les concentrations moyennes en chlorures (en % en masse de béton) en fonction de la profondeur de prélèvement (en mm) sont données au Tableau 6-44 suivant pour l'ensemble des compositions de béton de type 1 (E/C de 0,45) et au Tableau 6-45 pour les bétons ayant suivi une mauvaise cure (moyennes sur 3 éprouvettes).

Béton	Ciment	Concentration en Cl ⁻ moyenne [%] vs Profondeur de prélèvement [mm]								
		1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.35	0.32	0.29	0.26	0.24	0.22	0.19	0.17	0.15
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.29	0.25	0.23	0.21	0.19	0.16	0.14	0.12	0.1
	CEM II/B-V 32.5 R	0.33	0.29	0.26	0.22	0.19	0.16	0.13	0.11	0.09
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.32	0.28	0.24	0.2	0.17	0.14	0.11	0.09	0.06
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.24	0.24	0.22	0.21	0.18	0.16	0.14	0.12	0.1
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.29	0.27	0.24	0.21	0.18	0.15	0.12	0.1	0.09
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.3	0.32	0.3	0.29	0.27	0.25	0.23	0.21	0.19
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.25	0.25	0.24	0.23	0.21	0.19	0.17	0.16	0.14

Tableau 6-44 – Concentrations en chlorures moyennes en fonction de la profondeur de prélèvement pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45)

Béton	Ciment	Concentration en Cl ⁻ moyenne [%] vs Profondeur de prélèvement [mm]								
		1.5	2.5	3.5	4.5	5.5	6.5	7.5	8.5	9.5
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.4	0.35	0.33	0.29	0.27	0.25	0.22	0.19	0.16
	CEM II/B-V 32.5 R	0.41	0.4	0.36	0.32	0.29	0.26	0.23	0.2	0.17
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.27	0.3	0.32	0.31	0.28	0.26	0.25	0.22	0.21
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.26	0.3	0.31	0.29	0.27	0.25	0.24	0.22	0.2

Tableau 6-45 – Concentrations en chlorures moyennes en fonction de la profondeur de prélèvement pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) ayant subi une mauvaise cure

¹⁹ Le protocole de mesure de la teneur en ions chlorures diffère de la norme NBN EN 14629 en ce qui concerne :

- La granulométrie de la poudre à analyser : 315 µm au lieu de 1,18 mm ;
- La concentration de l'acide nitrique est de 4,8 mol/L au lieu de 5 mol/L ;
- La concentration de la solution titrante de nitrate d'argent : 0,01 mol/l au lieu de 0,1 mol/l.

Toutes ces modifications permettent une meilleure précision sur les résultats et une préparation plus aisée.

Les profils de pénétration des chlorures sont également présentés aux Figure 6-58 et Figure 6-59.

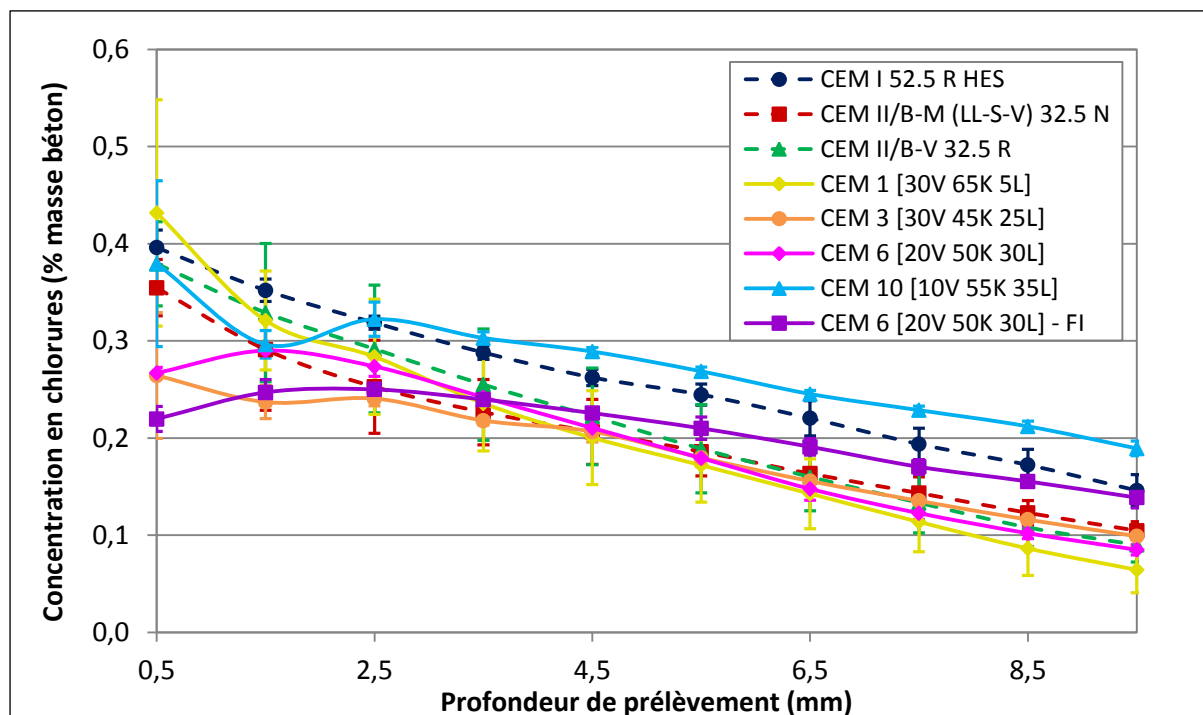


Figure 6-58 – Profils de pénétration des chlorures pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) ayant subi une bonne cure

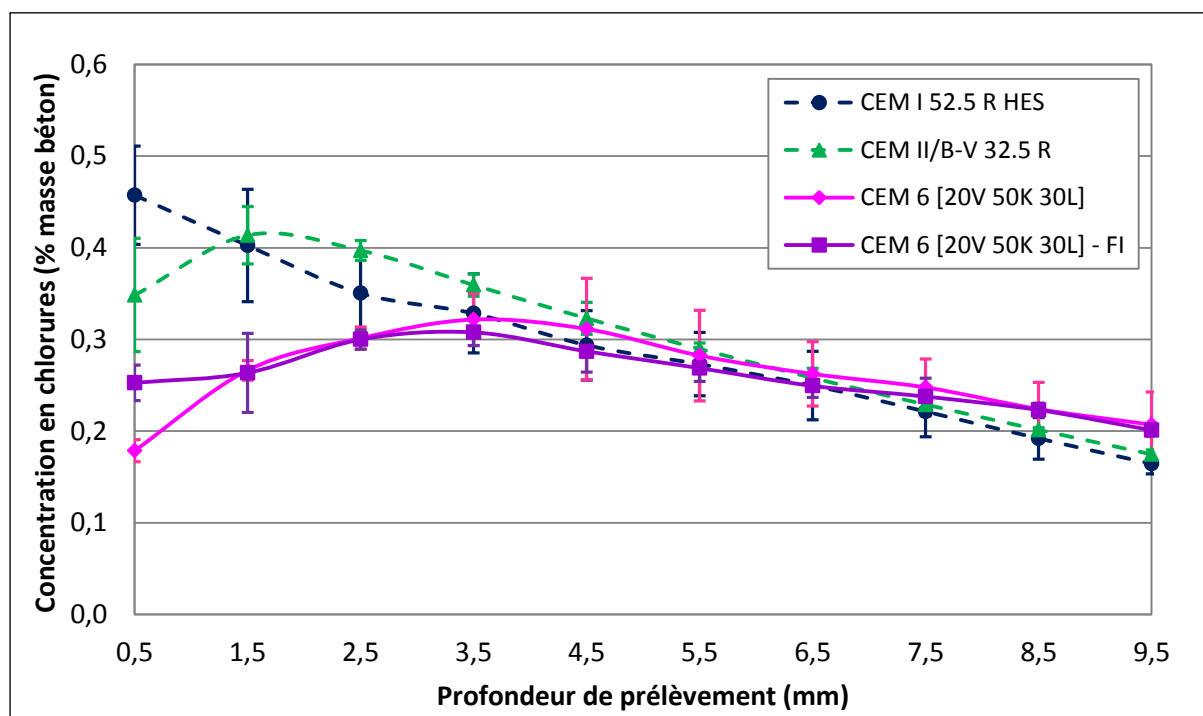


Figure 6-59 – Profils de pénétration des chlorures pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³) ayant subi une mauvaise cure

Les concentrations initiales C_i , ainsi que les valeurs moyennes de C_s et D_{nss} calculées par ajustements aux moindres carrés (moyennes de 3 éprouvettes par composition), sont données aux Tableau 6-46 et Tableau 6-47. Les valeurs de C_s et D_{nss} sont calculées pour les 3 échantillons de chaque composition. Les résultats présentés sont les moyennes de ces 3 valeurs.

La deuxième couche à partir de la surface est le premier point utilisé dans l'analyse de régression. Pour certains bétons, ceux à base des CEM 6 et CEM 6 FI ayant subi une mauvaise cure, la régression a été calculée à partir de la troisième couche. Ces bétons présentent une concentration en chlorures qui augmente depuis la surface jusqu'au troisième point.

Le fait que la concentration en chlorures est plus faible à la surface que les premiers millimètres dans le béton s'explique par le fait que la surface est en effet plus facilement délavée et ce mouvement de l'eau entraîne un transport des ions à l'intérieur du béton [45, 51].

Béton	Ciment	C_i [%]	C_s [%]		D_{nss} [10^{-12} m ² /s]	
			Moyenne	σ	Moyenne	σ
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.028	0.39	0.02	6.50	1.60
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.015	0.33	0.07	5.40	1.00
	CEM II/B-V 32.5 R	0.015	0.39	0.09	3.53	0.11
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.027	0.40	0.06	2.46	0.50
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.017	0.29	0.01	6.13	0.42
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.020	0.36	0.01	3.58	0.37
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.020	0.35	0.01	15.93	1.54
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.017	0.29	0.01	11.60	1.11

Tableau 6-46 – Valeurs de C_i , C_s et D_{nss} pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45)

Béton	Ciment	C_i [%]	C_s [%]		D_{nss} [10^{-12} m ² /s]	
			Moyenne	σ	Moyenne	σ
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.028	0.44	0.06	6.43	0.36
	CEM II/B-V 32.5 R	0.015	0.48	0.01	6.62	0.35
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.020	0.39	0.06	13.87	2.06
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	0.017	0.34	0.01	21.16	1.65

Tableau 6-47 – Valeurs de C_i , C_s et D_{nss} pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) ayant subi une mauvaise cure

Les coefficients de diffusion D_{nss} sont également illustrés aux Figure 6-60 et Figure 6-61.

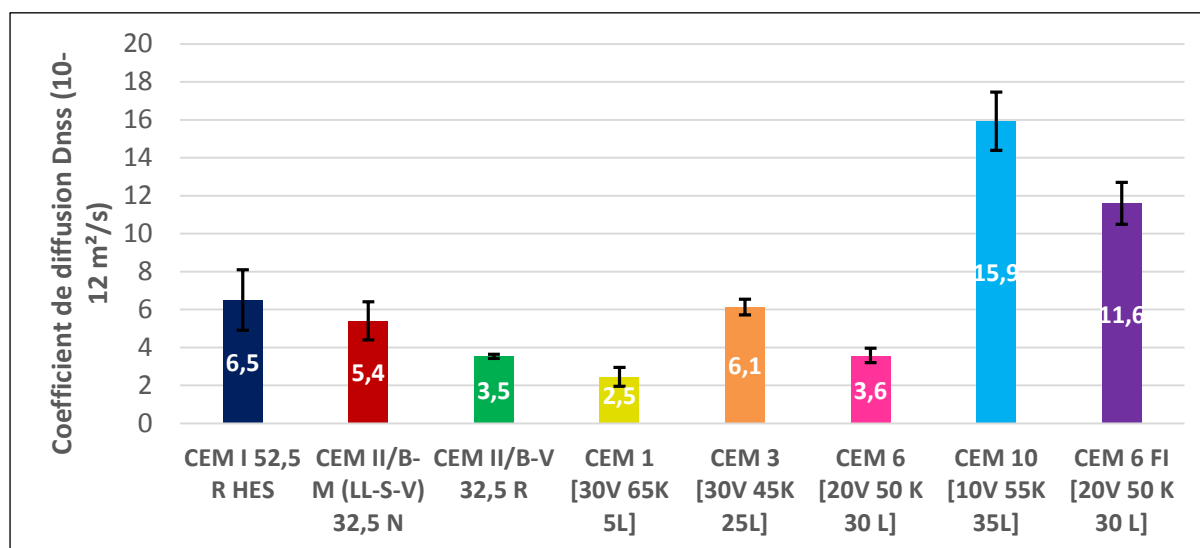


Figure 6-60 – Coefficients de diffusion D_{nss} des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m^3) ayant subi une bonne cure

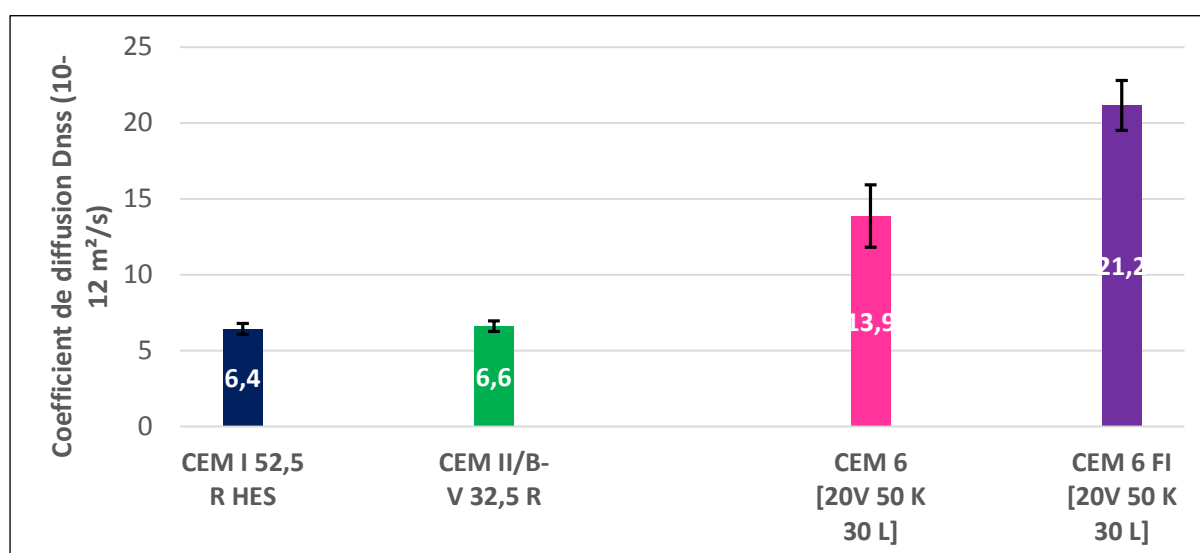


Figure 6-61 – Coefficients de diffusion D_{nss} des bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 300 kg/m^3) ayant subi une mauvaise cure

Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires CEM 1, CEM 3 et CEM 6 ont des concentrations en chlorures **inférieures ou égales** à celles dans les bétons à base des ciments industriels de référence CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N et CEM II/B-V 32,5 R. Celui à base du CEM 6 FI a un profil inférieur à celui à base de CEM I 52,5 R HES. Seul le béton à base du CEM 10 est moins bon que les références.

La diffusion des chlorures semblerait augmenter lorsque la **teneur en cendres volantes**. Cela confirme ce qui est repris dans la **littérature**. Les cendres volantes permettent en effet de réduire la perméabilité du béton grâce à un affinement des pores. Elles contribuent ainsi à une meilleure résistance à la pénétration des chlorures [46, 45]. En outre, les bétons à base de cendres volantes auraient une plus grande capacité de liaison des ions chlorures que les bétons à base de ciment clinker seul [53].

Le béton à base de CEM 6 ayant subi une bonne cure semble présenter un coefficient de diffusion faible, surtout par rapport au CEM 3 qui contient plus de cendres volantes et moins de filler calcaire. Cela s'expliquerait par le nombre de points considérés dans le calcul du coefficient de diffusion par régression linéaire. En effet, les profils de concentration de ces deux bétons sont assez similaires sauf pour les 3 premières couches. En enlevant les 3 premières couches, les coefficients de diffusion sont de $4,9 \cdot 10^{-12}$ m²/s et de $3,2 \cdot 10^{-12}$ m²/s respectivement pour les bétons CEM 3 et CEM 6. L'écart entre les deux valeurs diminue.

La présence de **filler impur** semble avoir un effet néfaste sur la résistance à la pénétration des chlorures, comme le montre les différences de coefficients de diffusion des bétons à base des CEM 6 et CEM 6 FI, avec les deux types de cure. Une hypothèse pourrait être que le filler impur soit responsable d'une modification de la microstructure, en particulier de la taille et de la tortuosité des capillaires. Mais cela semble étonnant également car le filler impur ne semble pas influencer les propriétés de durabilité précédentes (carbonatation et gel avec sels).

L'influence de la **cure** est également visible. Le béton à base du CEM 6 présente un coefficient de diffusion qui augmente de plus de 200% par rapport au béton correspondant ayant subi une bonne cure.

Le Tableau 6-48 ci-dessous compare les coefficients de diffusion des chlorures obtenus dans cette recherche avec ceux obtenus dans la première biennale **CemCalc I**. La comparaison des ciments ternaires K-V-L et K-S-L est également illustrée à la Figure 6-62. Les bétons à base de ciments K-S-L ont tendance à avoir une résistance supérieure à ceux à base de ciments K-V-L (les différences positives 51% et 56% sont bien plus élevées que les différences négatives -12%). Dans CemCalc I, le coefficient de diffusion semblait surtout être inversement proportionnel à la teneur en laitier. Le laitier de haut-fourneau semblerait donc meilleur que les cendres volantes en ce qui concerne la résistance à la pénétration des chlorures. Cela a été observé dans la **littérature**. En effet, le laitier de haut-fourneau posséderait une capacité de liaison des ions Cl⁻ encore plus grande que celle des cendres volantes [53, 54, 55].

Béton	CemCalc II		CemCalc I		Différence II - I	
	$D_{nss} [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$		$D_{nss} [10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$		$[10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}]$	%
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52,5 R HES	6.50	CEM I 52,5 R HES	6.75	0.12	-4%
			CEM II/B-M (L-S) 32,5 R	5.60		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	5.40				
	CEM II/B-V 32,5 R	3.53				
			CEM III/A 42,4 N LA	2.41		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	2.46	CEM 1 [30S 65K 5L]	2.80	-0.18	-12%
	CEM 3 [30V 45K 25L]	6.13	CEM 3 [30S 45K 25L]	4.07	1.89	51%
	CEM 6 [20V 50K 30L]	3.58	CEM 6 [20S 50K 30L]	4.09	-0.51	-12%
	CEM 10 [10V 55K 35L]	15.93	CEM 10 [10S 55K 35L]	10.2	5.73	56%
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	11.60				
			CEM 12 [30S 35K 35L]	4.02		

Tableau 6-48 – Comparaison des coefficients de diffusion des chlorures pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) des recherches CemCalc II et CemCalc I

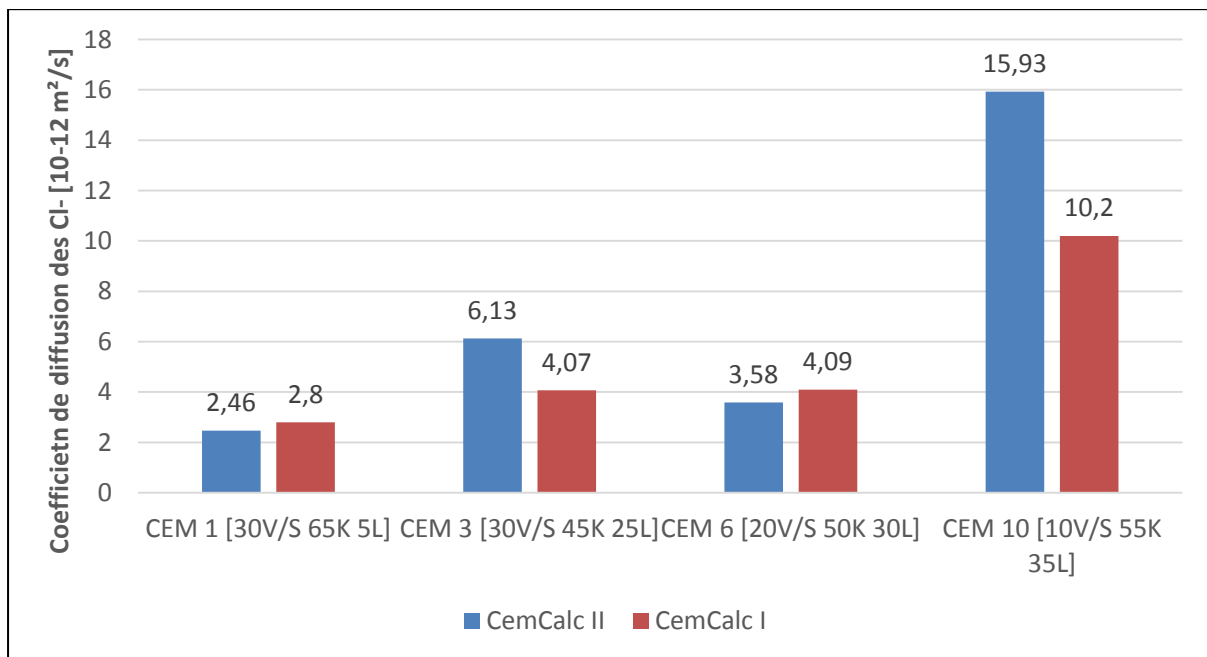


Figure 6-62 – Comparaison des coefficients de diffusion des chlorures pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45) à base des nouveaux ciments ternaires K-V-L et K-S-L

Dans **CEM X**, la diffusion des chlorures a été testée par la méthode NT BUILD 443 [56] sur les bétons de type 2 (C = 340 kg/m³). Les coefficients obtenus par les compositions A3 [30V 64K 6L] et A4 [20V 50K 30L] sont respectivement $2,4 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ et $9,3 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. La valeur du A3 est proche du béton à base de CEM 1 qui vaut $2,62 \cdot 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$. Dans CemCalc I, une comparaison des méthodes NT BUILD 443 et CEN/TS 12390-11 avait été faite et il en est ressorti que la méthode CEN/TS était plus sévère, ce qui est observé ici également.

Le critère d'évaluation de la norme **NBN B 15-100** relatif à la résistance à la diffusion des chlorures²⁰ stipule que le coefficient de diffusion moyen du béton à tester doit être :

$$D_{nss,\text{béton à tester}} \leq 1.40 * D_{nss,\text{béton de référence}}$$

En prenant le béton constitué du CEM I 52,5 R HES comme référence ($D_{nss} = 6,87 \cdot 10^{-12}$ m²/s et $6,76 \cdot 10^{-12}$ m²/s pour la mauvaise cure), les bétons à base des CEM 1, CEM 3 et CEM 6 satisfont au critère pour la bonne cure et aucun des bétons testés (CEM 6 et CEM 6 FI) ne satisfont au critère pour la mauvaise cure.

²⁰ Il est à mentionner que la norme stipule une cure idéale de 55 jours sous eau alors que, dans la présente recherche, les éprouvettes ont subi une cure de 91 jours sous eau.

6.3.6 Résistance aux attaques sulfatiques

L'attaque sulfatique peut se produire en cas d'apport suffisant en sulfates. Ces sulfates, provenant souvent de pollutions industrielles ou urbaines, peuvent réagir avec certains composés du béton, en fonction de la température et l'humidité à laquelle est exposé celui-ci.

A température ambiante (par exemple, 20°C), les sulfates peuvent former, avec les aluminates présents dans le ciment, de l'**étringite secondaire**, également appelée sel de Candlot ou trisulfoaluminate de calcium ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$). Lorsqu'ils sont produits en quantité importante, ces sels à caractère expansif conduisent à un gonflement du béton et à sa fissuration.

A cette température, la méthode d'essai suivie est la méthode hollandaise CUR-Aanbeveling 48 [39]. Celle-ci prévoit la mesure d'un allongement relatif en fonction du temps d'immersion dans une solution de sulfates.

A basse température (5°C) et en cas d'humidité importante, les bétons constitués de ciment à base de filler calcaire peuvent développer un autre type de pathologie en présence de sulfates : la **thaumasite** ($\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$) [57]. La formation de thaumasite, au détriment de la phase liante C-S-H, entraîne une perte de cohésion du béton. A basse température, les mesures effectuées sont des mesures non-destructives de variation de vitesse sonore et de module d'élasticité dynamique en fonction du temps d'immersion dans une solution de sulfates.

Les mesures effectuées dans cette section ont pour but d'évaluer, grâce à différents essais de laboratoire accélérés, la résistance aux attaques sulfatiques, à 20°C et à 5°C, des mortiers constitués des nouveaux ciments ternaires en la comparant à celle des mortiers constitués des ciments industriels de référence.

6.3.6.1 Attaque sulfatique à 20°C

a) Principe et conditions de l'essai

A 20°C, les essais de résistance aux sulfates sont réalisés sur des prismes de mortier de dimensions 2 x 2 x 16 cm³ (voir Figure 6-63), selon les recommandations de la méthode hollandaise CUR-Aanbeveling 48 [39]. L'essai consiste à mesurer, en fonction du temps, les variations de longueur d'échantillons prismatiques immergés dans une solution de Na₂SO₄ à haute teneur en sulfates (concentration de 16 ± 0,5 g SO₄ par litre).

Les prismes sont démoulés à 24 heures puis conservés sous eau à 20 ± 2°C jusqu'à l'âge de 28 jours. A la fin de la période de cure, les opérations suivantes sont réalisées :

- Une mesure initiale de longueur des prismes est effectuée ;
- Trois prismes (échantillons témoins) sont conservés dans de l'eau potable et trois prismes (échantillons de test) sont placés dans la solution sulfatique pendant toute la durée de l'essai;

- Des mesures de déformation linéaire sont effectuées à l'aide d'un rétractomètre à différentes échéances pendant un an (voir Figure 6-64)²¹.



Figure 6-63 – Moules 2 x 2 x 16 cm³ pour les essais de gonflement



Figure 6-64 – Dispositif pour les mesures de gonflement

b) Résultats obtenus

Les résultats de mesure de gonflement des mortiers à base des ciments de référence et des ciments ternaires K-V-L immergés dans l'eau sulfatée sont repris au Tableau 6-49 suivant. L'évolution du gonflement est illustrée à la Figure 6-65.

Il a été décidé de rajouter pour cet essai un ciment de référence à haute résistance aux sulfates : CEM I 52,5 R HSR LA, étant donné que pour appliquer le premier critère de la norme NBN B 15-100, un ciment HSR est nécessaire.

Tous les résultats ne sont pas encore disponibles lors de la rédaction de ce rapport. Les résultats obtenus jusqu'à présent permettent de déjà observer des tendances.

²¹ Contrairement aux recommandations du document normatif CUR 48, les mesures de déformation sont réalisées à l'aide d'un rétractomètre et de plots noyés aux deux extrémités des prismes (et non à l'aide de jauges Demec collées sur les faces des prismes).

Jours	CEM I 52,5 R HES	Jours	CEM I 52,5 R HSR LA	Jours	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	Jours	CEM II/B-V 32,5 R	Jours	CEM 1 [30V 65K 5L]	Jours	CEM 3 [30V 45K 25L]	Jours	CEM 6 [20V 50K 30L]	Jours	CEM 10 [10V 55K 35L]	Jours	CEM 6 FI [20V 50K 30L]
1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000	1	0.000
28	0.000	28	0.007	28	0.020	28	-0.004	28	-0.066	28	0.001	28	-0.008	28	-0.001	28	-0.008
56	0.006	56	0.011	56	0.028	56	-0.004	56	-0.063	56	0.020	56	0.011	56	0.022	56	-0.001
84	0.008	84	0.014	84	0.037	84	0.009	84	-0.056	84	0.028	91	0.023	91	0.110	84	0.000
112	0.038	112	0.032	119	0.042	119	0.011	112	-0.045	119	0.026	119	0.031	119	0.139	118	0.003
147	0.079	147	0.050	147	0.079	147	0.016	147	-0.023	147	0.038	150	0.070	149	0.325	147	0.013
175	0.271	175	0.114	182	0.117	182	0.017	175	0.028	182	0.040	184	0.061	183	0.428	182	0.015
203	0.338	203	0.157	207	0.150	206	0.023	203	-0.009	205	0.040	200	0.070	199	0.491	204	0.012
238	0.691	238	0.217	238	0.220	237	0.030	238	-0.003	236	0.040	238	0.086	237	0.635	235	0.026
		266	0.460	273	0.342	273	0.032	266	0.038	274	0.040	269	0.089	268	0.751	273	0.031
		301	0.565					301	0.024								

Tableau 6-49 – Mesures de gonflement (eau sulfatée) des mortiers à 20°C (en cours)

Valeurs en rouge : gonflement qui dépasse déjà le critère de 0,05% de la NBN B 15-100

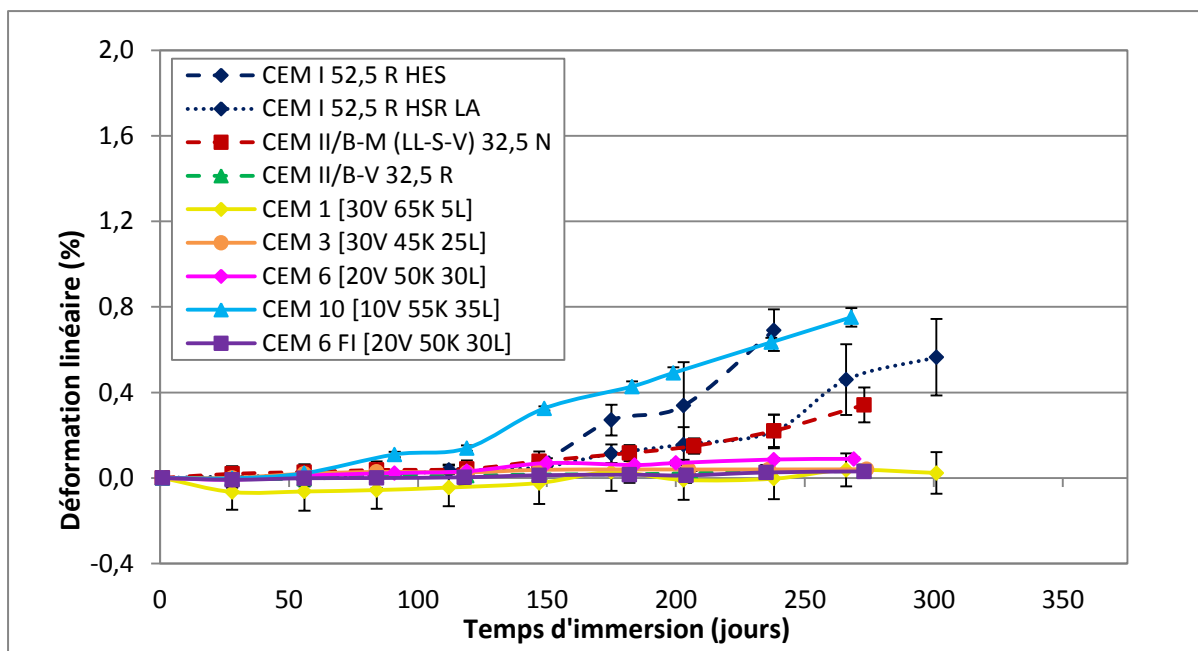


Figure 6-65 – Mesures de gonflement (eau sulfatée) des mortiers (en cours)

Les mortiers à base des nouveaux ciments ternaires présentent des déformations **inférieures** aux ciments de référence CEM I 52,5 R HES, CEM I 52,5 R HSR LA et CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N, excepté le CEM 10 qui présente un gonflement plus important.

La résistance à l'attaque sulfatique semblerait augmenter lorsque la **teneur en cendres volantes** augmente. En effet, le CEM II/B-V 32,5 R comporte 22% de cendres volantes et résiste aussi bien que les autres ciments ternaires. Cela est confirmé par la **littérature**, en particulier pour les cendres volantes de « classe F », contenant peu de calcium, ce qui est notre cas [46]. Les ciments composés à base de cendres volantes ou de laitier présentent moins d'hydroxyde de calcium $\text{Ca}(\text{OH})_2$ dans la pâte de ciment, ce qui réduit dès lors le risque de réaction sulfatique [45, 58].

Il est à noter que la nature du cation de la solution sulfatique a une grande influence sur l'attaque sulfatique. En effet, une solution de MgSO_4 causerait une dégradation plus prononcée. En effet, les ions Mg^{++} réagissent avec les C-S-H pour former un produit de type M-S-H qui ne possède pas de propriétés liantes. De plus, la portlandite piège les ions Mg^{++} sous forme de brucite. Dans ce cas, la présence de portlandite est bénéfique. Les laitiers et cendres volantes, consommant une partie de la portlandite via leur réaction pouzzolanique, entraîneraient alors une moins bonne résistance aux sulfates.

Pour l'instant, la présence de **filler impur** ne semble pas avoir d'influence particulière si on compare les ciments CEM 6 et CEM 6 FI.

Dans **CemCalc I** (voir Figure 6-66), la présence de laitier améliorait la résistance en sulfates. Le filler calcaire ne présentait aucune influence. Les mortiers à base des ciments CEM 1 [30S 65K 5L], CEM 3 [30S 45K 25L] et CEM 12 [30S 35K 35L], contenant tous 30% de laitier, résistaient le mieux à l'attaque sulfatique (déformation $\leq 0,05\%$ après 12 mois d'exposition). Les mortiers à base de ciments K-S-L sembleraient résister encore mieux à l'attaque sulfatique que les ciments K-V-L, étant donné que le CEM 6 [20V 50K 30L] présente un gonflement de 0,09% à 238 jours alors que dans CemCalc I, le CEM 6 [20S 50K 30L] présentait un gonflement de 0,008% à 253 jours.

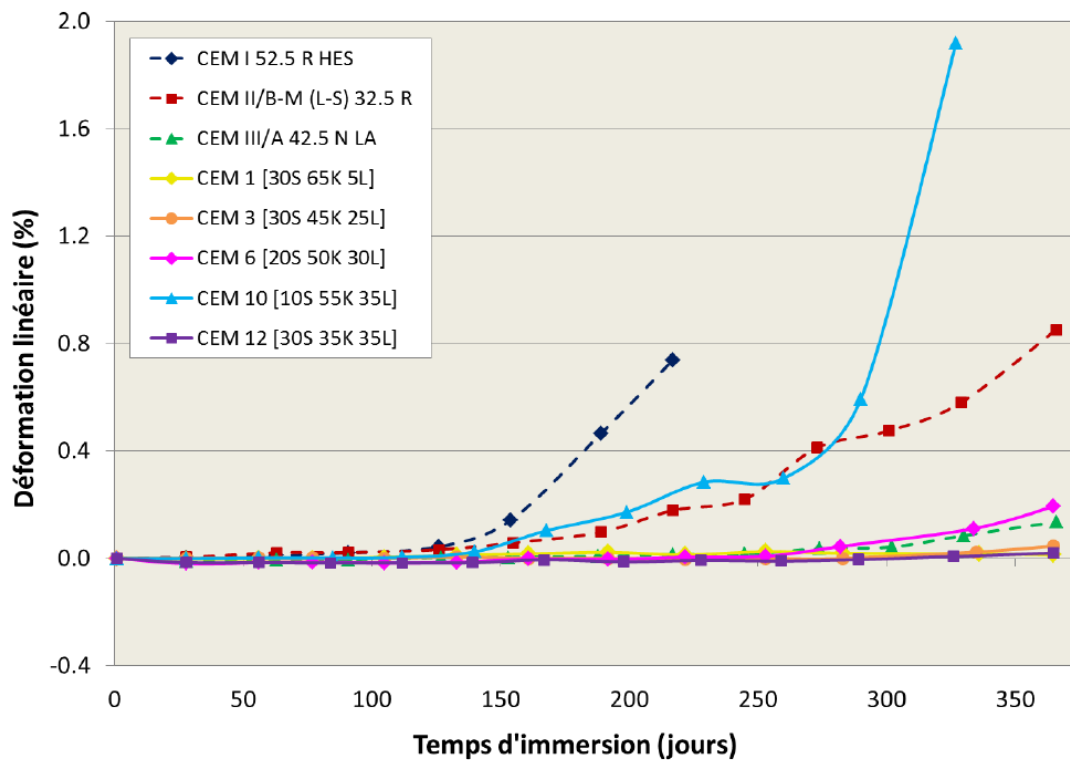


Figure 6-66 – Mesures de gonflement des mortiers de la recherche CemCalc I

La recherche **CEM X** a également réalisé des essais d'attaque sulfatique selon la CUR 48. Les mortiers à base des compositions A3 [30V 64K 6L] et A4 [20V 50K 30L] présentaient respectivement un gonflement de 0,003% et de 0,07% après 1 an d'exposition. Dans notre cas, le CEM 1 [30V 65K 5L] présente un gonflement de 0,038% à 266 jours d'exposition et le CEM 6 [20V 50K 30L] présente un gonflement de 0,061% à 184 jours d'exposition.

Le critère d'évaluation de la norme **NBN B 15-100** [19] relatif à la résistance aux sulfates stipule que le gonflement moyen du mortier à tester, mesuré après 12 mois d'exposition, doit être :

$$L_{\text{mortier à tester}} \leq 1.20 * L_{\text{mortier de référence}} \quad \text{ou} \quad L_{\text{mortier à tester}} \leq 0.05 \%$$

Le premier critère doit être appliqué lorsque le mortier de référence est composé d'un ciment à haute résistance aux sulfates. Dans notre cas, le mortier à base de CEM I 52,5 R HSR LA présente déjà un gonflement important de 0,5% à 266 jours. Il présente toutefois un

meilleur comportement par rapport au CEM I 52,5 R HES qui n'est pas résistant aux sulfates. En appliquant ce critère à 238 jours d'exposition, avant les 12 mois demandés, tous les ciments ternaires respectent le critère ($0,217\% \times 1,2 = 0,26\%$) sauf le mortier à base du CEM 10.

Dans la recherche sur les **attaques sulfatiques** menée par le CSTC et le CRIC [59], des mortiers ont également été testés selon la CUR 48. Le mortier à base de CEM I 52,5 R HES présente un gonflement d'environ 0,7% à 40 semaines (280 jours), ce qui est proche de notre valeur de 0,7% à 238 jours pour l'instant. Au bout d'un an, le gonflement s'élève à 2,2%. Par contre, le mortier à base de CEM I 52,5 R HSR LA présente un gonflement d'environ 0,09% à 28 semaines (196 jours) tandis que notre mortier présente un gonflement de presque 0,15% à 206 jours. Après un an d'immersion, le mortier à base de ce ciment HSR présente un gonflement de 0,2%. Notre mortier est déjà à près de 0,5% à 266 jours. Des études plus approfondies seront menées pour comprendre ce comportement anormal.

En outre, un mortier à base de CEM II/B-V 32,5 R a également été testé dans la recherche attaques sulfatiques. Il présente un gonflement de 0,02% après un an d'immersion. Notre mortier se trouve actuellement à 0,03% de gonflement à 237 jours.

Le deuxième critère peut déjà être appliqué. Au vu des résultats présentés au Tableau 6-49, les mortiers à base des ciments CEM II/B-V 32,5 R [22V 78K], CEM 1 [30V 65K 5L], CEM 3 [30V 45K 25L] et CEM 6 FI [30V 50K 30L] ne dépassent pas encore la valeur limite de 0,05%.

Concernant la norme NBN B15-100 en cours de révision [37], le critère s'applique à 182 jours (6 mois) d'exposition. Toutes les mesures n'ayant pas été faites à exactement 182 jours, les mesures les plus proches (175 jours pour les CEM I 52,5 R HES, CEM I 52,5 R HSR LA et CEM 1) ont alors été considérées pour le Tableau 6-55 de synthèse d'évaluation des critères (voir à la fin du rapport).

6.3.6.2 À basse température (5°C)

c) Conditions des essais

L'évaluation de la résistance aux attaques sulfatiques à 5°C est effectuée sur des prismes de mortier immergés dans une solution sulfatée contenant $16,0 \pm 0,5\text{g SO}_4^2$ /litre de solution (par addition de Na_2SO_4 à de l'eau distillée).

La procédure suivante est suivie pour les mesures du module d'élasticité et de vitesse sonore :

- Les 4 éprouvettes de $2*2*28\text{ cm}^3$ pour le module d'élasticité et les 3 éprouvettes de $2*2*16\text{ cm}^3$ pour la vitesse sonore en meilleur état sont conservées durant 28 jours (comptés à partir du jour de la fabrication) à 20°C dans une eau saturée en chaux.
- Les éprouvettes sont mises par deux pour le module d'élasticité et par trois pour la vitesse sonore dans des petits bacs plastiques appropriés avec de l'eau saturée en chaux. Chaque éprouvette de $2*2*28\text{ cm}^3$ (module E) est placée sur deux appuis en

respectant les dimensions reprises à la Figure 6-67. Dans le cas des éprouvettes 2*2*16 cm³ (vitesse sonore), chaque éprouvette est placée sur 2 appuis en appliquant les distances 4-8-4 cm au lieu des distances 7-14-7 cm appliquées pour les éprouvettes 2*2*28 cm³.

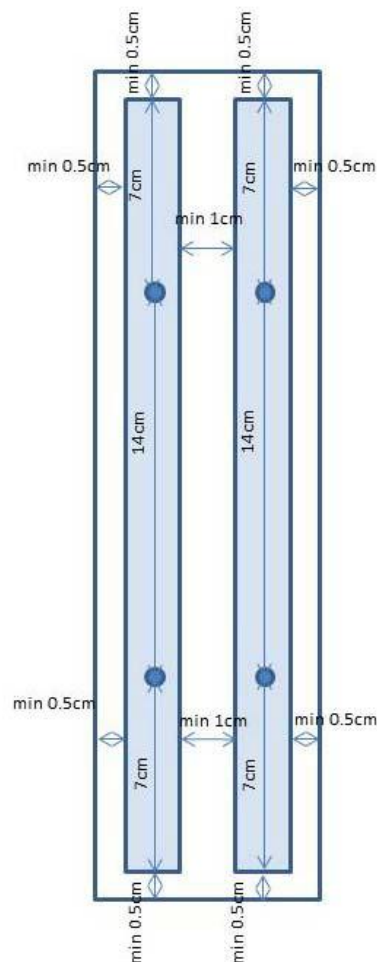


Figure 6-67– Disposition des éprouvettes dans les bacs

Les bacs sont couverts avec une plaque appropriée et placés dans une armoire thermostatée à 5°C pendant 1 jour.

- Après 1 jour, les éprouvettes sont épongées et les premières mesures sont effectuées (dimensions, masse et module d'élasticité (fréquence de résonance)).
- Les éprouvettes sont ensuite directement placées à 5°C dans les mêmes bacs où l'eau saturée en chaux est remplacée par 1,15±0,05 l d'eau sulfatée.
- La solution sulfatée est renouvelée tous les 28 jours.
- Les éprouvettes sont retournées d'un quart de tour 1x/semaine (sauf congés).
- Les mesures suivantes sont effectuées toutes les 2 semaines jusqu'à 52 semaines (c.-à-d. 1an) si les éprouvettes ne sont pas dégradées avant.

d) Echantillons

Les ciments utilisés pour cette étude sont les six ciments CEM v2 sélectionnés et les trois ciments industriels de référence :

- CEM II/B-V 32,5 R,
- CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N,
- CEM I 52,5 R HES.

e) Détermination du module d'élasticité dynamique

La Figure 6-68 présente l'évolution complète du module d'élasticité après un an de cure des six ciments de laboratoire et des trois ciments industriels de référence.

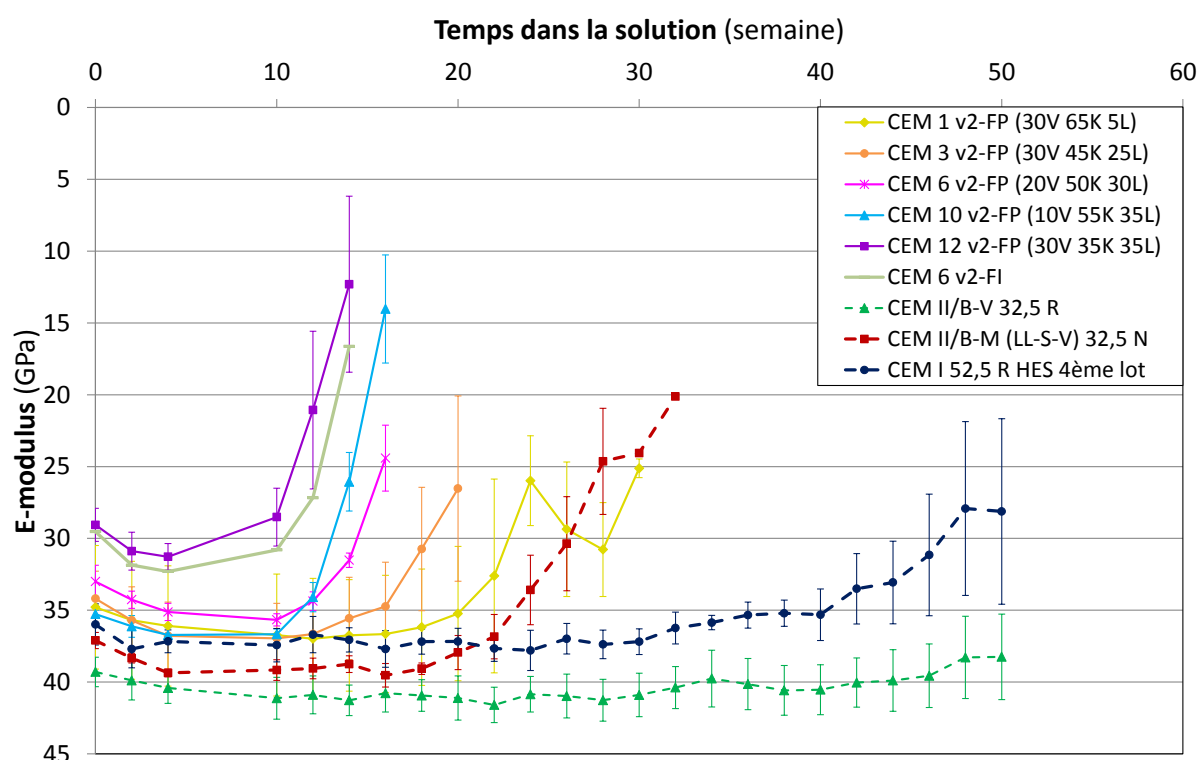


Figure 6-68 – Evolution du module d'élasticité dans les mortiers à base des ciments étudiés jusqu'à 50 semaines

Les trois ciments de référence (CEM II/B-V 32,5 R, CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N et CEM I 52,5 R) présentent des modules d'élasticité dynamique plus élevés aux différentes échéances que les ciments de laboratoire CEM 6 v2-FP, CEM 6 v2-FI et CEM 12 v2-FP. D'autre part, le CEM II/B-V 32,5 R présente un module d'élasticité plus grand que les deux autres ciments de référence.

Le module d'élasticité du CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N décroît fortement à partir de 20 semaines d'attaque. Cette moindre résistance aux attaques sulfatiques à 5°C, par rapport aux deux autres ciments de référence, est probablement due à la présence de filler calcaire dans ce ciment.

Les éprouvettes de plusieurs ciments fabriqués en laboratoire ont cassé assez rapidement. Les différentes échéances auxquelles les éprouvettes 2*2*28 cm³ ont cassées sont reprises en Annexe 4.

C'est une éprouvette du CEM 12 v2-FP qui a cassé en premier après 12 semaines d'attaque sulfatique. Donc, contrairement à CEMCALC I, le ciment riche en cendre (laitier pour CEMCALC I) et filler calcaire est le moins résistant aux attaques sulfatiques à 5°C.

Ce sont ensuite les éprouvettes du CEM 6 v2-FI qui ont toutes cassées après la quatorzième semaine. Leur module de Young dynamique commence déjà à diminuer après 4 semaines et est directement moindre que celui du CEM 6 v2-FP.

Les modules de Young dynamiques des CEM 10 v2-FP et CEM 6 v2-FP commencent à fortement diminuer après dix semaines. Jusqu'alors, le CEM 10 est aussi bon que CEM 1.

En comparaison au filler pur, le filler impur semble donc conférer une moins bonne résistance aux ciments face aux attaques sulfatiques à 5°C.

Comme c'était le cas dans CEMCALC I, les valeurs de module d'élasticité semblent diminuer avec l'augmentation de teneur en filler calcaire. Cependant, contrairement aux ciments riches en laitier, c'est le ciment riche en cendre volante et filler calcaire qui cède le premier (CEM 12 v2-FP).

f) Mesures sonores

La Figure 6-69 présente l'évolution complète de la vitesse de propagation sonore au sein des échantillons après un an de cure des six ciments de laboratoire et des trois ciments industriels de référence.

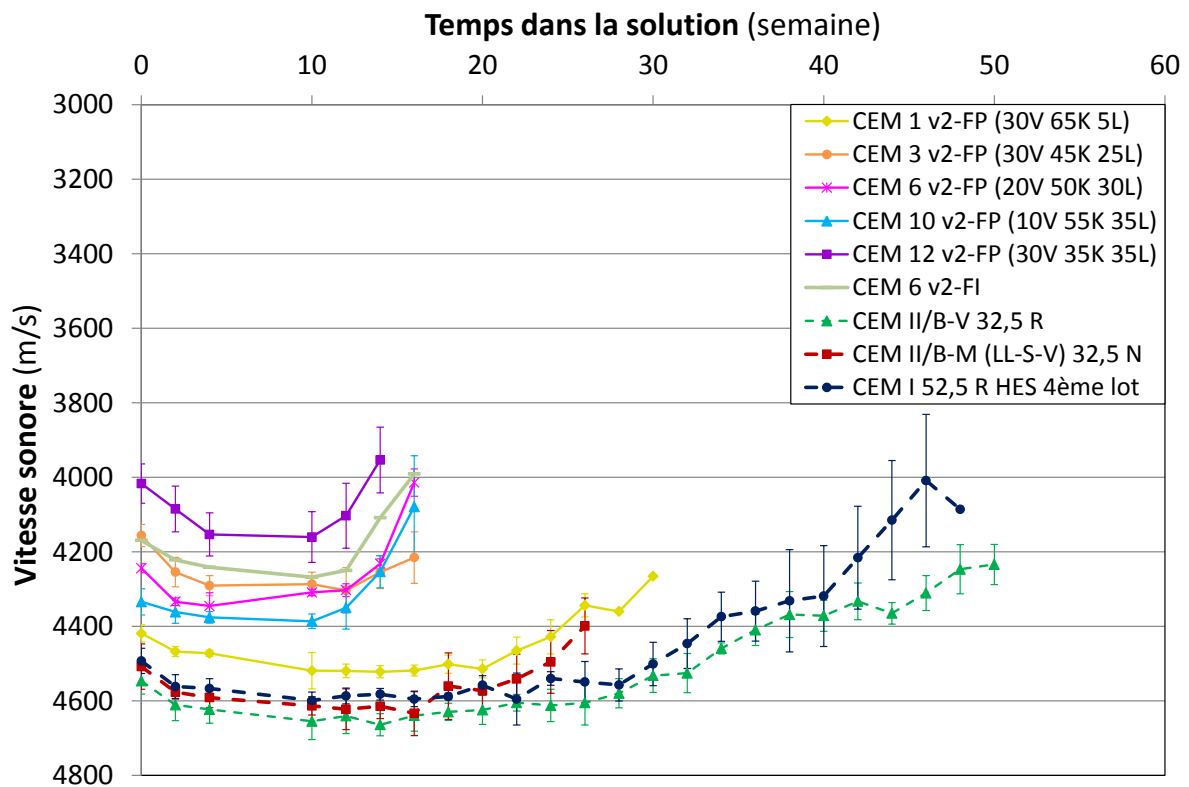


Figure 6-69 – Evolution de la vitesse sonore dans les mortiers à base des ciments étudiés jusqu'à 50 semaines

L'ordre chronologique de casse des éprouvettes sous l'influence des sulfates à 5°C et les tendances sont globalement les mêmes que dans le cas des éprouvettes conservées pour les mesures du module d'élasticité. Les différentes échéances auxquelles les éprouvettes 2*2*16 cm³ ont cassées sont reprises en Annexe 4.

Les trois ciments de référence (CEM II/B-V 32,5 R, CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N et CEM I 52,5 R) ont des vitesses sonores plus élevées que les six ciments de laboratoire. Cependant, les trois éprouvettes du CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N cassent avant celles du CEM 1 v2-FP. En effet, contrairement aux mesures du module d'élasticité, toutes les éprouvettes du ciment de référence CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N sont déjà cassées à 26 semaines. Le ciment de laboratoire CEM 1 v2-FP tient, dès lors, 4 semaines de plus que lui.

D'autre part, on constate que les deux autres ciments de référence ont leur vitesse sonore qui diminue à partir de 28 semaines. Ce qui signifie qu'une décohésion au sein du matériau est en cours.

Dans le cas des mesures de vitesse sonore, les éprouvettes des CEM 6 v2-FI, CEM 6 v2-FP, CEM 10 v2-FP et CEM 3 v2-FP sont toutes cassées à 16 semaines. Comme dans le cas des modules d'élasticité, c'est le ciment riche en cendre et filler (CEM 12 v2-FP) qui a la vitesse sonore la plus faible et qui se dégrade le plus rapidement.

La vitesse sonore du CEM 10 v2-FP commence à diminuer après 10 semaines et, à 14 semaines, elle rejoint celles des CEM 6 v2-FP et CEM 3 v2-FP.

Les mesures de vitesse sonore montre également une nettement moindre résistance aux attaques sulfatiques pour les ciments ternaires à base de cendre volante (CEMCALC II) que de laitier (CEMCALC I).

Le seul ciment qui résiste aux sulfates à 5°C plus longtemps est le ciment riche en cendre et pauvre en filler (CEM 1 v2-FP) dont toutes les éprouvettes sont cassées à 30 semaines.

Jusqu'à 16 semaines, la vitesse sonore est un peu moins élevée avec l'utilisation de filler impur. Le CEM 6 v2-FI est ensuite rejoint par le CEM 6 v2-FP et l'entièreté de leurs éprouvettes sont cassées après 16 semaines.

g) Diffraction de rayons X

Les Figure 6-73, Figure 6-75, Figure 6-74 présentent des diffractogrammes effectués sur des éprouvettes détériorées par l'attaque sulfatique à 5°C.

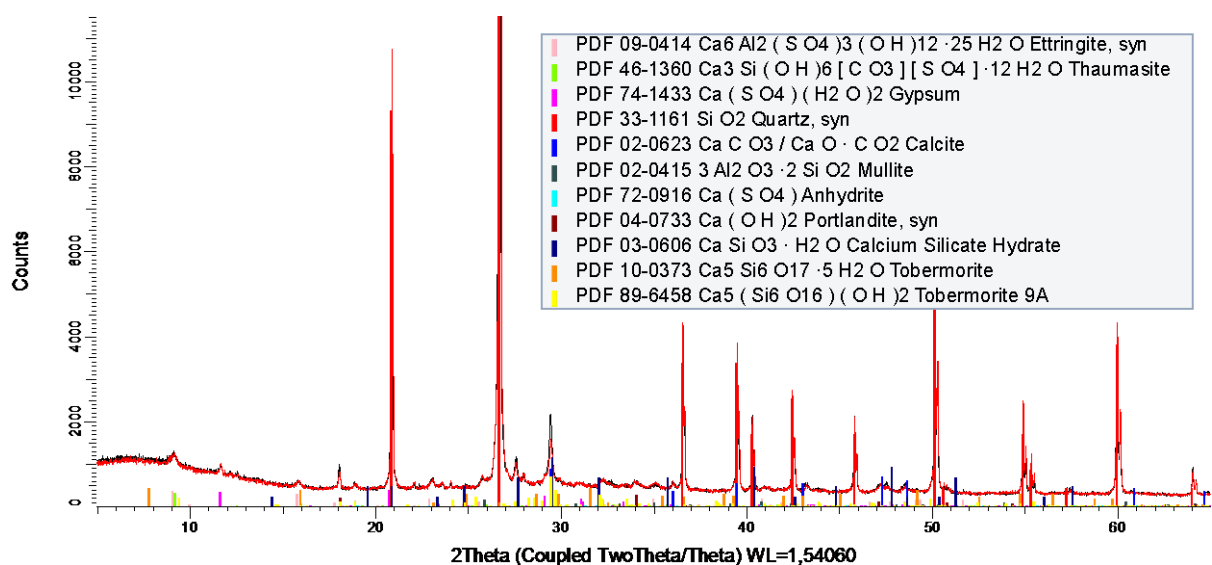


Figure 6-70 – Comparaison de deux diffractogrammes du CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 R (éprouvettes cassées à 26 et 30 semaines)

Le CEM II/B-M 32,5 R ne montre pas de différence de quantité des phases minéralogiques qu'il contient à 26 et 30 semaines.

Il contient notamment de la thaumasite ($\text{Ca}_3\text{Si}(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)(\text{OH})_6 \cdot 12(\text{H}_2\text{O})$) ainsi que de l'ettringite ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12} \cdot 26(\text{H}_2\text{O})$) aux différentes échéances. La distinction entre les deux phases n'est pas aisée.

La thaumasite est clairement due à l'attaque sulfatique à basse température et renforcée par la présence de filler calcaire qui fournit le carbonate nécessaire à sa formation. C'est elle qui est à la base de la décohésion des éprouvettes car pour se former elle puise de la silice dans les C-S-H formés par l'hydratation du ciment. La thaumasite ne se formerait qu'en

présence d'ettringite par nucléation hétérogène puis par croissance épitaxiale. L'influence de la température sur sa formation peut s'expliquer par l'augmentation des quantités de CO_2 dissoutes dans la solution interstitielle du matériau ou dans l'eau au contact du béton à basse température ($<15^\circ\text{C}$). Il faut noter également que la libération de carbonates dans le béton est, d'autre part, favorisée par le pH basique de la solution interstitielle. [60]

Contrairement à la formation d'ettringite, la thaumasite n'est pas directement influencée par la teneur en C_3A du ciment car elle ne contient pas d'alumine. [60]

Les éprouvettes contiennent également du gypse ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) et un peu d'anhydrite (CaSO_4), ces phases n'ont donc pas été totalement consommées lors de l'hydratation du ciment.

La grande quantité de quartz provient du sable présent dans le mortier. La calcite, quant à elle, provient majoritairement du filler calcaire présent dans le ciment. La petite quantité de mullite ($26^\circ 2\theta$) vient de la cendre volante.

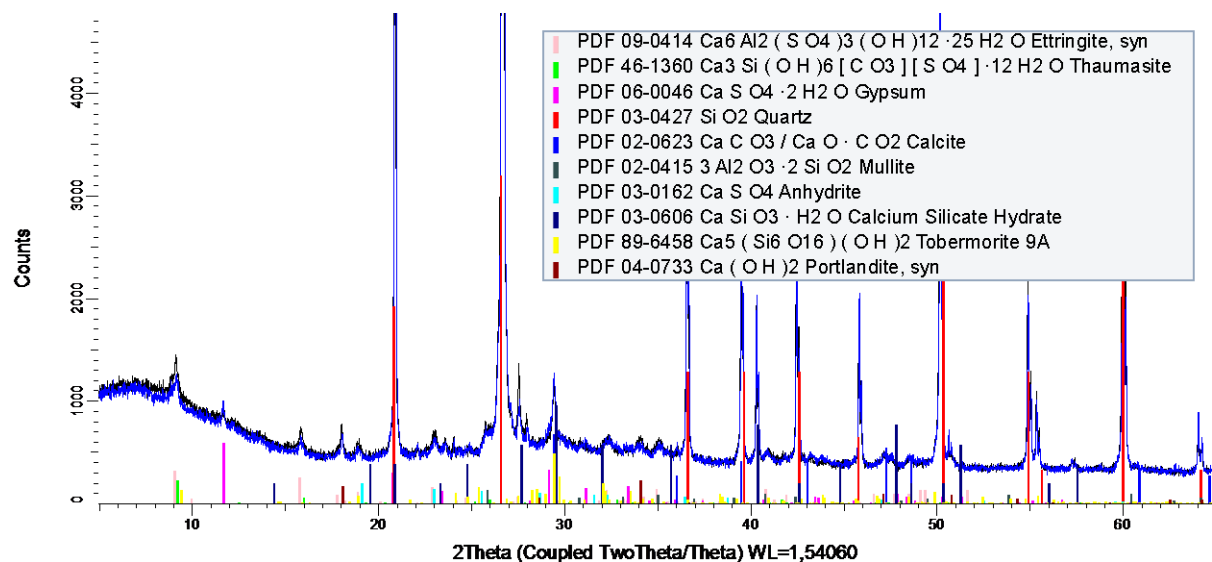


Figure 6-71 – Comparaison de diffractogrammes du CEM 1 v2-FP à 22 et 30 semaines (éprouvettes $2 \times 2 \times 28 \text{ cm}^3$)

Le CEM 1 v2-FP contient globalement les mêmes phases minéralogiques que le ciment de référence CEM II/B-M 32,5 R. Il semble contenir un peu plus d'anhydrite ($19^\circ 2\theta$).

La quantité de thaumasite et d'ettringite semble légèrement plus élevée à 30 semaines qu'à 22 semaines ($9^\circ 2\theta$).

Le monosulfoaluminate de calcium ($\text{Ca}_4\text{Al}_2\text{SO}_{10} \cdot 12\text{H}_2\text{O}$) n'est pas observé sur ces diffractogrammes (pic principal à $10^\circ 2\theta$).

On observe également la présence de phases hydratées de type C-S-H et CH (portlandite).

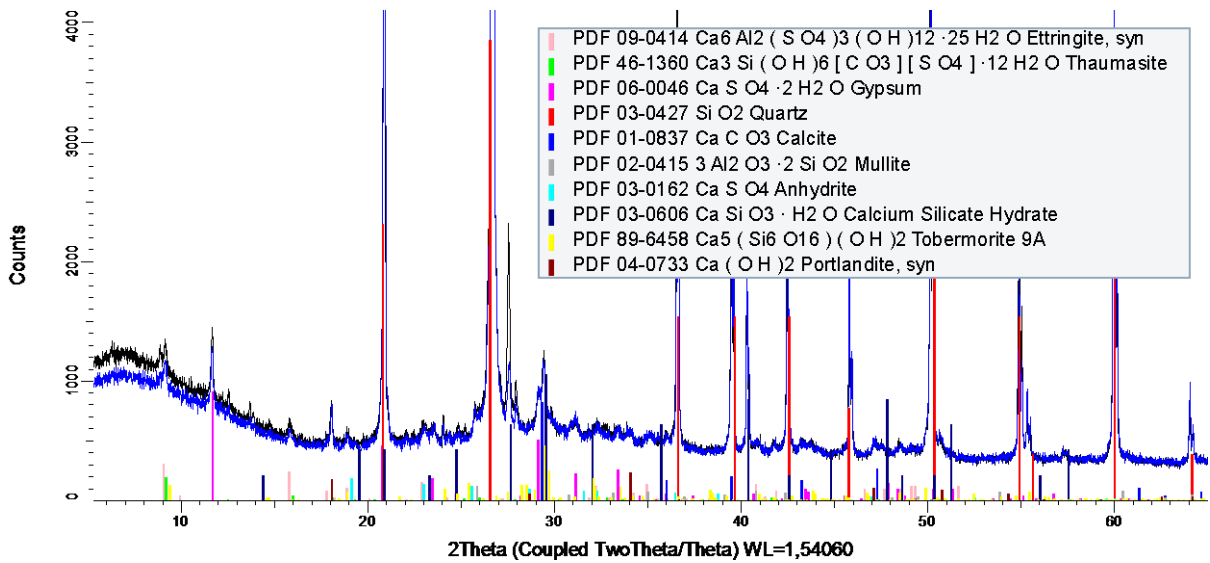


Figure 6-72 – Comparaison de diffractogrammes du CEM 1 v2-FP à 24 et 30 semaines (éprouvettes 2*2*16 cm³)

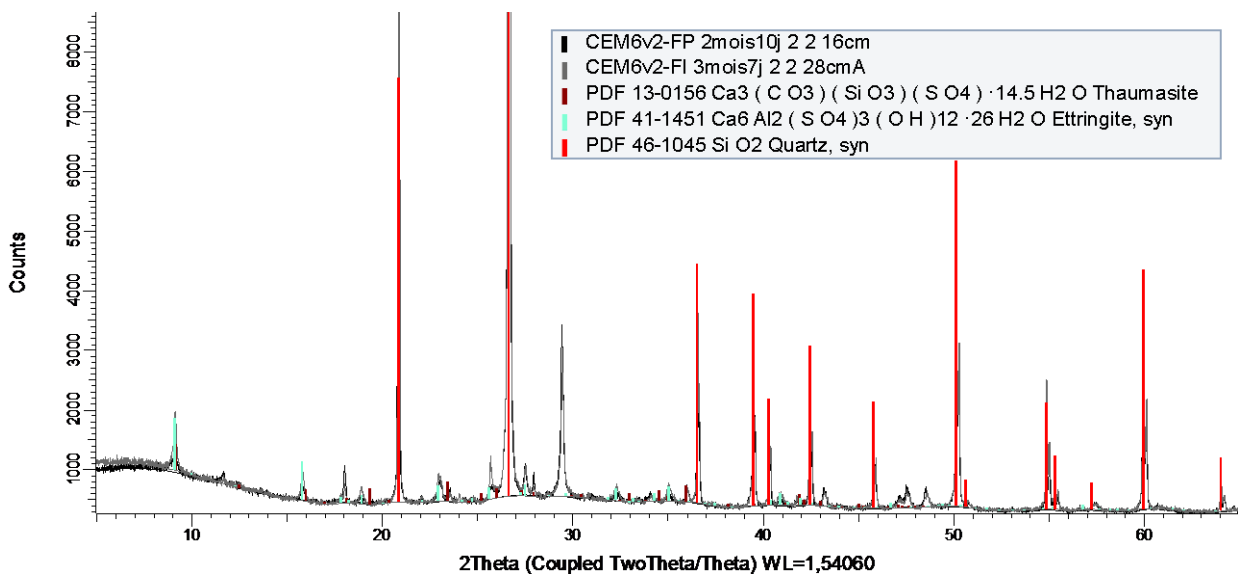


Figure 6-73 – Comparaison de diffractogrammes du CEM 6 v2-FP à 10 semaines et du CEM 6 v2-FI à 14 semaines

Le ciment à base de filler impur (CEM 6 v2-FI) à 14 semaines semble contenir plus de thaumasite et d'ettringite que le ciment à base de filler pur (CEM 6 v2-FP) à 10 semaines.

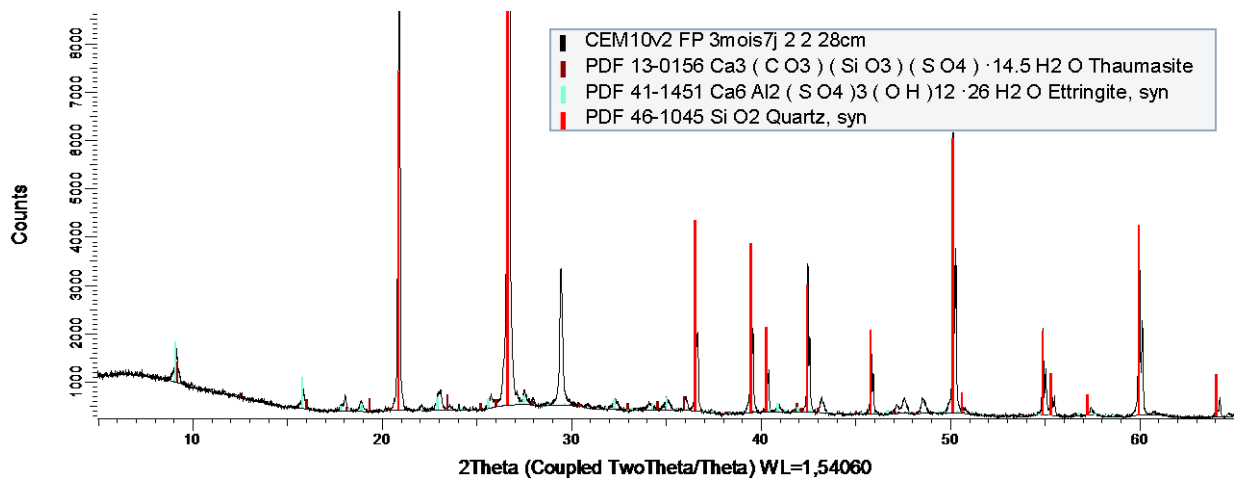


Figure 6-74 – Diffractogramme du CEM 10 v2-FP à 14 semaines

Le CEM 10 v2-FP à 14 semaines contient également de la thaumasite et de l'ettringite. Par contre, son gypse semble avoir été totalement consommé ($11,5^{\circ}2\theta$).

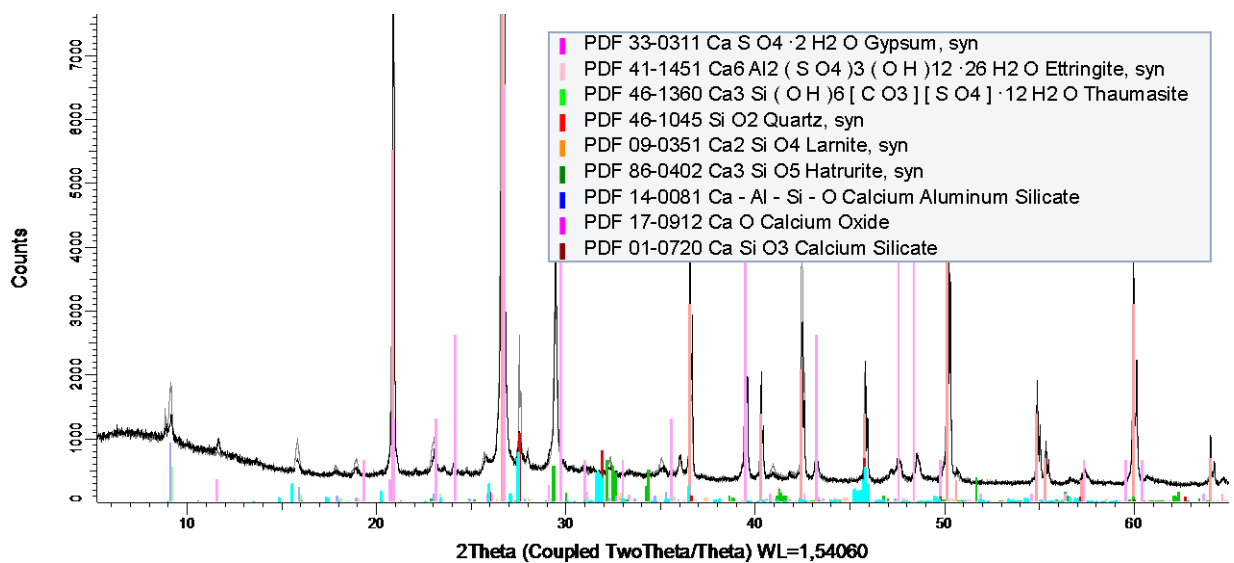


Figure 6-75 – Comparaison de diffractogrammes du CEM 12 v2-FP à 12 et 14 semaines

Le CEM 12 v2-FP à 12 semaines contient encore un peu de gypse ($11,5^{\circ}2\theta$) contrairement à 14 semaines.

Les pics de calcite ($29,5^{\circ}2\theta$) des CEM 6 v2-FP, CEM 10 v2-FP et CEM 12 v2-FP (Figure 6-73, Figure 6-74 et Figure 6-75) sont plus intenses que celui du CEM 1 (Figure 6-71) du fait qu'ils sont plus riches en filler calcaire.

h) Conclusion

Contrairement à CEMCALC I, les éprouvettes de ciments de laboratoire ont rapidement cassé suite à l'attaque sulfatique à basse température. Ce qui met en évidence que la cendre volante ne possède pas le caractère bénéfique du laitier vis-à-vis des attaques sulfatiques.

Cela est particulièrement visible avec le ciment riche en cendre et filler calcaire (CEM 12). Alors qu'il était le plus résistant des ciments de laboratoire à ce type d'attaque avec du laitier en remplacement de la cendre, il devient le moins performant dans CEMCALC II. Une combinaison haute teneur en cendre et filler diminue donc la résistance aux attaques sulfatiques à basse température.

Cependant, comme dans le cas de CEMCALC I, on constate que la présence de filler calcaire n'est pas favorable à la résistance aux attaques sulfatiques à basse température. Finalement, le ciment de laboratoire le plus résistant est celui riche en cendre et pauvre en filler calcaire (CEM 1 : 30V 65K 5L). Une teneur importante en cendre et moindre en filler semble donc être gage d'une meilleure résistance aux sulfates.

D'autre part, les ciments de référence résistent mieux à ces attaques sulfatiques. Au bout d'un an, seul celui contenant du filler calcaire en plus de la cendre (CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N) a cédé. La présence de cendre seule dans le ciment ne semble donc pas risquée face aux attaques sulfatiques à basse température comme nous pouvons le constater avec le CEM II/B-V 32,5 R.

Concernant le filler impur, en comparaison au filler pur, il semble conférer au ciment qui le contient une résistance aux attaques sulfatiques à basse température.

La DRX a permis d'identifier la présence de thaumasite dans chaque éprouvette dégradée ainsi que d'ettringite. Ces deux phases sont toutefois difficiles à distinguer l'une de l'autre.

A plus longue échéance, le gypse a totalement disparu de certains ciments. Il a donc probablement été totalement consommé par l'hydratation du ciment pour la formation d'ettringite.

Pour plusieurs ciments, leur teneur en thaumasite et ettringite semble augmenter avec le temps. Cela signifie certainement que la thaumasite et l'ettringite continuent à se former aux dépens des autres carbonates, sulfates, silicates et aluminates de calcium présents préalablement.

6.3.6.3 Conclusion des attaques sulfatiques

À 20°C, on observe que tous les mortiers à base des nouveaux ciments ternaires présentent un bon comportement face aux attaques sulfatiques, excepté le CEM 10 [10V 55K 35L] qui gonfle de manière importante à partir de 150 jours d'immersion. La teneur en cendres volantes semble contribuer à la résistance à l'attaque sulfatique, vu qu'il y a moins de portlandite Ca(OH)_2 disponible.

A 5°C, une teneur en cendres volantes importante et une teneur en filler calcaire réduite permettent d'obtenir une bonne résistance à l'attaque sulfatique également. Il a été observé que les nouveaux ciments ternaires K-S-L (CemCalc I) sont encore meilleurs que les ciments ternaires K-V-L (CemCalc II). Selon Neville, les ciments composés de laitier de haut-fourneau offrent une résistance contre l'attaque sulfatique à basse température [45].

6.3.7 Absorption d'eau

La détermination de l'absorption d'eau par immersion des bétons a été réalisée dans cette recherche car cette propriété constitue un indicateur de durabilité important.

6.3.7.1 Principe et conditions de l'essai

L'essai d'absorption d'eau par immersion a été réalisé selon la norme NBN B 15-215 [61]. L'absorption d'eau totale par immersion représente la quantité d'eau présente dans le béton au terme d'une immersion sous eau jusqu'à masse constante (M_1) et libérée lors d'une dessiccation jusqu'à masse constante en étuve ventilée à la température de $105 \pm 3^\circ\text{C}$ (M_2). Elle s'exprime en pourcent de la masse sèche.

Quatre cubes de dimensions $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ ont été moulés, respectant les critères suivants de la norme sur le volume des éprouvettes :

- Volume = min 800 cm^3 et max 1200 cm^3
- Rapport Volume/Surface entre 1,2 et 2

Les cubes ont ensuite été immergés sous eau pendant 100 jours avant de les mettre en étuve.

L'absorption d'eau par immersion (A) est alors exprimée selon la formule suivante :

$$A = 100 \times (M_1 - M_2) / M_2$$

6.3.7.2 Résultats obtenus

Les résultats des absorptions d'eau moyennes sont repris au Tableau 6-50 et à la Figure 6-76. La deuxième éprouvette pour le béton à base de CEM 6 FI présentait une valeur aberrante et a donc été retirée.

Béton	Ciment	Absorption d'eau totale [%]					
		A ₁	A ₂	A ₃	A ₄	A _m	σ
TYPE 1 (E/C = 0,45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	5.65	5.57	5.29	5.5	5.51	0.16
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	5.77	5.76	5.62	5.7	5.72	0.07
	CEM II/B-V 32.5 R	5.42	5.34	5.34	5.4	5.37	0.04
	CEM 1 [30V 65K 5L]	5.37	5.64	5.38	5.4	5.46	0.13
	CEM 3 [30V 45K 25L]	6.16	6.24	6.35	6.4	6.30	0.13
	CEM 6 [20V 50K 30L]	6.23	5.91	6.21	6.1	6.11	0.15
	CEM 10 [10V 55K 35L]	6.10	6.07	5.92	6.0	6.01	0.09
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	6.31	-	6.25	6.4	6.32	0.05

Tableau 6-50 – Absorptions d'eau totales moyennes pour les bétons type 1 (E/C de 0,45)

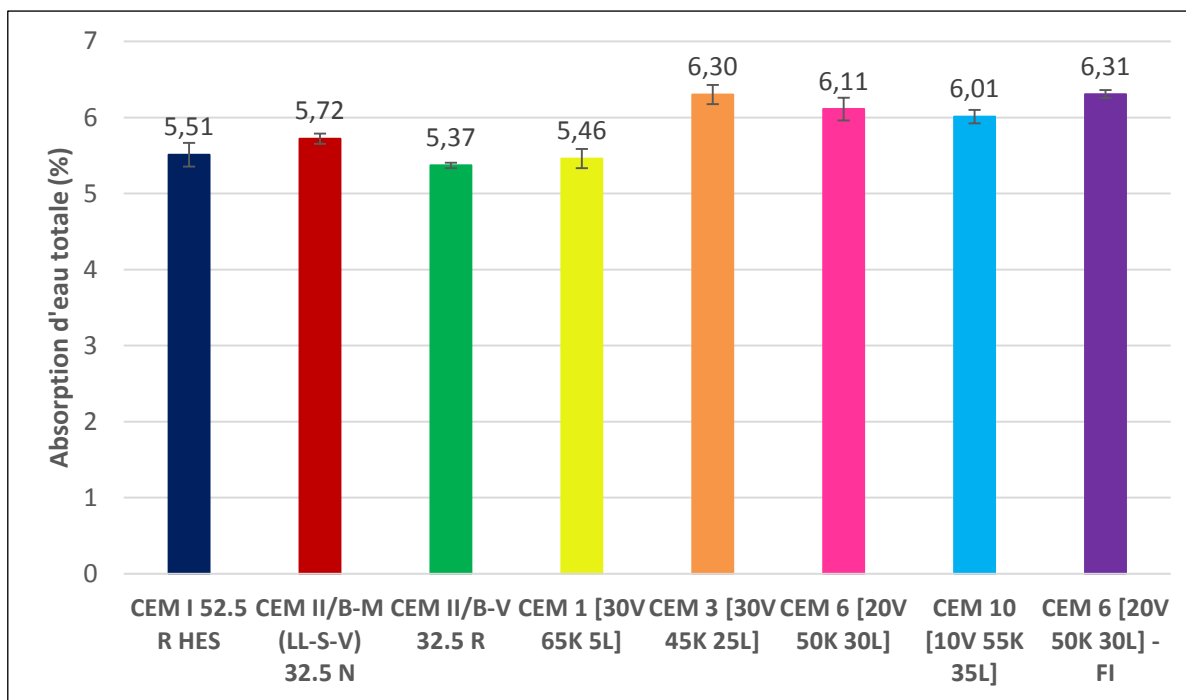


Figure 6-76 – Absorptions d’eau totales moyennes pour les bétons de type 1 (E/C de 0,45 et C de 340 kg/m³)

A part pour le béton à base de CEM 1, les absorptions d’eau des bétons à base des nouveaux ciments ternaires sont **plus élevées** que celles des bétons à base des ciments industriels de référence.

L’absorption d’eau semblerait être plus importante lorsque la **teneur en filler calcaire** augmente et lorsque la **teneur en clinker** diminue.

Il est difficile de conclure sur l’influence du **filler impur** sur l’absorption d’eau. Les résultats sont en effet fort similaires.

La détermination de l’absorption d’eau n’avait pas été effectuée dans la première biennale **CemCalc I**. Elle n’a pas non plus fait l’objet de la recherche **CEM X**.

Selon le bulletin de la Febelcem concernant la durabilité des bétons par la maîtrise de l’absorption d’eau [62], l’absorption d’eau est principalement influencée par la teneur en eau totale dans le béton frais et non par le rapport E/C. Plus de l’eau est rajoutée, plus la porosité du béton augmente et donc l’absorption d’eau augmente. Dans cette recherche, les formulations des bétons sont constantes pour chaque type de béton, sauf pour le dosage en superplastifiant. Ce dernier apporte de l’eau supplémentaire dans le mélange.

Pour le béton de type 1 T(0,45), l’eau totale s’élève à 160 L/m³ et la quantité de ciment à 340 kg/m³, sauf pour le dosage en superplastifiant. Vu que le filler calcaire est considéré comme inerte, les bétons à base des ciments contenant beaucoup de filler calcaire (CEM 3,

CEM 6, CEM 10 et CEM 6 FI) auraient une teneur en eau non liée plus élevée et donc une absorption en eau plus grande.

Selon l'annexe O (informative) de la norme NBN B 15-001 [34], il existe quatre classes de résistance à l'absorption d'eau par immersion, selon les types de béton. Pour le béton de type T(0,45), la classe WAI(0,45) est spécifiée si les conditions suivantes sont satisfaites :

- Absorption moyenne sur 3 éprouvettes $\leq 5,5\%$
- Absorption individuelle de chaque éprouvette $\leq 6\%$

Dans le cas où des cubes de 15 cm de côté sont utilisés pour l'essai, ces valeurs limites doivent être réduites de 0,3%. Pour rappel, l'essai a été réalisé sur des cubes de 10 cm de côté dans cette présente recherche mais cela peut donner une valeur indicative à comparer. Dans le Tableau 6-50, aucune valeur moyenne n'est inférieure ou égale à 5,2%.

Les valeurs présentées dans le Tableau 6-50 seraient plus élevées qu'en pratique selon le document de la Febelcem [62]. En effet, en laboratoire, des granulats secs sont utilisés. Lors du mélange, ces granulats n'absorbent pas toute l'eau qu'ils devraient absorber car ils deviennent vite enrobés de pâte de ciment. Cela résulte en une augmentation de la teneur en eau non liée et donc de la porosité du béton. Cela se manifeste par des résultats d'absorption d'eau du béton plus élevés.

Néanmoins, comme indiqué dans la norme, les résultats d'absorption d'eau donnent uniquement une estimation grossière de la durabilité potentielle du béton. Dans le cadre de CemCalc II, les mesures d'absorption d'eau sembleraient corrélérer aux mesures de carbonatation. Nous observons que plus l'absorption d'eau est élevée, plus la profondeur de carbonatation est élevée.

Selon Neville [45], l'absorption d'eau peut donner une idée de la porosité du béton mais elle ne peut pas être utilisée comme mesure de la qualité du béton. La plupart des bons bétons présentent des absorptions d'eau inférieures à 10% en masse.

6.3.8 Perméabilité à l'oxygène

6.3.8.1 Introduction

La perméabilité à l'oxygène des bétons a été déterminée au moyen d'un perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU. L'essai consiste à mesurer les débits traversant un échantillon de mortier cylindrique sous l'effet de gradients de pression variables et d'en déduire la perméabilité en régime permanent.

6.3.8.2 Description du dispositif

La description du dispositif est illustrée par la Figure 6-77. Le perméamètre est raccordé à une bonbonne qui contient un gaz inerte (en général de l'oxygène) à une pression d'environ 200 bars. Un détendeur, installé à la sortie de la bonbonne, libère le gaz à une pression de 8 bars. Ce gaz passe ensuite au travers d'un régulateur de pression qui permet de régler finement la pression du flux. Cette valeur peut directement être lue sur le manomètre à aiguille. Le gaz, à pression stabilisée, est envoyé vers l'entrée de la cellule de mesure dans laquelle est confiné l'échantillon d'essai. La cellule permet d'isoler l'échantillon et force le gaz à passer au travers de celui-ci. Le gaz est canalisé à la sortie de la cellule et est dirigé vers l'un des 4 débitmètres à bulles, de volumes compris entre 1,5 et 150 ml. Ces débitmètres sont pourvus d'une entrée latérale sous la forme d'un tube en biais dirigée vers le haut, et d'un évent situé à l'opposé du tube d'admission.

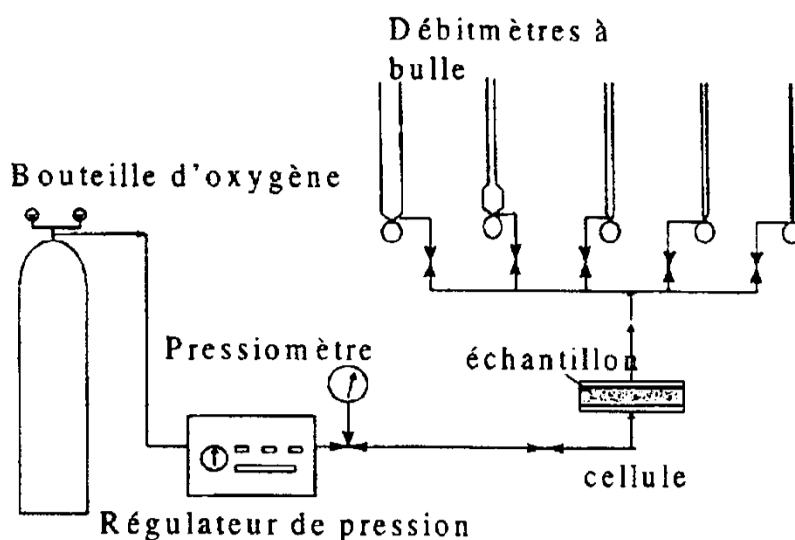


Figure 6-77 – Schéma du dispositif expérimental CEMBUREAU

La mesure du débit est réalisée en déterminant le temps de remontée d'une bulle de savon dans l'un des 4 tubes calibrés. L'opérateur choisit le débitmètre le mieux adapté au débit mesuré : le temps chronométré doit être supérieur à 30 secondes pour que la mesure soit valable ; sinon, il faut passer à un tube de plus gros diamètre et donc de plus gros volume. L'appareil est capable de mesurer des coefficients de perméabilité apparente de 10^{-19} à 10^{-14} m².

6.3.8.3 Détermination de la perméabilité apparente et intrinsèque

La perméabilité d'un matériau poreux traversé par un fluide compressible sous un régime laminaire et stationnaire peut être évaluée à partir de la formule de Hagen – Poiseuille :

$$k_a = \frac{2 Q P_a L \eta}{A (P^2 - P_a^2)} \quad \text{Eq. 1}$$

où k_a [m^2] est le coefficient de perméabilité apparente, P est la pression absolue d'alimentation appliquée [N/m^2], L [m] et A [m^2] sont respectivement la longueur et la section de l'échantillon, Q est le débit volumique mesuré à la pression atmosphérique en [m^3/s], P_a est la pression atmosphérique ($10^5 N/m^2$) η est la viscosité dynamique du gaz [$N.s/m^2$] à la température d'essai ($\eta = 2,02 \cdot 10^{-5} N.s/m^2$ à $20^\circ C$ dans le cas de l'oxygène).

L'hypothèse de l'écoulement laminaire (interaction mutuelle entre les molécules du fluide) n'est cependant pas respectée dans le cas de la microstructure d'un béton. En raison de la faible dimension des pores, comparable au libre parcours moyen λ des molécules de gaz, de tels écoulements présentent également une composante de glissement qui résulte des réflexions successives des molécules gazeuses sur la paroi des pores parallèlement à l'écoulement visqueux du liquide. Puisque le libre parcours moyen λ des molécules de gaz dépend de la pression appliquée, la composante de glissement de l'écoulement et, par conséquent, la perméabilité déterminée par l'équation de Hagen-Poiseuille, sont également fonction de la pression d'entrée du gaz. La perméabilité des matériaux poreux déterminée par l'équation de Hagen-Poiseuille est par conséquent qualifiée d'apparente.

A partir des valeurs de perméabilité apparente obtenues à plusieurs gradients de pression, Klinkenberg établit une méthode permettant de calculer la perméabilité intrinsèque, indépendante de la pression du fluide. Il observe en effet qu'une corrélation linéaire peut être obtenue lorsque la perméabilité apparente calculée par l'équation de Poiseuille est portée en fonction de l'inverse de la pression moyenne P_m . Dès lors, en considérant que l'écoulement peut être qualifié de purement visqueux lorsque les niveaux de pression sont fort élevés (puisque celle-ci entraîne une diminution du libre parcours moyen [63], il conclut que la coordonnée à l'origine de la droite obtenue est la perméabilité intrinsèque k_{int} . La méthode graphique de calcul est illustrée à la Figure 6-78. L'équation de la droite de corrélation est la suivante :

$$k_{app} = k_{int} \left(1 + \frac{\beta}{P_m}\right) \quad \text{Eq. 2}$$

où β est le coefficient de Klinkenberg, fonction de la porosité du milieu et de la nature du gaz infiltré - P_m est égal à la moyenne de la pression en amont et en aval de l'éprouvette.

On notera que la perméabilité au gaz est une mesure très importante du point de vue de la durabilité des matériaux à matrice cimentaire puisqu'elle conditionne la pénétration d'agents agressifs gazeux comme le dioxyde de carbone ainsi que le transfert de vapeur d'eau. Dans les bétons secs, la perméabilité au gaz est de 10^{-14} à $10^{-19} m^2$.

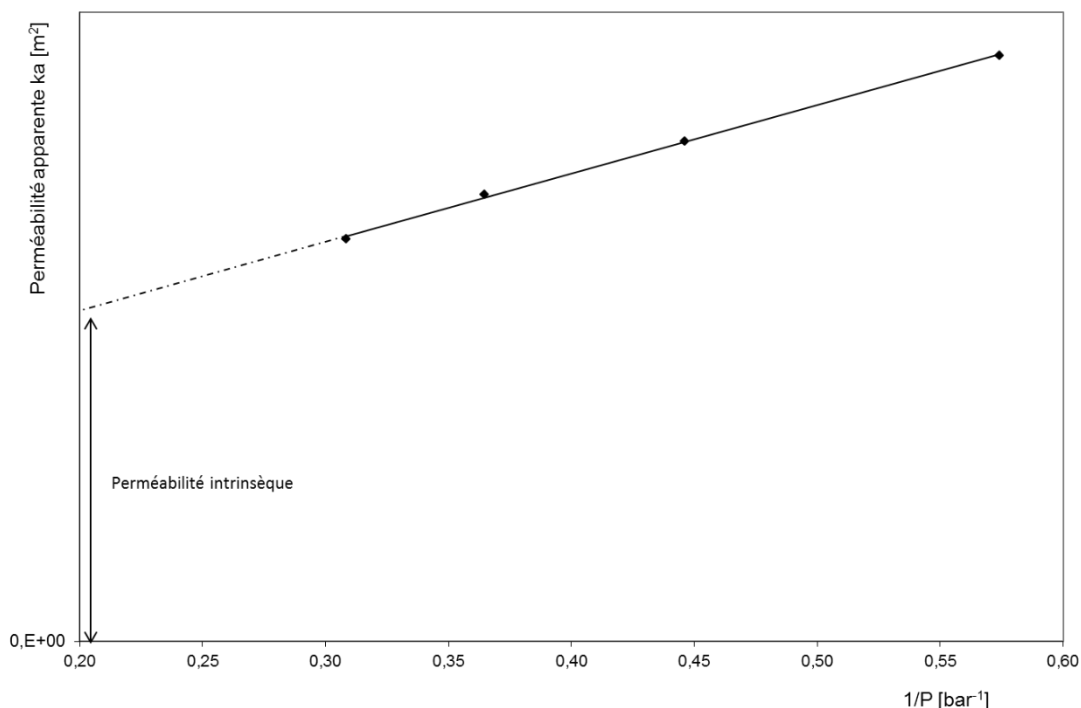


Figure 6-78 – Détermination de la perméabilité à l’air intrinsèque d’un béton par la méthode de Klinkenberg

6.3.8.4 Préparation des échantillons

La perméabilité est déterminée sur deux compositions de bétons (béton de type 1 : E/C de 0,45 et 340 kg/m^3 de ciment – béton de type 2 : E/C de 0,55 et 300 kg/m^3 de ciment) confectionnés à partir de trois ciments industriels (CEM I 52,5 R, CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N, CEM II/B-V 32,5 R) et des 5 ciments ternaires étudiés après 56 jours de maturation. Dans certains cas, l’influence de la cure sur la perméabilité a également été étudiée.

Les échantillons testés sont des tranches de béton de 50 mm d’épaisseur scié au centre de cylindres ($\varnothing = 150 \text{ mm}$, $H = 150 \text{ mm}$ - Figure 6-79). Après enrobage de leurs faces latérales à l’aide d’une couche d’époxy, les échantillons ont été séchés en étuve ventilée à $(105 \pm 5)^\circ\text{C}$ jusqu’à stabilisation de leur masse.

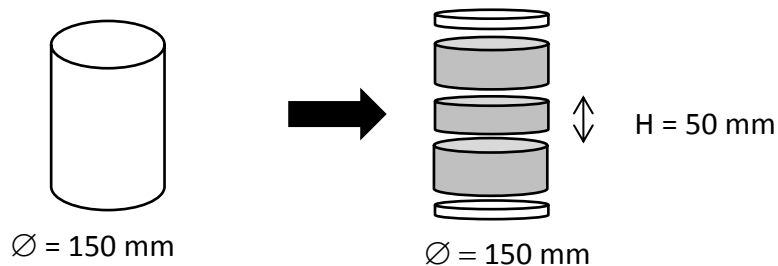


Figure 6-79 – Préparation des échantillons de béton pour la mesure de la perméabilité à l’air

6.3.8.5 Résultats obtenus

a) Effet de la composition des bétons et du type de ciment

Les valeurs moyennes et les incertitudes de mesures (IM) des coefficients de perméabilité intrinsèques (k_{int}) et de perméabilité pour une surpression de 0,1 MPa ($k_{app,0,2MPa}$) sont reprises dans le Tableau 6-51 et sont illustrées aux Figure 6-80 et Figure 6-81 en fonction du type de ciment et de la composition des bétons. Ces paramètres statistiques sont calculés à partir des mesures obtenues sur 3 échantillons ($n=3$).

On peut observer que :

- les coefficients de perméabilité intrinsèque et apparent sont de l'ordre de 10^{-18} à 10^{-19} pour les bétons de composition de type 1, ce qui les classe dans la catégorie de durabilité « très élevée » selon le document « *Conception des bétons pour une durée de vie donnée de ouvrage* » rédigé par l'AFGC-AFREM ;
- les coefficients de perméabilité des bétons confectionnés avec les ciments ternaires CEM 1 [30V 65K 5L], CEM 3 [30V 45K 25L] et CEM 6 [20V 50K 30L] sont comparables à ceux des bétons constitués des ciments industriels ;
- les coefficients de perméabilité des bétons confectionnés avec les ciments ternaires K-V-L sembleraient être inversement proportionnels à la teneur en cendres volantes ;
- les résultats de perméabilité semblent être corrélés aux résultats de diffusion de chlorures ;
- l'utilisation du filler calcaire impur (FI) dans la production du CEM 6 [20V 50K 30L] ne modifie pas de manière significative la perméabilité des bétons ;
- à l'exception du CEM 3 [30V 45K 25L], la perméabilité des bétons de type 2 est supérieure à celle des bétons de type 1, ce qui peut s'expliquer par le rapport E/C plus important.

Type de béton	Type de ciment	k_{int} [m ²]		$k_{app,0,2MPa}$ [m ²]	
		Moyenne	Incertitude	Moyenne	Incertitude
TYPE 1	CEM I 52,5 R	1,28E-18	1,70E-20	2,83E-18	1,54E-20
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	9,01E-19	1,88E-19	2,33E-18	6,77E-20
	CEM II/B-V 32,5 R	3,51E-19	8,52E-20	1,86E-18	6,24E-20
	CEM 1 [30V 65K 5L]	3,21E-19	1,25E-19	7,28E-19	1,19E-20
	CEM 3 [30V 45K 25L]	5,13E-19	7,63E-20	2,13E-18	1,92E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	5,31E-19	5,45E-20	1,06E-18	4,69E-19
	CEM 10 [10V 55K 35L]	1,18E-18	4,65E-20	4,00E-18	2,51E-20
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	1,26E-18	3,09E-19	1,26E-18	3,09E-19
TYPE 2	CEM I 52,5 R	3,74E-18	5,41E-19	9,01E-18	1,51E-19
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	2,99E-18	2,32E-19	7,54E-18	5,13E-19
	CEM II/B-V 32,5 R	1,71E-18	3,99E-19	4,16E-18	1,02E-18
	CEM 1 [30V 65K 5L]	1,45E-18	6,81E-19	4,55E-18	1,47E-18
	CEM 3 [30V 45K 25L]	4,58E-19	3,64E-20	1,90E-18	1,74E-20
	CEM 6 [20V 50K 30L]	1,50E-18	2,36E-34	5,88E-18	0,00E+00
	CEM 10 [10V 55K 35L]	8,50E-18	5,26E-19	2,36E-17	2,42E-18
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	5,50E-18	3,03E-19	1,46E-17	6,22E-19

Tableau 6-51 – Moyenne et incertitude de mesure des coefficients de perméabilité k_{int} et $k_{0,2MPa}$ des bétons de type 1 et de type 2 calculés à partir de 3 échantillons

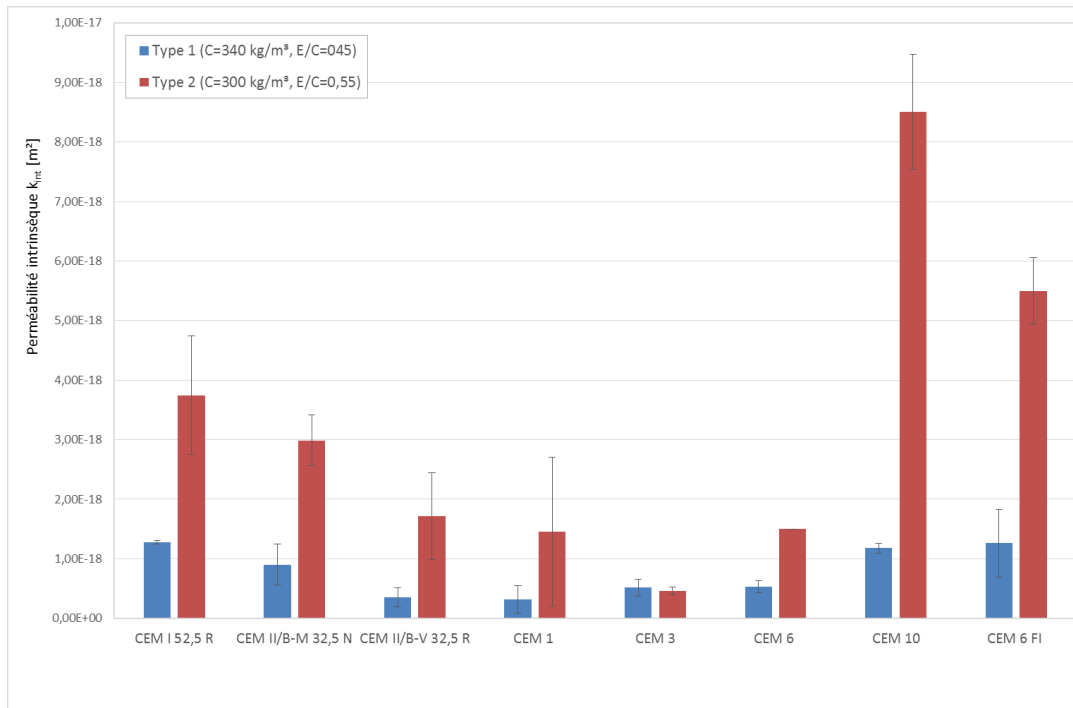


Figure 6-80 – Comparaison des coefficients de perméabilité intrinsèque k_{int} des bétons en fonction du type de ciment utilisé et de leur composition

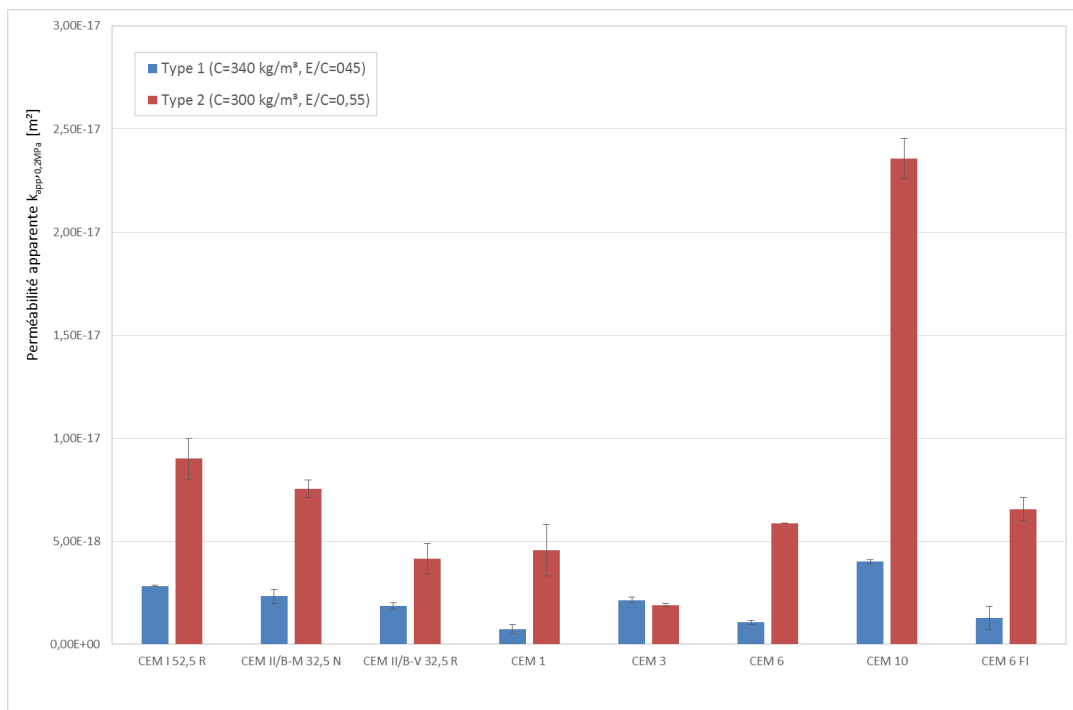


Figure 6-81 – Comparaison des coefficients de perméabilité apparent $k_{app,0,2MPa}$ des bétons en fonction du type de ciment utilisé et de leur composition

6.3.8.5.1 Effet des conditions de cure

L'impact des conditions de cure (bonne ou mauvaise) des bétons de type I ($C=340 \text{ kg/m}^3$, $E/C = 0,45$) a été étudié dans le cas de deux ciments industriels (CEM I 52,5 R et CEM II/B-V 32,5 R) et du ciment CEM 6 [20V 50K 30L] produit à base de filler calcaire pur et impur (FI).

Le Tableau 6-52 reprend les valeurs moyennes et les incertitudes de mesures des perméabilités intrinsèques (k_{int}) et les perméabilités pour une surpression de 0,1 MPa ($k_{app,0,2MPa}$). Les résultats sont également illustrés aux Figure 6-82 et Figure 6-83.

On peut observer que le conditionnement des bétons a une importance considérable sur la perméabilité des bétons. L'utilisation d'une mauvaise cure augmente la perméabilité des bétons d'un facteur 10.

Type de béton	Type de ciment	$k_{int} [m^2]$		$k_{app,0,2MPa} [m^2]$	
		Moyenne	Incertitude	Moyenne	Incertitude
TYPE 1 BONNE CURE	CEM I 52,5 R	1,28E-18	1,70E-20	2,83E-18	1,54E-20
	CEM II/B-V 32,5 R	3,51E-19	8,52E-20	1,86E-18	6,24E-20
	CEM 6 [20V 50K 30L]	5,31E-19	5,45E-20	1,06E-18	4,69E-19
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	1,26E-18	3,09E-19	1,26E-18	3,09E-19
TYPE 1 MAUVAISE CURE	CEM I 52,5 R	1,13E-17	1,43E-18	2,84E-17	1,01E-18
	CEM II/B-V 32,5 R	3,07E-17	3,08E-18	4,21E-17	8,75E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	2,09E-17	2,77E-18	6,36E-17	2,41E-18
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	1,70E-17	1,14E-18	4,74E-17	5,65E-19

Tableau 6-52 – Moyenne et incertitude de mesure des coefficients de perméabilité k_{int} et $k_{0,2MPa}$ des bétons de type 1 ayant été soumis à une bonne cure et à une mauvaise cure calculés à partir de 3 échantillons

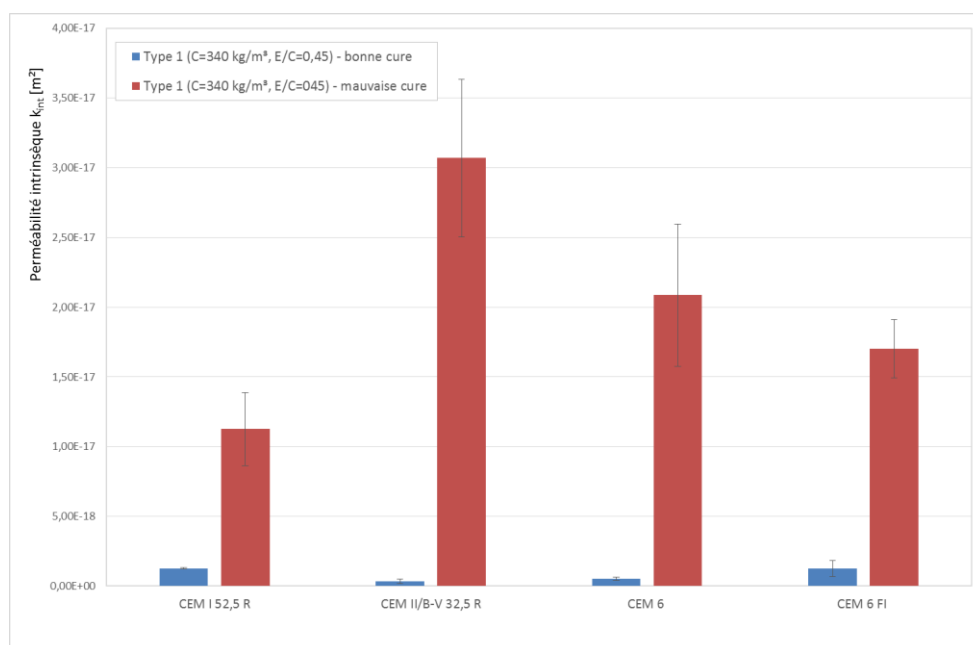


Figure 6-82 – Comparaison des coefficients de perméabilité intrinsèque k_{int} des bétons en fonction du type de ciment et de leur composition

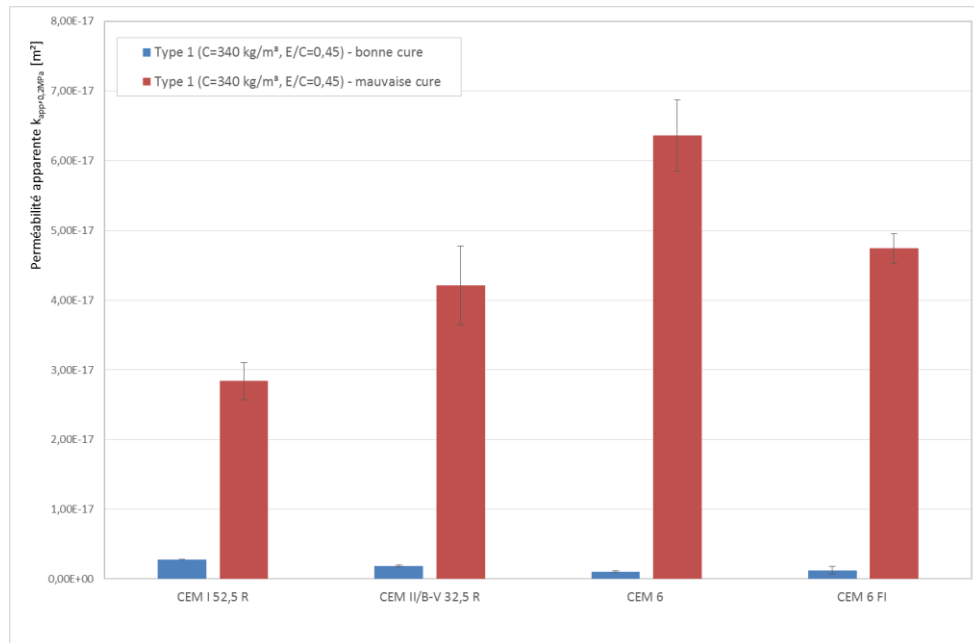


Figure 6-83 – Comparaison des coefficients de perméabilité apparent $k_{app,0,2MPa}$ des bétons en fonction du type de ciment et de leur composition

6.3.8.6 Conclusions

La mesure de la perméabilité au gaz par la méthode préconisée par l’AFGC-AFREM a été réalisée. Les perméabilités obtenues à différentes pressions d’admission permettent de calculer la perméabilité intrinsèque k_{int} , indépendante de la pression de mesure, et la perméabilité pour une surpression de 0,1 MPa ($k_{0,2MPa}$), généralement utilisée par l’AFGC-AFREM comme valeur de référence [41].

Les coefficients de perméabilité apparents $k_{app,0,2MPa}$ des bétons de type 1 soumis à une bonne cure sont de l’ordre de 10^{-18} à 10^{-19} m², quel que soit le ciment utilisé, ce qui les classe dans la catégorie des bétons de durabilité « très élevée » [41]. Cela est étonnant par rapport aux résultats de durabilité obtenus.

La teneur en cendres volantes semblerait avoir un effet sur la perméabilité des bétons : une haute teneur en cendres volantes contribuerait à une perméabilité plus faible et donc une meilleure durabilité. Une corrélation avec les résultats de diffusion des chlorures a également été observée.

On observe en outre que ces ciments n’engendrent pas une augmentation importante des coefficients de perméabilité comparativement aux ciments industriels couramment utilisés. Les bétons constitués du ciment CEM 10 [10V 55K 35L], qui présentent la plus haute teneur en filler calcaire des ciments étudiés, semblent toutefois les plus perméables de manière systématique.

La composition des bétons et leur mode de conditionnement influencent par contre sensiblement les résultats obtenus. Ainsi, on a pu mettre en évidence que :

- les bétons de type 2, contenant moins de ciment et un rapport E/C plus élevé que les bétons de type 1, sont plus perméables (à l'exception de la formulation à base de CEM 3 [30V 45K 25L] pour laquelle aucune différence significative n'est observée) ;
- les bétons de type 1 ayant été soumis à une mauvaise cure offrent des coefficients de perméabilité de l'ordre de 5 à 10 fois plus importants que les bétons ayant été conditionnés dans de bonnes conditions.

6.3.9 Conclusions

La Tâche 6.3 avait pour objectif de comparer les **performances de durabilité** des bétons (mortiers) à base des cinq nouveaux ciments ternaires K-V-L avec celles des bétons (mortiers) à base des ciments industriels de référence.

La **résistance à la carbonatation** a été déterminée pour les trois types de bétons constitués des nouveaux ciments ternaires. Ces derniers présentent des résistances inférieures aux bétons de référence. Le béton à base du CEM 1 se rapproche des bétons de référence. La mauvaise cure influence négativement la résistance à la carbonatation.

Concernant la **résistance au gel avec sels de déverglaçage** sur les bétons de type 1, seul le béton à base de CEM 1 résiste aux cycles de gel-dégel de la même manière que le béton à base de CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N. À 56 jours, il a même un meilleur comportement que ce béton de référence. Les autres bétons à base des nouveaux ciments ternaires présentent des pertes de matière cumulées supérieures. La mauvaise cure influence négativement la résistance au gel-dégel avec sels de déverglaçage.

La **résistance au gel-dégel interne** a été déterminée sur les bétons de classe d'environnement EE3. Les résultats de perte de module d'élasticité dynamique relatif, déterminé par des mesures de vitesse sonore, sont corrélés à la perte de résistance en traction par fendage avant et après les cycles de gel-dégel. Le béton le moins résistant est le béton de référence à base du CEM I 52,5 R HES. Les bétons à base des CEM 1 et CEM 6 présentent une meilleure résistance que la référence.

La **résistance à la diffusion des chlorures** des bétons de type 1 a été déterminée en utilisant la méthode décrite dans la CEN/TS 12390-11. Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires présentent des coefficients de diffusion inférieurs ou égaux aux bétons de référence, sauf pour le CEM 10 et le CEM 6 FI (bonne cure) et les CEM 6 et CEM 6 FI (mauvaise cure).

La **résistance aux attaques sulfatiques** a été déterminée sur mortier à deux températures différentes : à 20°C par des essais de gonflement et à 5°C par des mesures de module d'élasticité et de vitesse sonore.

A **20°C**, jusqu'à un temps d'immersion d'environ 150 jours, tous les mortiers à base des nouveaux ciments ternaires présentent un gonflement quasi nul et inférieur à celui des mortiers de référence à base des CEM I 52,5 R HES et CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N, excepté celui à base du CEM 10 qui présente déjà un gonflement important. Le mortier à base de CEM II/B-V 32,5 R présente également un bon comportement à l'attaque sulfatique.

A **5°C**, une teneur en cendres volantes importante et une teneur en filler calcaire réduite permettent d'obtenir une bonne résistance à l'attaque sulfatique également. Il a été observé que les nouveaux ciments ternaires K-S-L (CemCalc I) sont meilleurs que les ciments ternaires K-V-L (CemCalc II). Selon Neville, les ciments composés de laitier de haut-fourneau offrent une résistance contre l'attaque sulfatique à basse température [45].

Des mesures **d'absorption d'eau** par immersion, indicateur de durabilité, ont été réalisées sur les bétons de type 1 selon la norme NBN B 15-215. Les résultats des bétons à base des nouveaux ciments ternaires sont plus élevés, sauf pour celui à base du CEM 1 qui a une absorption d'eau comparable à celles des ciments ternaires.

Finalement, des mesures de la **perméabilité à l'oxygène** ont été réalisées sur les deux types de béton, par la méthode préconisée par l'AFGC-AFREM. La perméabilité intrinsèque est de l'ordre de 10^{-19} m² pour les bétons de type 1 et de 10^{-18} m² pour les bétons de type 2 et semble dépendre de la teneur en cendres volantes des ciments. Les perméabilités des bétons à base des nouveaux ciments ternaires se trouvent dans la gamme des ciments industriels de référence, sauf pour les bétons de type 2 à base des CEM 10 et CEM 6 FI. Le critère de l'AFGC-AFREM classe ces bétons dans la catégorie « durabilité très élevée », ce qui paraît étonnant en comparaison avec les résultats de durabilité obtenus.

Le Tableau 6-53 suivant reprend les **facteurs d'influence** (composition, effet de la mauvaise cure, influence du filler impur, corrélation avec d'autres propriétés) prépondérants pour chaque essai réalisé dans cette recherche et présente la comparaison avec la biennale précédente **CemCalc I**. Le premier facteur cité est le plus important. Les facteurs d'influence ont été déterminés par analyse du coefficient de corrélation linéaire (coefficient de corrélation > 0,75). Pour rappel, un coefficient de corrélation nul ne signifie pas l'absence de toute relation entre les grandeurs. Et l'existence d'une corrélation, aussi bonne soit elle, n'est jamais la preuve d'une relation de cause à effet.

Essais	Facteurs d'influence	
	CemCalc II (K-V-L)	CemCalc I (K-S-L)
Carbonatation	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $1/[K]$ et à $[L]$ • Pas influence du filler impur • Effet négatif de la mauvaise cure • Type de béton • Corrélation avec R_c 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $[L]$ et à $1/[K]$ • Résistances plus élevées que CemCalc II
Gel avec sels	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $[L]$ et à $1/[K]$ dans une moindre mesure • Pas influence du filler impur • Effet négatif de la mauvaise cure 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $1/[S]$ • Résistances plus élevées
Gel interne	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $[K]$ et à $1/[V]$ 	
Chlorures	<ul style="list-style-type: none"> • Si on compare que les nouveaux ciments ternaires : proportionnel à $1/[V]$ • Effet négatif du filler impur • Effet négatif de la mauvaise cure 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $1/[S]$ • Résistances plus élevées globalement
Sulfates	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $1/[V]$ • Pas influence du filler impur à 20°C • Léger effet négatif du filler impur à 5°C 	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $[K]$ et à $1/[S]$ • Résistances un peu plus élevées
Absorption d'eau	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $[L]$ et à $1/[K]$ • Pas influence du filler impur • Corrélation avec profondeur de carbonatation 	
Perméabilité à l'O_2	<ul style="list-style-type: none"> • Proportionnel à $1/[V]$ • Pas influence du filler impur • Effet négatif de la mauvaise cure • Corrélation avec diffusion des chlorures 	<ul style="list-style-type: none"> • Influence du type de ciment peu significative

Tableau 6-53 – Synthèse des facteurs d'influence pour chaque essai et comparaison avec la recherche précédente CemCalc I

Pour résumer, sur base des choix réalisés dans cette étude, les conclusions suivantes ont été observées :

- La carbonatation dépend principalement de la teneur en clinker [K] et de la teneur en filler calcaire 1/[L], tout comme la résistance en compression. Ainsi, une résistance en compression élevée permet d'obtenir une résistance à la carbonatation élevée.
- Une teneur élevée en filler calcaire [L] a un effet défavorable sur la carbonatation, le gel avec sels, l'absorption d'eau et les attaques sulfatiques à 5°C.
- Une teneur élevée en cendres volantes [V] des ciments ternaires semble avoir un effet positif par rapport au clinker, sur le gel interne, la diffusion des chlorures et l'attaque sulfatique à 20°C. Cet effet favorable pour la pénétration des chlorures et l'attaque sulfatique à 20°C est confirmé par la littérature [45]. A 5°C, la présence de cendres volantes ne permet pas de limiter la décohérence due à la thaumasite.
- De manière générale, la mauvaise cure a un effet négatif sur la durabilité des bétons (carbonatation, gel avec sels, chlorures, perméabilité).
- La présence du filler impur testé ne semble pas influencer la durabilité des bétons. Une influence néfaste a été observée pour la diffusion des chlorures et les attaques sulfatiques à 5°C.
- Les meilleures performances des ciments ternaires à base de cendres volantes vis-à-vis du gel interne par rapport au gel avec sels de déverglaçage ont également été observées par Bilodeau et al. [64]. Une hypothèse serait qu'un béton avec une absorption d'eau élevée permettrait une vitesse de diffusion plus rapide de l'eau dans les pores, ce qui réduirait les pressions dues au gel interne.
- Les résultats d'absorption d'eau semblent être corrélés avec ceux de la carbonatation.
- La perméabilité semble être meilleure lorsque la teneur en cendres volantes [V] augmente. En outre, les résultats de perméabilité semblent être en lien avec les résultats de diffusion des chlorures.
- Le laitier (CemCalc I) semble mieux contribuer à la durabilité par rapport aux cendres volantes (CemCalc II).

Les résultats obtenus pour chaque performance ont par ailleurs été comparés aux **critères d'évaluation de la norme NBN B 15-100** [19] et celles de la **norme en cours de révision** [37] pour les bétons ayant subi une bonne cure et ceux ayant subi une mauvaise cure. Les Tableau 6-54 et Tableau 6-55 suivants résument les exigences qui sont respectées ou non.

Les critères de la norme NBN B 15-100 en révision se basent sur une évaluation statistique. Pour chaque aspect de durabilité, une valeur maximale autorisée pour une différence de qualité $d_j\%$ est définie. Une composition de béton dont la qualité moyenne est inférieure à $d_j\%$ par rapport au béton de référence doit être refusée avec une probabilité de 90%. Pour la carbonatation, le gel avec sels de déverglaçage, le gel interne et la pénétration des chlorures, d vaut 30%. Pour les sulfates, d vaut 40%.

Pour obtenir l'approbation, il faut que T_j soit supérieur à une valeur limite correspondant au nombre d'échantillons n , reprise dans la norme. T_j est calculé comme suit :

$$T_j = \frac{m_r - \frac{m_t}{(1 + 0,01 d_j)}}{s/\sqrt{n}} \quad \text{avec} \quad s = \sqrt{s_r^2 + \frac{s_t^2}{(1 + 0,01 d_j)^2}}$$

Où :

- T_j = grandeur à déterminer pour l'aspect de durabilité j
- m_r = moyenne des n valeurs moyennes (par échantillon) de la composition de référence
- m_t = moyenne des n valeurs moyennes (par échantillon) de la composition à évaluer
- s_r = écart type des n valeurs moyennes (par échantillon) de la composition de référence
- s_t = écart type des n valeurs moyennes (par échantillon) de la composition à évaluer
- d_j = valeur d associée à l'aspect de durabilité j

Les critères d'évaluation portent sur :

- La profondeur moyenne à 56 jours pour la carbonatation;
- La diminution de la résistance au fendage Δf moyenne pour le gel interne ;
- La perte moyenne de masse P pour le gel avec sels de déverglaçage ;
- Le coefficient moyen de diffusion D pour les chlorures ;
- L'allongement relatif L du mortier après 6 mois pour les sulfates.

En outre, les Tableau 6-56 et Tableau 6-57 présentent les exigences des critères de la NBN B 15-100 qui sont satisfaites ou non, en prenant un autre ciment commercial comme référence, étant donné qu'actuellement les ciments répondants aux critères de la NBN EN 197-1 [4] peuvent être utilisés dans toutes les classes d'environnement de la norme NBN B 15-100. Ainsi par exemple, si on prend le béton à base du CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N comme référence, le béton à base du ciment ternaire CEM 1 satisfait aux critères de carbonatation et de gels avec sels.

Béton	Ciment	Carbonatation $d_k \leq 1.2 d_{k,réf}$	Gel avec sels $S \leq 1.2 S_{réf}$	Gel interne $\Delta f_{ct} \leq 1.2 \Delta f_{ct,réf}$	Chlorures $D_{nss} \leq 1.4 D_{nss,réf}$	Sulfates 20°C $L \leq 1.2 L_{réf}$ ou $L \leq 0.05\%$	Perméabilité $k_{int} [m^2]$
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	réf	réf		réf		1.28E-18 / 1.13E-17
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	-	-		-		9.01E-19
	CEM II/B-V 32.5 R	-	-		-		3.51E-19 / 3.07E-17
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X	X		✓		3.21E-19
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X	X		✓		5.13E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X / X	X / X		✓ / X		5.31E-19 / 2.09E-17
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X	X		X		1.18E-18
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X / X	X / X		X / X		1.26E-18 / 1.70E-17
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	réf					3.74E-18
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	-					2.99E-18
	CEM II/B-V 32.5 R	-					1.71E-18
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X					1.45E-18
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X					4.58E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X					1.50E-18
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X					8.50E-18
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X					5.50E-18
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	réf		réf			
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X		✓			
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X		✓			
MORTIERS	CEM I 52.5 R HES					X	
	CEM I 52.5 R HSR LA					X	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N					X	
	CEM II/B-V 32.5 R					En cours	
	CEM 1 [30V 65K 5L]					En cours	
	CEM 3 [30V 45K 25L]					En cours	
	CEM 6 [20V 50K 30L]					X	
	CEM 10 [10V 55K 35L]					X	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI					En cours	

Tableau 6-54 – Critères d'évaluation de la norme NBN B 15-100 (bonne cure / mauvaise cure) et perméabilité à l'air

✓ : critère respecté – X : critère non respecté – ND : critère non déterminé
réf : ciment utilisé comme référence pour le critère

Béton	Ciment	Carbonatation	Gel avec sels	Gel interne	Chlorures	Sulfates 20°C	Perméabilité k_{int} [m ²]
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	réf	réf		réf		1.28E-18 / 1.13E-17
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	-	-		-		9.01E-19
	CEM II/B-V 32.5 R	-	-		-		3.51E-19 / 3.07E-17
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X	X		✓		3.21E-19
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X	X		X		5.13E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X / X	X / X		✓ / X		5.31E-19 / 2.09E-17
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X	X		X		1.18E-18
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X / X	X / X		X / X		1.26E-18 / 1.70E-17
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	réf					3.74E-18
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	-					2.99E-18
	CEM II/B-V 32.5 R	-					1.71E-18
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X					1.45E-18
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X					4.58E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X					1.50E-18
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X					8.50E-18
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X					5.50E-18
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	réf		réf			
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X		✓			
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X		✓			
MORTIERS	CEM I 52.5 R HES					-	
	CEM I 52.5 R HSR LA					réf	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N					-	
	CEM II/B-V 32.5 R					-	
	CEM 1 [30V 65K 5L]					X	
	CEM 3 [30V 45K 25L]					✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L]					✓	
	CEM 10 [10V 55K 35L]					X	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI					✓	

Tableau 6-55 – Critères d'évaluation de la norme NBN B 15-100 en cours de révision (bonne cure / mauvaise cure) et perméabilité à l'air

✓ : critère respecté – X : critère non respecté – ND : critère non déterminé
réf : ciment utilisé comme référence pour le critère

Béton	Ciment	Carbonatation $d_k \leq 1.2 d_{k,réf}$	Gel avec sels $S \leq 1.2 S_{réf}$	Gel interne $\Delta f_{ct} \leq 1.2 \Delta f_{ct,réf}$	Chlorures $D_{nss} \leq 1.4 D_{nss,réf}$	Sulfates 20°C $L \leq 1.2 L_{réf}$ ou $L \leq 0.05\%$	Perméabilité $k_{int} [m^2]$
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	-	-		réf		1.28E-18 / 1.13E-17
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	réf	réf		-		9.01E-19
	CEM II/B-V 32.5 R	- / réf	-		-		3.51E-19 / 3.07E-17
	CEM 1 [30V 65K 5L]	✓	✓		✓		3.21E-19
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X	X		✓		5.13E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X / X	X / X		✓ / X		5.31E-19 / 2.09E-17
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X	X		X		1.18E-18
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X / ✓	X / X		X / X		1.26E-18 / 1.70E-17
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	-					3.74E-18
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	réf					2.99E-18
	CEM II/B-V 32.5 R	-					1.71E-18
	CEM 1 [30V 65K 5L]	✓					1.45E-18
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X					4.58E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X					1.50E-18
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X					8.50E-18
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X					5.50E-18
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	réf		réf			
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X		✓			
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X		✓			
MORTIERS	CEM I 52.5 R HES					X	
	CEM I 52.5 R HSR LA					X	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N					X	
	CEM II/B-V 32.5 R					En cours	
	CEM 1 [30V 65K 5L]					En cours	
	CEM 3 [30V 45K 25L]					En cours	
	CEM 6 [20V 50K 30L]					X	
	CEM 10 [10V 55K 35L]					X	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI					En cours	

Tableau 6-56 – Critères d'évaluation de la norme NBN B 15-100, avec un autre ciment de référence (bonne cure / mauvaise cure) et perméabilité à l'air

✓ : critère respecté – X : critère non respecté – ND : critère non déterminé
réf : ciment utilisé comme référence pour le critère

Béton	Ciment	Carbonatation	Gel avec sels	Gel interne	Chlorures	Sulfates 20°C	Perméabilité k_{int} [m ²]
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	-	-		réf		1.28E-18 / 1.13E-17
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	réf	réf		-		9.01E-19
	CEM II/B-V 32.5 R	-	-		-		3.51E-19 / 3.07E-17
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X	✓		✓		3.21E-19
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X	X		X		5.13E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X / X	X / X		✓ / X		5.31E-19 / 2.09E-17
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X	X		X		1.18E-18
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X / X	X / X		X / X		1.26E-18 / 1.70E-17
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	-					3.74E-18
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	réf					2.99E-18
	CEM II/B-V 32.5 R	-					1.71E-18
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X					1.45E-18
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X					4.58E-19
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X					1.50E-18
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X					8.50E-18
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X					5.50E-18
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	réf		réf			
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X		✓			
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X		✓			
MORTIERS	CEM I 52.5 R HES					-	
	CEM I 52.5 R HSR LA					réf	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N					-	
	CEM II/B-V 32.5 R					-	
	CEM 1 [30V 65K 5L]					X	
	CEM 3 [30V 45K 25L]					✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L]					✓	
	CEM 10 [10V 55K 35L]					X	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI					✓	

Tableau 6-57 – Critères d'évaluation de la norme NBN B 15-100 en cours de révision, avec un autre ciment de référence (bonne cure / mauvaise cure) et perméabilité à l'air

✓ : critère respecté – X : critère non respecté – ND : critère non déterminé

réf : ciment utilisé comme référence pour le critère

Pour résumer, sur base des choix réalisés dans cette étude, les conclusions suivantes peuvent être tirées :

- Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires (jusqu'à 30% de filler calcaire et 20% de cendres volantes) présentent un bon comportement par rapport au gel interne à la pénétration des chlorures et à l'attaque sulfatique à 20°C.
- Pour les autres essais (carbonatation, gel avec sels, attaque sulfatique à 5°C), il semblerait que ce soit surtout le filler calcaire qui ait un effet négatif.

Des pistes d'amélioration possibles sont suggérées :

- Une teneur en filler calcaire de 25% dans un ciment ternaire semble trop élevée pour assurer des performances de durabilité adéquates du béton. Des teneurs de 20% et 15% en filler calcaire pourraient permettre d'avoir un béton avec des propriétés de durabilité tout à fait satisfaisantes. Mais cela est à confirmer.
- Les cendres volantes sont des pouzzolanes qui pourraient être activées afin d'obtenir une évolution plus rapide de la résistance et donc de la durabilité, comme évoqué dans la conclusion de la recherche CEM X.

Nous insistons sur le fait que ces conclusions sont valables en premier lieu pour les choix réalisés dans cette étude (matériaux, formulations, cures, méthodes d'essais, etc.). Il n'est pas opportun de généraliser.

Les principaux résultats de cette étude de performances mécaniques des bétons à base des nouveaux ciments ternaires sont résumés au Tableau 6-58 suivant.

Les valeurs seuils sont celles reprises dans la recherche CEM X. Les valeurs seuils des autres propriétés sont définies en prenant le minimum et le maximum des valeurs, sans compter les valeurs du CEM I 52,5 R HES qui sont trop extrêmes.

Ciment	Composition [%]				Profondeur carbonatation 56 jours [mm]				Perte de masse gel 56 cycles [kg/m ²]		Perte gel interne [%]	Coefficient diffusion Cl- [10 ⁻¹² m ² /s]		Gonflement sulfates 182 j [%]	Abs eau [%]	Perméabilité k _{int} [m ²]			
	V	K	L	S	Type 1 - BC	Type 1 - MC	Type 2	Type 3	Type 1 - BC	Type 1 - MC	Type 3	Type 1 - BC	Type 1 - MC	Mortier	Type 1 - BC	Type 1 - BC	Type 1 - MC	Type 2	
CEM I 52,5 R HES		100			0	6	1.6	0	3	4.8	35	6.5	6.43	0.271	5.51	1.28E-18	1.13E-17	3.74E-18	
CEM I 52,5 R HSR		100												0.114					
CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	9	71	13	7	6.2		8.8		6.5			5.4		0.117	5.72	9.01E-19		2.99E-18	
CEM II/B-V 32,5 R	22	78			4.1	11.2	6.7		2.3	6.5		3.53	6.62	0.017	5.37	3.51E-19	3.07E-17	1.71E-18	
CEM 1 [30V 65K 5L]	30	65	5		7.4		9.4	6.9	5.3		15	2.46		0.028	5.46	3.21E-19		1.45E-18	
CEM 3 [30V 45K 25L]	30	45	25		12.2		16.4		9.4			6.13		0.04	6.3	5.13E-19		4.58E-19	
CEM 6 [20V 50K 30L]	20	50	30		10.3	18.4	14.2	9	9.4	16.1	12	3.58	13.87	0.061	6.11	5.31E-19	2.09E-17	1.50E-18	
CEM 10 [10V 55L 35L]	10	55	35		8.3		12.7		15.7			15.93		0.428	6.01	1.18E-18		8.50E-18	
CEM 6 FI [20V 50K 30L]	20	50	30		9.7	18.5	13		8.8	14.6		11.6	21.16	0.015	6.31	1.26E-18	1.70E-17	5.50E-18	
Critères					> 12				> 10		> 25	> 15		> 0.1	> 6	> 1.00E-17			
					6 - 12				5 - 10		10 - 25	5 - 15		0.04 - 0.1	5.5 - 6		1.00E-18 - 1.00E-17		
					< 6				< 5		< 10	< 5		< 0.04	< 5.5		< 1.00E-18		

Tableau 6-58 – Synthèse des résultats de l'étude (durabilité)

7 Tâche 7 – Etablissement de règles technologiques

7.1 Introduction

L'objectif de ce chapitre est de rassembler, pour chaque ciment ternaire K-V-L, l'ensemble des résultats obtenus aux tâches 5 et 6 et relatifs à l'utilisation des ciments dans les bétons. Il s'agit également de croiser ces résultats avec les critères de la NBN B 15-100 [19] et ceux de la norme en cours de révision [37], de manière à établir des règles technologiques pour la prescription (ou la spécification) d'un béton à base de ces nouveaux ciments ternaires.

Après un bref rappel théorique et normatif à propos de la spécification d'un béton et des exigences en matière de durabilité pour les classes d'exposition et d'environnement définies dans les normes NBN EN 206-1 [65] et NBN B15-001 [34], les trois types de béton confectionnés au cours de la recherche ainsi que leur caractérisation en termes de performances mécaniques et de durabilité seront à nouveau détaillés.

Finalement, les différents résultats obtenus seront rassemblés dans un tableau et analysés de manière à définir, pour chaque ciment K-V-L, les domaines d'application potentiels en se référant à ces classes d'exposition.

7.2 La spécification d'un béton

Selon les normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001, le béton peut être prescrit (spécifié) de différentes manières. La principale est celle où l'utilisateur prescrit les exigences de performance souhaitées du béton ou, selon les termes de la norme, un béton à « propriétés spécifiées ».

Dans la description des exigences des performances souhaitées, les deux normes prévoient des « **exigences de base** » et des « **exigences complémentaires** ». Les exigences de base sont au nombre de cinq. La première est d'ordre général et stipule que le béton doit être conforme aux normes NBN EN 206-1 et NBN B 15-001. Les quatre autres exigences de base sont les suivantes :

- Résistance à la compression (A) ;
- Durabilité (B) ;
- Consistance (C) ;
- Dimension des granulats (D).

La norme NBN EN 206-1 (Tableau 7) définit 16 classes de **résistance à la compression**. Un béton doit toujours être spécifié en termes de classe de résistance à la compression, de sorte que la résistance caractéristique à la compression souhaitée soit clairement définie.

La classe de résistance à la compression (A) est indépendante de la classe de résistance à la compression minimum qui est indiquée implicitement comme exigence de durabilité complémentaire lors de la prescription de la classe d'environnement ou d'exposition.

La **durabilité** souhaitée doit être spécifiée en fonction du domaine d'utilisation (B1) et de la classe d'environnement (B2) ou d'exposition. Le domaine d'utilisation indique si le béton est armé (BA), non armé (BNA) ou précontraint (BP).

Le béton est considéré comme durable lorsqu'il résiste de manière suffisante à l'environnement auquel il est exposé. La NBN EN 206-1 (Tableau 1) définit différentes classes d'exposition, en fonction du mécanisme de dégradation du béton. Elles sont toutes désignées par la lettre **X**, suivie d'une lettre qui se réfère au mécanisme de dégradation considéré (et d'un chiffre) :

- **C** de « Carbonatation » ;
- **D** de « Deicing salt » (sel de déverglaçage) ;
- **S** de « Seawater » (eau de mer) ;
- **F** de « Frost » (gel) ;
- **A** de « environnement Agressif ».

La NBN B 15-001 quant à elle définit 13 classes d'environnement. Celles-ci sont désignées par la lettre **E** de « Environment » suivie d'une des lettres **I** pour « Intérieur », **E** pour « Extérieur », **S** pour « Sea » ou **A** pour « Agressif » et éventuellement d'un chiffre. Ces environnements sont courants en Belgique et s'appliquent généralement aux pratiques belges en matière de béton. Pour chaque classe d'environnement, le Tableau 1a de la NBN B 15-001 détermine les différentes classes d'exposition entrant en ligne de compte.

La **consistance** souhaitée est désignée par une classe de consistance. La norme NBN EN 206-1 définit quatre types de classes de consistance en fonction de la méthode utilisée pour mesurer cette propriété. Les deux types de classes les plus utilisées sont :

- Classes d'affaissement, S1 à S5, déterminées par la mesure de l'affaissement au cône d'Abrams ou « Slump » ;
- Classes d'étalement, F1 à F6, déterminées par la mesure de l'étalement à la table à secousses ou « Flow ».

La **dimension nominale maximale des granulats** (D_{max}) doit être spécifiée. Il s'agit de la valeur supérieure (D) d'un calibre normalisé (d/D). Les calibres sont définis dans la norme NBN EN 12620+A1 [66].

En plus des exigences de base, pour des constructions spécifiques, des **exigences complémentaires** peuvent être imposées. Celles-ci peuvent avoir trait, entre autres :

- à la composition (ex. : type de ciment, ...) ;
- au béton frais (ex. : ajout d'adjuvants, ...) ;
- à la mise en œuvre (ex. : pompage, ...) ;
- au béton durci (ex. : étanchéité à l'eau accrue, résistance à l'usure, ...).

7.3 Exigences en matière de durabilité pour les classes d'exposition et d'environnement

Le concept de « **Type de béton** » est utilisé pour déterminer la relation entre les exigences de durabilité pour les 18 classes d'exposition et les exigences relatives à la composition du béton.

Un « type de béton » se définit comme une combinaison spécifique des exigences de durabilité suivantes :

- Le **rapport maximal eau/ciment** (E/C max) : il exprime la relation entre la teneur en eau efficace présente dans le béton frais et la teneur en ciment ;
- Le **dosage minimal en ciment** (C_{min}) ;
- La classe minimale de résistance à la compression du béton : cette exigence est complémentaire aux deux premières ci-dessus ;
- La teneur minimale en air dans le béton (éventuellement).

Un type de béton se désigne par la lettre T, suivi d'un nombre se référant au rapport maximal eau/ciment et, le cas échéant, de la lettre A (pour « Air entraîné ») lorsque la teneur en air minimale dans le béton est spécifiée. On identifie 10 types de béton (voir Tableau F.1 de la NBN B 15-001).

A chaque classe d'exposition correspondent des exigences de durabilité, exprimées sous la forme d'un type de béton sélectionné et éventuellement d'exigences complémentaires. Les différentes exigences de durabilité sont reprises au Tableau F.2 de la NBN B 15-001.

7.4 Les différents types de béton de la recherche

Lors de la confection d'un béton, le choix du rapport Eau/Ciment (E/C max) et de la quantité de ciment (C_{min}) est donc relié aux exigences en matière de durabilité et de résistance en compression spécifiées pour le béton.

Lors de la présente recherche, trois types de béton ont été choisis, confectionnés (Tâche 6.1) et étudiés au niveau de leurs performances mécaniques (Tâche 6.2) et de durabilité (Tâche 6.3). Il s'agit de bétons de type T(0,45), de type T(0,55) et de type T(0,50). Les caractéristiques visées pour chacun d'eux sont rappelées au Tableau 7-1.

Caractéristiques	Béton de type 1	Béton de type 2	Béton de type 3
Désignation	T(0,45)	T(0,55)	T(0,50)
Ciment [kg/m ³]	340	300	320
Rapport E/C [kg/kg]	0,45	0,55	0,50
Classe de résistance	C35/45	C25/30	C30/37
Classe d'environnement	EE4 Gel et agents de déverglaçage	EE2 Gel, mais pas de contact avec la pluie	EE3 Gel et contact avec la pluie (sans sels)
Classe d'exposition	XC4, XD3, XF4	XC3, XF1	XC4, XF1
Classe de consistance	S3	S4	S3 – S4
Dimension maximale des granulats	D ₂₀	D ₂₀	D ₂₀

Tableau 7-1 – Caractéristiques des trois types de béton confectionnés à la Tâche 6

Les trois types de bétons constitués des ciments industriels de référence et des nouveaux ciments K-V-L (sélectionnés et confectionnés à la Tâche 3) ont été caractérisés en ce qui concerne :

- Leurs propriétés à l'état frais : la consistance (affaissement au cône d'Abrams), la masse volumique et la teneur en air ;
- Leurs propriétés mécaniques à l'état durci : la prise, la résistance à la compression, la résistance à la flexion, résistance à la traction par fendage, le module d'élasticité, le retrait et le fluage ;
- Leur durabilité : la résistance à la carbonatation, la résistance aux cycles de gel-dégel (avec et sans sels de déverglaçage), la résistance à la diffusion des chlorures, la résistance aux attaques sulfatiques, l'absorption d'eau et la perméabilité à l'air.

Par ailleurs, de manière à évaluer l'aptitude à l'emploi des nouveaux ciments en application béton, les différents critères d'évaluation de la norme NBN B 15-100 [19] et ceux de la norme en révision [37] ont été analysés en comparant les performances mécaniques et de durabilité des bétons (mortiers) de référence à base des ciments industriels avec celles des bétons (mortiers) à base des ciments ternaires. Les résultats de ces analyses sont repris au Tableau 6-29 de la Tâche 6.2 et au Tableau 6-24.

7.5 Les règles technologiques des nouveaux ciments

En vue d'établir des règles technologiques, les différents résultats relatifs à la spécification d'un béton, obtenus aux tâches 5, 6 et 7, ont été rassemblés dans un tableau récapitulatif en intégrant également les critères d'évaluation de la NBN B 15-100.

En se basant sur les résultats obtenus avec une cure de 91 jours (une bonne cure), le Tableau 7-2 reprend :

- la classe de consistance,
- la classe de résistance,
- les domaines d'application potentiels en termes de classe d'environnement de la NBN B 15-100 [19].

Ainsi, l'analyse de ce tableau fait apparaître plusieurs règles importantes en ce qui concerne les ciments ternaires CEM v2 :

- Les **classes de consistance** visées S3 (béton de type 1), S4 (béton de type 2) et S3-S4 (béton de type 3) ont été atteintes grâce à l'utilisation d'un superplastifiant à base d'éther polycarboxylique (PCE). Le dosage en SP des bétons à base des nouveaux ciments ternaires restent dans la gamme des dosages des bétons confectionnés avec les ciments de référence. Les ciments K-V-L sont tout de même plus sensibles que les ciments K-S-L.
- Les **classes de résistance** visées ont pu être obtenues avec le ciment CEM 1 seulement (béton de type 1).
- Il est à noter que pour la **carbonatation** en particulier, les résultats ont été comparés au béton à base de CEM I comme demandé dans la norme NBN B 15-100 [19], qui est très résistant à la carbonatation, comme les résultats l'indiquent. Pour rappel, le béton de type 1 à base de CEM I 52,5 R HES n'a pas carbonaté du tout. Si on prend le béton à base de CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N comme référence, les bétons de type 1 et de type 2 à base de CEM 1 [30V 65K 5L] satisfont au critère.
- Mis à part la carbonatation, les bétons à base des ciments à haute teneur en cendres volantes CEM 1 [30V 65K 5L] et à haute teneur en filler calcaire CEM 6 [20V 50K 30L] pourraient être utilisés pour la **classe d'environnement EE3** vu que ces ciments ternaires K-V-L résistent mieux au gel interne que le béton de référence.
- Concernant la **classe d'environnement EE4**, les bétons à base des nouveaux ciments ternaires à haute teneur en cendres volantes, CEM 1 [30V 65K 5L], et à haute teneur en filler calcaire, CEM 3 [30V 45K 25L] et CEM 6 [20V 50K 30L], présentent une bonne résistance à la pénétration des chlorures. Il aurait été intéressant de réaliser l'essai de gel avec sels de déverglaçage sur un béton de référence à base d'un CEM III/A.

Il faut toutefois faire une remarque importante en ce qui concerne la **cure** des bétons. Etant donné que les ciments CEM-v2 sont des ciments ternaires à relativement faible teneur en clinker, il a été décidé d'opter pour une longue cure de 91 jours sous eau en ce qui concerne les essais de durabilité. Une mauvaise cure de 28 jours en chambre climatique a également été appliquée pour certaines compositions afin de voir son influence.

Sur base des résultats de l'évolution des résistances en compression et de la détermination du rapport r ($r = f_{cm2}/f_{cm28}$) en Tâche 6, il apparaît que tous les bétons présentent une évolution de résistance dite « moyenne » ou « rapide », selon les catégories définies dans la norme NBN B 15-400 [67].

Cependant, par mesure de sécurité, nous recommandons d'appliquer la classe de cure la plus lente définie dans la norme NBN B 15-400 pour l'utilisation de ces nouveaux ciments ternaires en application béton.

Quelques **pistes d'amélioration** possibles pour l'utilisation de ces ciments ternaires K-V-L sont proposées ci-dessous, en fonction des classes d'environnement :

- Si la résistance au jeune âge est critique, il est bon de réduire la teneur en cendres volantes. En effet, par rapport au laitier, le développement de la résistance des ciments à base de cendres volantes est encore plus lent (résistances à 2 et à 7 jours). Il est également possible d'utiliser des accélérateurs de prise pour compenser cette plus faible résistance au jeune âge [46].
- Au niveau de la formulation du béton :
 - Un rapport E/C trop élevé est à éviter.
 - Une granulométrie contenant plus de fines est favorable pour les propriétés mécaniques.
- Une cure adéquate et prolongée est essentielle pour garantir les bonnes performances du béton, surtout que ces ciments sont plus sensibles à la cure que le ciment Portland.
- Une épaisseur suffisante d'enrobage permet de prévenir de manière efficace le risque de corrosion.
- L'usage d'un agent entraîneur d'air afin d'obtenir un système de vides adéquat permet d'améliorer la résistance au gel-dégel avec sels de déverglaçage. Il pourrait néanmoins exister quelques problèmes de compatibilité avec les cendres volantes à cause de leur teneur en carbone [45, 48].

Il est important de garder en tête que les cendres volantes sont des sous-produits industriels qui entraînent donc une importante variabilité des caractéristiques (encore plus que le laitier de haut-fourneau) [45].

Pour rappel, nous insistons sur le fait que ces conclusions sont valables en premier lieu pour les choix réalisés dans cette étude (matériaux, formulations, cures, méthodes d'essais, etc.). Il n'est pas opportun de généraliser.

Classe environnement	Béton	Ciment	Classe de résistance	Classe de consistance	Méthode d'essai (Tableau 5 de la NBN B 15-100)			
					Béton de référence : à base de CEM I*			
					Carbonatation	Gel interne	Gel avec sels	Diffusion des chlorures
EE4	TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	C50/60	S3	réf / -	réf	réf / -	réf
		CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	C30/37	S3	- / réf	-	- / réf	-
		CEM II/B-V 32.5 R	C35/45	S3	-	-	-	-
		CEM 1 [30V 65K 5L]	C40/50	S3	O* / X	ND	O* / X	X
		CEM 3 [30V 45K 25L]	C16/20	S3	O	ND	O	X
		CEM 6 [20V 50K 30L]	C20/25	S3	O	ND	O	X
		CEM 10 [10V 55K 35L]	C25/30	S3	O	ND	O	O
		CEM 6 FI [20V 50K 30L]	C20/25	S3	O	ND	O	O
EE2	TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	C45/55	S4	réf / -	réf		
		CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	C20/25	S4	- / réf	-		
		CEM II/B-V 32.5 R	C25/30	S4	-	-		
		CEM 1 [30V 65K 5L]	C20/25	S4	O* / X	ND		
		CEM 3 [30V 45K 25L]	-	S4	O	ND		
		CEM 6 [20V 50K 30L]	C12/15	S4	O	ND		
		CEM 10 [10V 55K 35L]	C12/15	S4	O	ND		
		CEM 6 FI [20V 50K 30L]	-	S4	O	ND		
EE3	TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	C50/60	S3 – S4	réf	réf		
		CEM 1 [30V 65K 5L]	C25/30	S3 – S4	O*	X		
		CEM 6 [20V 50K 30L]	C16/20	S3 – S4	O*	X		

Tableau 7-2 – Domaines d'application des ciments CEM v2 pour la confection de bétons en fonction des différentes classes d'environnement de la norme NBN B 15-100

Classe de résistance visée atteinte – Classe de résistance visée non atteinte

X : ciment pouvant être utilisé – O : critère de la NBN B 15-100 non respecté – ND : non déterminé

O : critère non respecté à cause du choix du béton de référence (CEM I)*

CONCLUSIONS GÉNÉRALES

Au vu de la finesse suffisante des constituants des ciments de laboratoire, il ne s'est pas avéré nécessaire de les broyer davantage.

La valeur visée de 3,00% de sulfates pour l'élaboration des ciments de laboratoire est globalement bien respectée comme le montre les analyses chimiques. Une méthode de mélange a notamment été mise au point afin d'optimiser l'homogénéité des ciments de laboratoire. Les finesses des différents ciments sont suffisamment proches que pour limiter l'influence de ce paramètre sur le comportement des ciments étudiés.

Trois cendres volantes ont été étudiées dans le cadre de ce projet dont deux de combustion classique et une de co-combustion. Il s'agit de cendres silico-alumineuses.

La finesse accrue de la cendre volante permet d'augmenter sensiblement les performances des ciments dans lesquels elle est utilisée comme mis en évidence par un broyage plus poussé de la cendre volante de combustion CV1. L'analyse chimique et minéralogique des cendres volantes ont permis de montrer qu'elles ont également une influence non négligeable sur la réactivité des cendres.

Les trois cendres volantes étudiées donnent des résultats très proches. La cendre la plus performante est la cendre de combustion CV2 suivie par la cendre de co-combustion CVco1. Cela est notamment dû à leur finesse un peu plus élevée, à leurs teneurs en silice et chaux réactives plus élevée et leur teneur en phase amorphe plus importante.

La **calorimétrie Langavant** montre un ralentissement et une nette diminution des quantités de chaleur dégagée avec une diminution de la teneur en clinker. Le filler calcaire ne semble pas avoir un impact plus marqué que les cendres volantes.

Cette étude a mis en évidence l'apport bénéfique aux **résistances mécaniques** sur mortier des **cendres volantes** à long terme. Cet effet commence à être observé à partir de 28 jours mais dans une moindre mesure qu'avec les ciments à base de laitier du projet CEMCALC I. C'est à 91 jours que l'influence bénéfique des cendres volantes est plus marquée et permet de compenser une grande teneur en filler calcaire. Le fait que les ciments à base de cendre volante sont plus lents mène à ce que plusieurs des compositions étudiées dans le cadre de CEMCALC II ne répondent pas à tous les critères de classe de résistance contrairement aux ciments de CEMCALC I. La composition 30V 35K 35L ne répond ni aux critères à 2 jours ni à 28 jours. Dans le cas des compositions, 30V 45K 25L, 20V 50K 30L (répond aux critères 32,5 pour CEMco1 et CEMv2), 20V 40K 40L et 10V 45K 45L, seul le critère à 28 jours n'est pas atteint.

Les résultats obtenus montrent que les résistances des ciments riches en cendre volante rejoignent les résistances des ciments plus riches en clinker voire les dépassent à partir de 91 jours. Cela explique donc que plusieurs d'entre eux ne rentrent pas dans les critères de classe de résistance qui sont définis à 2, 7 et 28 jours. Ces ciments pourraient donc toutefois

convenir pour des applications où l'acquisition de résistances élevées plus tardive n'est pas un problème.

Généralement la diminution des **temps de prise** avec la teneur en cendre volante est bien mise en évidence. Par contre, il n'y a pas de nette tendance observée concernant l'influence du filler calcaire sur les temps de prise.

Le présent travail a montré que l'emploi de teneurs importantes en **filler calcaire** dans les ciments ne provoque pas de risque d'expansion selon la mesure de stabilité Le Châtelier. Il diminue légèrement la consistance (demande en eau) car il présente un pouvoir fluidifiant sur la pâte interstitielle.

La **composition du filler** n'a pas montré d'influence sur le comportement du ciment le contenant (phase mortier). Seule une légère accélération du dégagement de chaleur a été observée pour le filler impur issu du concassage. Alors que le filler pur est composé exclusivement de calcite, le filler impur est constitué de calcite, dolomite, quartz et minéraux argileux. Ces derniers sont présents dans la fraction 2-63 μm , sous forme d'illites et de chlorites. L'interprétation croisée des résultats obtenus lors des analyses granulométriques par tamisage, par diffraction laser et par analyse d'images, indique que le filler impur est caractérisé par une distribution en particules plus serrée que le filler pur : il possède moins de petites et de grosses particules. Par ailleurs, l'analyse morphométrique a montré le caractère plus allongé des particules du filler pur.

L'**activation des cendres volantes** au moyen de CaSO_4 , Na_2SO_4 et NaOH a été étudiée sur deux ciments ternaires (CEM 1 et CEM 12) riches en cendres volantes (30%). Sans ajout d'activateur, on remarque que les résistances mécaniques du mortier réalisé avec le ciment CEM 1 sont supérieures à celles obtenues avec le ciment CEM 12. Cela peut être expliqué par la substitution d'une partie du clinker par du filler calcaire, dans ce dernier. L'ajout de Na_2SO_4 augmente la résistance mécanique des mortiers, et ce, de manière plus sensible dans le cas du ciment CEM 12. Les mauvais résultats obtenus lors de l'utilisation des activateurs CaSO_4 et NaOH pourraient être causés par leur trop haute teneur. En effet, on peut observer la diminution des résistances mécaniques avec l'augmentation des teneurs en activateurs, à l'inverse de ce qui se produit dans le cas de Na_2SO_4 . On peut donc en déduire que l'optimum de concentration n'est pas encore atteint en ce qui concerne Na_2SO_4 , et est déjà passé dans le cas de l'anhydrite (CaSO_4) et du NaOH . La perte des résistances mécaniques due à la présence d'activateur CaSO_4 et NaOH est moindre dans le cas du ciment riche en cendre et filler calcaire (CEM 12 : 30V 35K 35L) que dans le cas du ciment riche en cendre et pauvre en filler (CEM 1 : 30V 65K 5L).

L'étude de la **compatibilité entre les ciments et les superplastifiants** a montré que la plupart des nouveaux ciments ternaires K-V-L ne présentent pas de problème avec les superplastifiants testés (PCE et NAF). Ces conclusions se basent sur les mesures de temps de prise de mortiers à base de ciments ternaires et avec deux types de superplastifiants réalisées.

Les **sables et granulats** entrant dans la composition des bétons ont été choisis et caractérisés, en ce qui concerne leur masse volumique réelle, leur coefficient d'absorption en eau et leur granulométrie par tamisage. Ces résultats ont permis de déterminer le squelette granulaire de ces bétons, en se basant sur les fuseaux granulaires définis dans la norme NBN EN 480-1.

Ensuite, les **formulations des deux types de bétons** utilisés pour la première biennale ont été calculées. Ces deux types de béton ont des caractéristiques proches de ceux de la recherche « CEM X » (béton de type 1 : E/C de 0,45 et 340 kg/m³ de ciment – béton de type 2 : E/C de 0,55 et 300 kg/m³ de ciment).

La seconde année du projet s'est principalement axée sur la confection de l'ensemble des bétons de référence et des bétons avec les nouveaux ciments ternaires ainsi que sur la réalisation des études comparatives de performances mécaniques et de durabilité.

Les **performances mécaniques** sur mortier et sur béton des nouveaux ciments ternaires décroissent avec une diminution de la teneur en clinker. Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires présentent un bon comportement en retrait et en fluage (NBN B15-100).

Les nouveaux ciments ternaires répondant à des critères de **classe de résistance** sur mortier (NBN EN 197-1) ne répondent pas tous aux critères de classe de résistance sur béton (NBN EN 206).

Les **performances de durabilité** des bétons à base des nouveaux ciments ternaires dépendent des teneurs en clinker [K], filler calcaire [L] et cendres volantes [V]. Une teneur élevée en cendres volantes [V] est bénéfique pour la résistance au gel/dégel interne, à la diffusion des chlorures et aux attaques sulfatiques à 20°C (NBN B 15-100).

Les mesures de **perméabilité** des bétons ont mis en évidence des coefficients de perméabilité comparables aux ciments industriels couramment utilisés. Le béton riche en filler et pauvre en cendre volante (CEM 10 : 10V 55K 35L) a cependant montré une perméabilité plus importante. Les bétons de type 1 soumis à une bonne cure entrent dans la catégorie de bétons de durabilité « très élevée ». Dans le cas d'une mauvaise cure, les coefficients de perméabilité de ces bétons sont de 5 à 10 fois plus importants. Les bétons de type 2, suite à leur teneur en ciment plus petite et leur rapport E/C plus élevé, ont des coefficients de perméabilité plus grand excepté pour la composition riche en cendre et à teneur en filler intermédiaire (CEM 3 : 30V 45K 25L).

La présence du **filler impur** étudié a une influence négative sur les propriétés du béton frais mais généralement pas sur les propriétés mécaniques et de durabilité.

Les **ciments ternaires à base de laitier** [S] sont plus performants que ceux à base de cendres volantes [V] au niveau des propriétés mécaniques et de durabilité.

Les nouveaux ciments ternaires [S/V K L] seraient indiqués pour des éléments/structures requérant une faible chaleur d'hydratation, des bétons non armés et pour résister à des environnements suflatés à 20°C à condition que la **cure la plus lente** soit appliquée.

Les ciments qui répondent aux critères de la **NBN EN 197-1** ne répondent pas forcément à ceux sur béton de la **NBN B 15-100**. En fonction des applications, l'utilisation de ces ciments ternaires requiert des dispositions particulières.

BIBLIOGRAPHIE

Introduction – Chapitre 3

[i] Prestandardisation Research « CEM X program », *Development of new Ternary Cements with reduced Clinker content*, CRIC - Lafarge, 2009-2010.

[ii] Norme EN 197-1 Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères des conformités des ciments courants, 2011.

[iii] Norme EN 450-1 Cendres volantes pour béton - Partie 1: Définition, spécifications et critères de conformité, 2012.

[iv] PANDEY V.C. & SINGH N., Impact of fly ash incorporation in soil systems, *Agriculture, Ecosystems and Environment* n°136 (1-2), pp. 16-27, 2010.

[v] HOWER J.C., Petrographic examination of coal-combustion fly ash, *International Journal of Coal Geology* n°92, pp. 90-97, 2012.

[vi] MEIJ R. & TE WINKEL H., The emission of heavy metals and persistent organic pollutants from modern coal-fired power stations, *Atmospheric Environment* n°41, pp. 9262-9272, 2007.

[vii] NORME EN 196-6 Méthodes d'essai des ciments - Partie 6: Détermination de la finesse, 2010.

[viii] NORME EN 932-2 Essais pour déterminer les propriétés générales des granulats - Partie 2: Méthodes de réduction d'un échantillon de laboratoire, 1999.

[ix] BRUNAUER S., EMMETT P.H. & TELLER E., *J. Am. Chem. Soc.* n°60 (2), pp 309–319, 1938.

[x] NORME EN 196-2 Méthodes d'essais des ciments - Partie 2: Analyse chimique des ciments, 2013.

[xi] NORME EN 451-1 Méthode d'essai des cendres volantes - Partie 1 : détermination de la teneur en oxyde de calcium libre, 2004.

[xii] CEN/TR EN 196-4 Methodes D'essais Des Ciments - Partie 4 : Determination Quantitative Des Constituants, 2009.

[xiii] NORME NBN 589-207 Essais des sables de construction - Teneur en matières organiques, 1969.

[xiv] NORME EN 196-9 Méthodes d'essai des ciments - Partie 9 : chaleur d'hydratation - Méthode semi-adiabatique, 2010.

[xv] MORENO N., QUEROL X., PLANA F., ANDRES J.M., JANSSEN M., NUGTEREN H., JANSSEN-JURKOVICOVA M. & JONES R., Physico-chemical characteristics of European pulverized coal combustion flyashes, *Fuel* 84, pp. 1351-1363, 2005.

[xvi] NBN B12-110 Ciments Portland à haute résistance initiale (HES), 2002.

[xvii] Technologie du béton, Groupement Belge du Béton, 2006.

[xviii] TIRUTA-BARNA L., RAKOTOARISOA Z. & MEHU J., 2006, Assessment of multi-scale leaching behaviour of compacted coal fly ash, *Journal of Hazardous Materials B137*, pp. 1466-1478.

[xix] L'utilisation des cendres volantes dans le béton, 2014, <http://doc.lerm.fr/lutilisation-cendres-volantes-beton/>.

[xx] NORME EN 196-3 Méthodes d'essais des ciments - Partie 3 : détermination du temps de prise et de la stabilité, 2009.

[xxi] NORME EN 196-1 Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : détermination des résistances mécaniques, 2005.

Chapitre 4

Références bibliographiques en pied de page.

Chapitre 5 – Conclusions Générales

- [1] NBN EN 480-2, «Adjuvants pour béton, mortiers et coulis - Méthodes d'essai - Partie 2 : Détermination du temps de prise,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2006.
- [2] NBN EN 480-1, «Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essai - Partie 1 : Béton et mortier de référence pour essais,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2014.
- [3] NBN EN 413-2, «Ciment à maçonner - Partie 2 : Méthodes d'essai,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2005.
- [4] NBN EN 197-1, «Ciment - Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2011.
- [5] TRA 500, «Adjuvants, conformes à la norme NBN EN 934-2,» *BE-CERT*, 31/07/2014.
- [6] Circulaire 5024 H 2013/1345, «Modifications et amendements au TRA 500,» *BE-CERT*, 06/12/2013.
- [7] NBN EN 934-2, «Adjuvants pour bétons, mortier et coulis - Partie 2 : Adjuvants pour béton - Définitions, exigences, conformité, marquage et étiquetage,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2012.
- [8] NBN EN 12350-2, «Essai pour béton frais - Partie 2 : Essai d'affaissement,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2009.
- [9] NBN EN 12350-6, «Essai pour béton frais - Partie 6 : Masse volumique,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2009.
- [10] NBN EN 12350-7, «Essai pour béton frais - Partie 7 : Teneur en air - Méthode de la compressibilité,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2009.
- [11] NBN EN 12390-3, «Essais pour béton durci - Partie 3 : Résistance à la compression des éprouvettes,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2009.
- [12] CemCalc , «Ciments ternaires à haute teneur en calcaire et à faible teneur en laitier,» *CSTC - CRIC - ULg*, 2010 - 2012.
- [13] CemCalc I, «Derniers résultats,» *CSTC - CRIC - ULg*, 2013.

-
- [14] NBN EN 1097-6, «Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats - Partie 6 : Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient d'absorption d'eau,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2000.
- [15] NBN EN 933-1, «Essais pour déterminer les caractéristiques géométriques des granulats - Partie 1 : Détermination de la gravité - Analyse granulométrique par tamisage,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2006.
- [16] Prestandardisation Research "CEM X program", «Development of new ternary cements with reduced clinker content,» *CRIC - Lafarge*, 2009 - 2010.
- [17] NBN EN 480-1, «Adjuvants pour béton, mortier et coulis,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2007.
- [18] NBN EN 12350-2, «Essais pour béton frais - Partie 2 : Essai d'affaissement,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2009.
- [19] NBN B 15-100, «Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de ciments et d'additions de type II destinés au béton,» *Institut Belge de Normalisation (IBN)*, 2008.
- [20] NBN EN 196-1, «Méthodes d'essais des ciments - Partie 1 : Détermination des résistances mécaniques,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2005.
- [21] NBN B 15-204, «Essais des bétons - Prise,» *Institut Belge de Normalisation (IBN)*, 1973.
- [22] NBN EN 12390-5, «Essais pour béton durci - Partie 5 : Résistance à la flexion sur éprouvettes,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2009.
- [23] NBN EN 12390-6, «Essais sur béton - Partie 6 : Détermination de la résistance en traction par fendage d'éprouvettes,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2010.
- [24] NBN B 15-203, «Essais des bétons - Module d'élasticité statique en compression,» *Institut Belge de Normalisation (IBN)*, 1990.
- [25] NBN B 15-228, «Essais des bétons - Fluage,» *Institut Belge de Normalisation (IBN)*, 1976.
- [26] NBN B 15-216, «Essais des bétons - Retrait et gonflement,» *Institut Belge de Normalisation (IBN)*, 1974.
- [27] NBN EN 206, «Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2014.
- [28] FILLTECH II, «Analyse des paramètres limitatifs d'utilisation des fillers calcaires dans un béton,» *CSTC - CTP - ULg*, 2010.
- [29] TRA 550, «Certification BENOR du béton prêt à l'emploi,» *BE-Cert*, Edition 3.1.
- [30] NBN EN 1992-1-1, «Eurocode 2 : Calcul des structures en béton - Partie 1-1 : Règles générales et règles pour les bâtiments (+A:2008),» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2005.
- [31] NBN B 15-400, «Exécution des structures en béton - Supplément national à la NBN EN 13670,» *Institut Belge de Normalisation (IBN)*, 2015.
- [32] M. C. Alonso, J. L. Garcia Calvo, M. Sanchez et A. Fernandez, «Ternary mixes with high mineral additions contents and corrosion related properties,» *Materials and Corrosion*, vol. 63, n° 112, pp. 1078 - 1086, 2012.

-
- [33] Groupement Belge du Béton (GBB), «Technologie du béton,» 2006.
- [34] NBN B 15-001, «Supplément à la NBN EN 206-1 - Béton - Spécification, performances, production et conformité,» *Institut Belge de Normalisation*, 2004.
- [35] NBN EN 13295, «Produits et systèmes de protection et de réparation des structures en béton - Méthodes d'essai - Détermination de la résistance à la carbonatation,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2004.
- [36] CEN/TS 12390-9, «Testing hardened concrete - Part 9 : Freeze-thaw resistance - Scaling,» *Comité Européen de Normalisation (CEN)*, 2006.
- [37] NBN B 15-100 , «Document de travail de la révision de la NBN B 15-100,» Version du 11/09/14.
- [38] CEN/TS 12390-11, «Essai sur béton durci - Partie 11 : Détermination de la résistance du béton à la pénétration des chlorures, diffusion unidirectionnelle,» *Comité Européen de Normalisation (CEN)*, 2010.
- [39] CUR-Aanbeveling 48, «Gechiktheidsonderzoek van nieuwe cementen voor toepassing in beton,» *Stichting CUR, Gouda*, 1999.
- [40] NBN B 15-215, «Essais des bétons - Absorption d'eau par immersion,» *Institut Belge de Normalisation (IBN)*, 1989.
- [41] AFGC-AFREM, «Conception des bétons pour une durée de vie donnée des ouvrages,» 2004.
- [42] V. Pollet, B. Doms et G. Mosselmans, «Prévention de la corrosion des armatures par carbonatation du béton,» *CSTC-Contact n°15*, 2007.
- [43] V. Pollet, B. Doms et G. Mosselmans, «Corrosion des armatures induite par la carbonatation du béton : comment s'en prémunir ?,» *Dossier du CSTC n°2007/3.2*, 2007.
- [44] NBN EN 14630, «Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesure de la profondeur de carbonatation d'un béton armé par la méthode phénolphtaléine,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2007.
- [45] A. Neville, *Properties of concrete*, 5th éd., London: Pearson, 2011.
- [46] T. Michael, «Optimizing the use of fly ash in concrete,» *PCA*, 2007.
- [47] M. C. Alonso, J. L. Garcia Calvo, M. Sanchez et A. Fernandez, «Ternary mixes with high mineral additions contents and corrosion related properties,» *Materials and Corrosion*, vol. 63, n° 112, pp. 1078 - 1086, 2012.
- [48] ATILH (Association Technique de l'Industrie des Liants Hydrauliques), *La durabilité des bétons : Bases scientifiques pour la formulation de bétons durables dans leur environnement*, Paris: Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2008.
- [49] Gel-dégel, «Critères pour la résistance au gel-dégel du béton,» *CSTC - CRIC - CRR*, 2010 - 2012.
- [50] CEN/TR 15177, «Testing the freeze-thaw resistance of concrete - Internal structural damage,» *Comité Européen de Normalisation (CEN)*, 2006.

-
- [51] J.-P. Charron, *Cours CIV6505 : Technologie du béton*, Ecole Polytechnique de Montréal, 2009.
- [52] NBN EN 14629, «Produits et systèmes pour la protection et la réparation des structures en béton - Méthodes d'essais - Mesurage du taux de chlorure d'un béton durci,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2007.
- [53] S. Gystad Ytterdal, «The effect of fly ash and ggbfs as cement replacement on chloride binding and ingress in mortar samples,» NTNU, Trondheim, Juin 2014.
- [54] M. Saillio, V. Varoghel-Bouny et F. Barberon, «Chloride binding in sound and carbonated cementitious materials with various types of binder,» *Construction and Building Materials*, vol. 68, pp. 82 - 91, 2014.
- [55] O. Kayali, M. Khan et M. Sharfuddin Ahmed, «The role of hydrotalcite in chloride binding and corrosion protection in concretes with ground granulated blast furnace slag,» *Cement & Concrete Composites*, vol. 34, pp. 936 - 945, 2012.
- [56] NT BUILD 443, «Concrete, hardened : accelerated chloride penetration,» *NORDTEST*, 1995.
- [57] Le Roux, A; Orsetti, S, «Les réactions sulfatiques : conditions de formation, structure et expansion des minéraux secondaires sulfatés,» *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées*, n° 1225, pp. 41-50, 2000.
- [58] AFGC - RGC&U, GrandDuBé : Grandeurs associées à la durabilité des bétons, Paris: Presses de l'école nationale des Ponts et chaussées, 2007.
- [59] Attaques sulfatiques, «Prestatiegericht ontwerp van beton, blootgesteld aan chemische aantasting,» *CSTC - CRIC*, 2005 - 2007.
- [60] DIVET Loïc, CHAUSSADENT Thierry, LAVAUD Stéphane, DESRUES Béatrice, COLAS Jérémy, «Perspectives de valorisation de granulats riches en sulfates dans les bétons du futur tunnel de base de la ligne ferroviaire Lyon-Turin,» chez *16e édition des Journées scientifiques du Regroupement Francophone pour la Recherche et la Formation sur le Béton (RF)²B*, Lausanne, 2015.
- [61] NBN B 15-215, «Essais des bétons - Absorption d'eau par immersion,» *Institut Belge de Normalisation (IBN)*, 1989.
- [62] C. Ployaert, «Durabilité des bétons par la maîtrise de l'absorption d'eau,» Febelcem, Bruxelles, 2009.
- [63] G. Villain, C. Baroghel-Bouny et C. Hua, «Mesure de la perméabilité aux gaz en fonction du taux de saturation des bétons,» *Transfert dans les bétons et durabilité, Revue Française de Génie Civil*, vol. 5, pp. 251-268, 2001.
- [64] A. Bilodeau et V. M. Malhotra, «Concrete incorporating high volumes of ASTM Class F fly ashes: mechanical properties and resistance to deicing salt scaling and to chloride-ion penetration,» *Fly Ash, Silica Fume, Slag and Natural Pozzolans in Concrete*, vol. 1, n° 1ACI SP-132, pp. 319 - 349, 1992.
- [65] NBN EN 206-1, «Béton - Partie 1 : Spécification, performances, production et conformité,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2014.
- [66] NBN EN 12620+A1, «Granulats pour bétons,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2008.

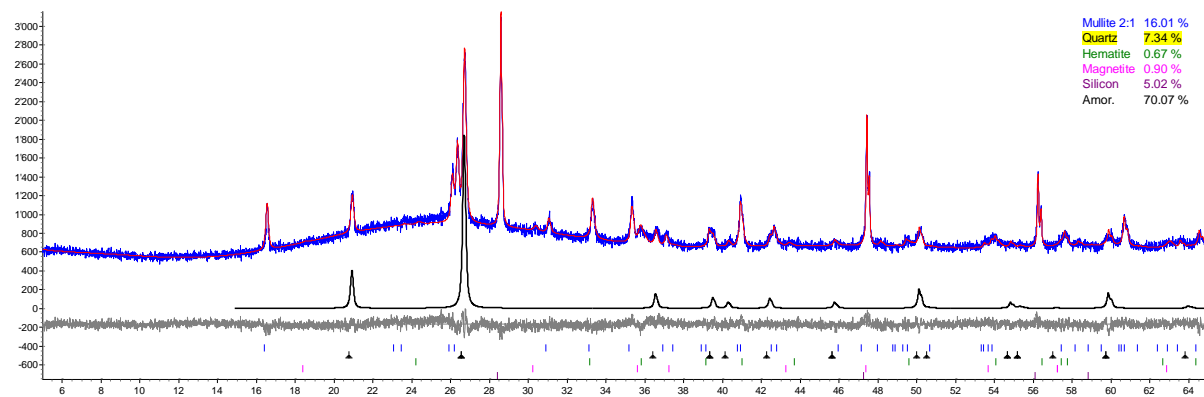
[67] NBN B 15-400, «Exécution des structures en béton - Supplément national à la NBN EN 13670 (2011),» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2015.

[68] NBN EN 480-1, «Adjuvants pour béton, mortier et coulis - Méthodes d'essai - Partie 1 : Béton et mortier de référence pour essais,» *Bureau de Normalisation (NBN)*, 2007.

ANNEXES

ANNEXE 1 : RAFFINEMENTS RIETVELD

CV1



R-Values

R_{exp} : 3.66 R_{wp} : 4.31 R_p : 3.44 GOF : 1.18
R_{exp}` : 24.07 R_{wp}` : 28.34 R_p` : 39.28 DW : 1.48

Quantitative Analysis, Wt%

	Rietveld	Spiked	Original
Amorphous content	0	70.069	73.772
1 "Mullite 2:1"	53.476	16.006	16.852
2 Quartz	24.535	7.344	7.732
3 Hematite	2.224	0.666	0.701
4 Magnetite	2.994	0.896	0.943
5 *Silicon	16.772	5.020	0.000

Background

One on X		0.002234213
Chebyshev polynomial, Coefficient	0	669.5003
	1	15.67198
	2	-67.07767
	3	43.59525
	4	37.02723
	5	-65.89911
	6	25.00868
	7	30.10182
	8	-27.9463
	9	3.607755
	10	20.51555

Instrument

Primary radius (mm)	217.5
Secondary radius (mm)	217.5
Linear PSD 2Th angular range (°)	4
FDS angle (°)	1
Beam spill, sample length (mm)	20
Intensity corrected	
Full Axial Convolution	
Filament length (mm)	12
Sample length (mm)	20
Receiving Slit length (mm)	12
Primary Soller (°)	2.5
Secondary Soller (°)	2.5

Corrections

Zero error 0.1675599
LP Factor 0

Structure 1

Phase name Mullite 2:1
R-Bragg 1.870
Spacegroup 55
Scale 0.000909989878
Cell Mass 315.892
Cell Volume (Å³) 168.88172
Wt% - Rietveld 53.476
Wt% in Spiked sample 16.006
Wt% in Original sample 16.852
Crystallite Size
Cry size Lorentzian (nm) 91.1
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 101.977
Crystal Density (g/cm³) 3.106
Preferred Orientation (Dir 1 : 2 -1 0) 1
Lattice parameters
a (Å) 7.5796085
b (Å) 7.7035479
c (Å) 2.8923116

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	2	0.00000	0.00000	0.00000	AL+3 1	0.63
s2	4	0.14900	0.34030	0.50000	AL+3 0.56 SI+4 0.25	0.68 0.68
s3	4	0.26250	0.20530	0.50000	AL+3 0.13 SI+4 0.06	0.63 0.63
s4	4	0.35900	0.42180	0.50000	O-2 1	1.06
s5	4	0.44980	0.05050	0.50000	O-2 0.19	0.93
s6	2	0.00000	0.50000	0.50000	O-2 0.39	1.56
s7	4	0.12730	0.21860	0.00000	O-2 1	1.1

Structure 2

Phase name Quartz
R-Bragg 0.800
Spacegroup 154
Scale 0.00108224033
Cell Mass 180.252
Cell Volume (Å³) 114.17648
Wt% - Rietveld 24.535
Wt% in Spiked sample 7.344
Wt% in Original sample 7.732
Crystallite Size
Cry size Lorentzian (nm) 82.4
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 94.404
Crystal Density (g/cm³) 2.622
Preferred Orientation (Dir 1 : 0 1 0) 0.8621107
Lattice parameters
a (Å) 4.9327116
c (Å) 5.4184438

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	3	0.47000	0.00000	0.66667	SI+4 1	0.56
s2	6	0.41500	0.26800	0.78600	O-2 1	0.96

Structure 3

Phase name Hematite
R-Bragg 1.325
Spacegroup 167
Scale 7.0227876e-006
Cell Mass 958.149
Cell Volume (Å³) 300.01758

Wt% - Rietveld 2.224
 Wt% in Spiked sample 0.666
 Wt% in Original sample 0.701
 Crystallite Size
 Cry size Lorentzian (nm) 40.2
 Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 1139.886
 Crystal Density (g/cm³) 5.303
 Preferred Orientation (Dir 1 : 1 0 4) 1
 Lattice parameters
 a (Å) 5.0100707
 c (Å) 13.8015660

Site	Np	x	y	z	Atom	Occ	Beq
s1	12	0.00000	0.00000	0.35530	FE+3	1	0.5
s2	18	0.30590	0.00000	0.25000	O-2	1	0.7

Structure 4

Phase name Magnetite
 R-Bragg 0.953
 Spacegroup 227:2
 Scale 2.51305401e-006
 Cell Mass 1852.301
 Cell Volume (Å³) 583.81283
 Wt% - Rietveld 2.994
 Wt% in Spiked sample 0.896
 Wt% in Original sample 0.943
 Crystallite Size
 Cry size Lorentzian (nm) 45.0
 Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 1169.468
 Crystal Density (g/cm³) 5.269
 Preferred Orientation (Dir 1 : 3 1 1) 1
 Lattice parameters
 a (Å) 8.3577853

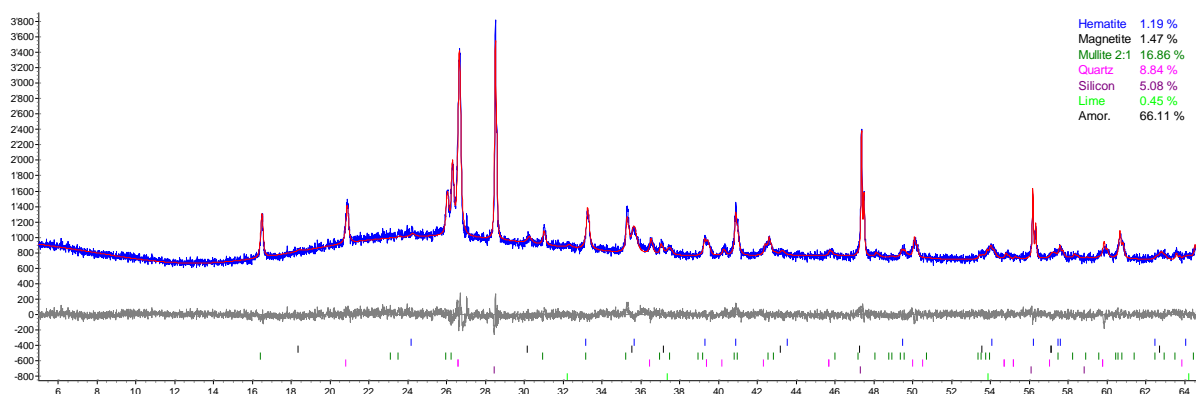
Site	Np	x	y	z	Atom	Occ	Beq
s1	8	0.12500	0.12500	0.12500	FE+3	1	0.16
s2	16	0.50000	0.50000	0.50000	FE+3	0.5	0.86
					FE+2	0.5	0.86
s3	32	0.74530	0.74530	0.74530	O-2	1	0.65

Structure 5

Phase name Silicon
 R-Bragg 2.877
 Spacegroup 227:2
 Scale 0.000422064288
 Cell Mass 224.683
 Cell Volume (Å³) 160.55760
 Wt% - Rietveld 16.772
 Wt% in Spiked sample 5.020
 Wt% in Original sample 0.000
 Crystallite Size
 Cry size Lorentzian (nm) 207.2
 Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 148.590
 Crystal Density (g/cm³) 2.324
 Preferred Orientation (Dir 1 : 1 1 -1) 1
 Lattice parameters
 a (Å) 5.4351344

Site	Np	x	y	z	Atom	Occ	Beq
s1	8	0.12500	0.12500	0.12500	SI	1	0.6

CVco1



R-Values

R_{exp} : 3.41 R_{wp} : 4.05 R_p : 3.19 GOF : 1.19
R_{exp}` : 18.40 R_{wp}` : 21.87 R_p` : 23.32 DW : 1.41

Quantitative Analysis, Wt%

	<u>Rietveld</u>	<u>Spiked</u>	<u>Original</u>
Amorphous content	0	66.105	69.646
1 Hematite	3.509	1.189	1.253
2 Magnetite	4.345	1.473	1.551
3 "Mullite 2:1"	49.735	16.858	17.760
4 Quartz	26.095	8.845	9.319
5 *Silicon	14.999	5.084	0.000
6 Lime	1.317	0.446	0.470

Background

One on X		1286.857
Chebychev polynomial, Coefficient	0	717.3501
	1	15.73533
	2	-80.01564
	3	39.26022
	4	45.00248
	5	-64.28504
	6	23.19093
	7	31.60763
	8	-34.60713
	9	11.85154
	10	18.73203

Instrument

Primary radius (mm)	217.5
Secondary radius (mm)	217.5
Linear PSD 2Th angular range (°)	4
FDS angle (°)	1
Beam spill, sample length (mm)	20
Intensity corrected	
Full Axial Convolution	
Filament length (mm)	12
Sample length (mm)	20
Receiving Slit length (mm)	12
Primary Sollers (°)	2.5
Secondary Sollers (°)	2.5

Corrections

Zero error	0.0897554
LP Factor	0

Structure 1

Phase name Hematite
R-Bragg 1.092
Spacegroup 167
Scale 1.22624595e-005
Cell Mass 958.149
Cell Volume (Å³) 301.65293
Wt% - Rietveld 3.509
Wt% in Spiked sample 1.189
Wt% in Original sample 1.253
Crystallite Size
Cry size Lorentzian (nm) 40.0
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 1133.707
Crystal Density (g/cm³) 5.274
Preferred Orientation (Dir 1 : 1 0 4) 1
Lattice parameters
a (Å) 5.0327402
c (Å) 13.7520641

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	12	0.00000	0.00000	0.35530	FE+3 1	0.5
s2	18	0.30590	0.00000	0.25000	O-2 1	0.7

Structure 2

Phase name Magnetite
R-Bragg 0.641
Spacegroup 227:2
Scale 4.03349207e-006
Cell Mass 1852.301
Cell Volume (Å³) 587.33031
Wt% - Rietveld 4.345
Wt% in Spiked sample 1.473
Wt% in Original sample 1.551
Crystallite Size
Cry size Lorentzian (nm) 45.0
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 1162.464
Crystal Density (g/cm³) 5.237
Preferred Orientation (Dir 1 : 3 1 1) 1
Lattice parameters
a (Å) 8.3745370

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	8	0.12500	0.12500	0.12500	FE+3 1	0.16
s2	16	0.50000	0.50000	0.50000	FE+3 0.5	0.86
					FE+2 0.5	0.86
s3	32	0.74530	0.74530	0.74530	O-2 1	0.65

Structure 3

Phase name Mullite 2:1
R-Bragg 1.866
Spacegroup 55
Scale 0.000944321762
Cell Mass 315.892
Cell Volume (Å³) 168.39891
Wt% - Rietveld 49.735
Wt% in Spiked sample 16.858
Wt% in Original sample 17.760
Crystallite Size
Cry size Lorentzian (nm) 107.9
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 102.269
Crystal Density (g/cm³) 3.115
Preferred Orientation (Dir 1 : 2 -1 0) 1
Lattice parameters
a (Å) 7.5700859
b (Å) 7.6993314
c (Å) 2.8892522

Site	Np	x	y	z	Atom	Occ	Beq
s1	2	0.00000	0.00000	0.00000	Al+3	1	0.63
s2	4	0.14900	0.34030	0.50000	Al+3	0.56	0.68
					Si+4	0.25	0.68
s3	4	0.26250	0.20530	0.50000	Al+3	0.13	0.63
					Si+4	0.06	0.63
s4	4	0.35900	0.42180	0.50000	O-2	1	1.06
s5	4	0.44980	0.05050	0.50000	O-2	0.19	0.93
s6	2	0.00000	0.50000	0.50000	O-2	0.39	1.56
s7	4	0.12730	0.21860	0.00000	O-2	1	1.1

Structure 4

Phase name	Quartz
R-Bragg	1.092
Spacegroup	154
Scale	0.00128317282
Cell Mass	180.252
Cell Volume (Å ³)	113.95311
Wt% - Rietveld	26.095
Wt% in Spiked sample	8.845
Wt% in Original sample	9.319
Crystallite Size	
Cry size Lorentzian (nm)	94.9
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm)	94.589
Crystal Density (g/cm ³)	2.627
Preferred Orientation (Dir 1 : 0 1 0)	0.8960728
Lattice parameters	
a (Å)	4.9288359
c (Å)	5.4163515

Site	Np	x	y	z	Atom	Occ	Beq
s1	3	0.47000	0.00000	0.66667	Si+4	1	0.56
s2	6	0.41500	0.26800	0.78600	O-2	1	0.96

Structure 5

Phase name	Silicon
R-Bragg	0.939
Spacegroup	227:2
Scale	0.000420285472
Cell Mass	224.683
Cell Volume (Å ³)	160.43073
Wt% - Rietveld	14.999
Wt% in Spiked sample	5.084
Wt% in Original sample	0.000
Crystallite Size	
Cry size Lorentzian (nm)	297.2
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm)	148.707
Crystal Density (g/cm ³)	2.326
Preferred Orientation (Dir 1 : 1 1 -1)	1
Lattice parameters	
a (Å)	5.4337024

Site	Np	x	y	z	Atom	Occ	Beq
s1	8	0.12500	0.12500	0.12500	Si	1	0.6

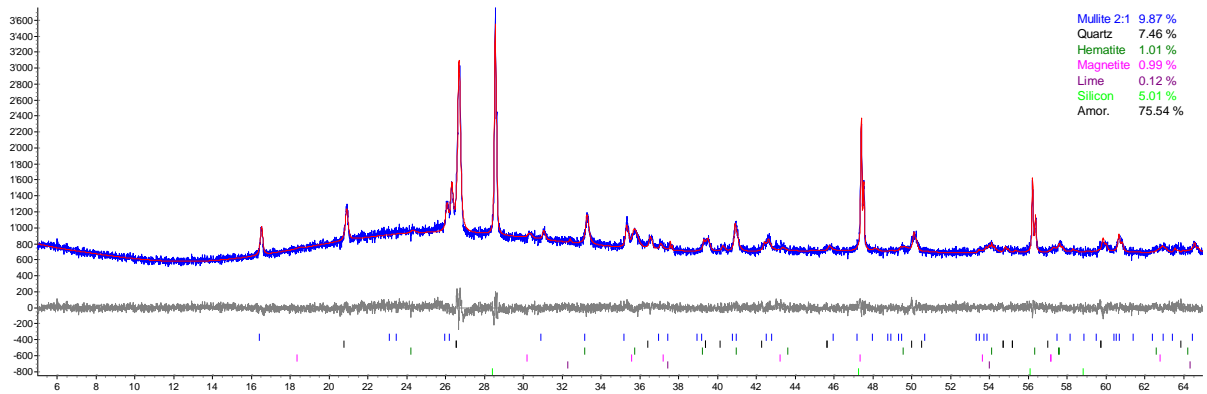
Structure 6

Phase name	Lime
R-Bragg	0.299
Spacegroup	225
Scale	5.33359339e-005
Cell Mass	224.308
Cell Volume (Å ³)	111.19044
Wt% - Rietveld	1.317

Wt% in Spiked sample 0.446
 Wt% in Original sample 0.470
 Crystallite Size
 Cry size Lorentzian (nm) 48.4
 Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 419.678
 Crystal Density (g/cm³) 3.350
 Preferred Orientation (Dir 1 : 1 0 0) 1
 Lattice parameters
 a (Å) 4.8086424

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	4	0.00000	0.00000	0.00000	CA+2 1	0.5
s2	4	0.50000	0.50000	0.50000	O-2 1	2.3

CV2



R-Values

R_{exp} : 3.56 R_{wp} : 4.13 R_p : 3.28 GOF : 1.16
R_{exp}` : 15.17 R_{wp}` : 17.59 R_p` : 17.74 DW : 1.57

Quantitative Analysis, Wt%

	<u>Rietveld</u>	<u>Spiked</u>	<u>Original</u>
Amorphous content	0	75.537	79.521
1 "Mullite 2:1"	40.338	9.868	10.388
2 Quartz	30.502	7.462	7.855
3 Hematite	4.110	1.006	1.059
4 Magnetite	4.066	0.995	1.047
5 Lime	0.505	0.123	0.130
6 *Silicon	20.479	5.010	0.000

Background

One on X		2240.723
Chebychev polynomial, Coefficient	0	600.5832
	1	121.9307
	2	-124.7757
	3	61.18122
	4	31.47148
	5	-61.42617
	6	19.45723
	7	30.32395
	8	-32.35102
	9	4.45683
	10	14.42046

Instrument

Primary radius (mm)	217.5
Secondary radius (mm)	217.5
Linear PSD 2Th angular range (°)	4
FDS angle (°)	1
Beam spill, sample length (mm)	20
Intensity corrected	
Full Axial Convolution	
Filament length (mm)	12
Sample length (mm)	20
Receiving Slit length (mm)	12
Primary Sollers (°)	2.5
Secondary Sollers (°)	2.5

Corrections

Zero error	0.135858
LP Factor	0

Structure 1

Phase name Mullite 2:1
R-Bragg 1.235
Spacegroup 55
Scale 0.000585636286
Cell Mass 315.892
Cell Volume (Å³) 168.72867
Wt% - Rietveld 40.338
Wt% in Spiked sample 9.868
Wt% in Original sample 10.388
Crystallite Size
Cry size Lorentzian (nm) 108.3
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 102.069
Crystal Density (g/cm³) 3.109
Preferred Orientation (Dir 1 : 2 -1 0) 1
Lattice parameters
a (Å) 7.5807832
b (Å) 7.7012088
c (Å) 2.8901202

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	2	0.00000	0.00000	0.00000	AL+3 1	0.63
s2	4	0.14900	0.34030	0.50000	AL+3 0.56 SI+4 0.25	0.68 0.68
s3	4	0.26250	0.20530	0.50000	AL+3 0.13 SI+4 0.06	0.63 0.63
s4	4	0.35900	0.42180	0.50000	O-2 1	1.06
s5	4	0.44980	0.05050	0.50000	O-2 0.19	0.93
s6	2	0.00000	0.50000	0.50000	O-2 0.39	1.56
s7	4	0.12730	0.21860	0.00000	O-2 1	1.1

Structure 2

Phase name Quartz
R-Bragg 0.780
Spacegroup 154
Scale 0.00114752658
Cell Mass 180.252
Cell Volume (Å³) 114.11319
Wt% - Rietveld 30.502
Wt% in Spiked sample 7.462
Wt% in Original sample 7.855
Crystallite Size
Cry size Lorentzian (nm) 91.9
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 94.456
Crystal Density (g/cm³) 2.623
Lattice parameters
a (Å) 4.9326123
c (Å) 5.4156583

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	3	0.47000	0.00000	0.66667	SI+4 1	0.56
s2	6	0.41500	0.26800	0.78600	O-2 1	0.96

Structure 3

Phase name Hematite
R-Bragg 0.766
Spacegroup 167
Scale 1.10397188e-005
Cell Mass 958.149
Cell Volume (Å³) 300.69469
Wt% - Rietveld 4.110
Wt% in Spiked sample 1.006
Wt% in Original sample 1.059
Crystallite Size
Cry size Lorentzian (nm) 40.6
Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 1137.319

Crystal Density (g/cm³) 5.291
 Preferred Orientation (Dir 1 : 1 0 4) 1
 Lattice parameters
 a (Å) 5.0214902
 c (Å) 13.7698718

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	12	0.00000	0.00000	0.35530	FE+3 1	0.5
s2	18	0.30590	0.00000	0.25000	O-2 1	0.7

Structure 4

Phase name Magnetite
 R-Bragg 0.855
 Spacegroup 227:2
 Scale 2.90064941e-006
 Cell Mass 1852.301
 Cell Volume (Å³) 585.64044
 Wt% - Rietveld 4.066
 Wt% in Spiked sample 0.995
 Wt% in Original sample 1.047
 Crystallite Size
 Cry size Lorentzian (nm) 45.1
 Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 1165.818
 Crystal Density (g/cm³) 5.252
 Preferred Orientation (Dir 1 : 3 1 1) 1
 Lattice parameters
 a (Å) 8.3664975

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	8	0.12500	0.12500	0.12500	FE+3 1	0.16
s2	16	0.50000	0.50000	0.50000	FE+3 0.5 FE+2 0.5	0.86 0.86
s3	32	0.74530	0.74530	0.74530	O-2 1	0.65

Structure 5

Phase name Lime
 R-Bragg 0.508
 Spacegroup 225
 Scale 1.57332172e-005
 Cell Mass 224.308
 Cell Volume (Å³) 110.64701
 Wt% - Rietveld 0.505
 Wt% in Spiked sample 0.123
 Wt% in Original sample 0.130
 Crystallite Size
 Cry size Lorentzian (nm) 12598828590000.0
 Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 421.739
 Crystal Density (g/cm³) 3.366
 Preferred Orientation (Dir 1 : 1 0 0) 1
 Lattice parameters
 a (Å) 4.8007958

Site	Np	x	y	z	Atom Occ	Beq
s1	4	0.00000	0.00000	0.00000	CA+2 1	0.5
s2	4	0.50000	0.50000	0.50000	O-2 1	2.3

Structure 6

Phase name Silicon
 R-Bragg 0.591
 Spacegroup 227:2
 Scale 0.000439456509
 Cell Mass 224.683
 Cell Volume (Å³) 160.49599
 Wt% - Rietveld 20.479

Wt% in Spiked sample 5.010
 Wt% in Original sample 0.000
 Crystallite Size
 Cry size Lorentzian (nm) 279.4
 Crystal Linear Absorption Coeff. (1/cm) 148.647
 Crystal Density (g/cm³) 2.325
 Preferred Orientation (Dir 1 : 1 1 -1) 1
 Lattice parameters
 a (Å) 5.4344391

Site	Np	x	y	z	Atom	Occ	Beq
s1	8	0.12500	0.12500	0.12500	SI	1	0.6

ANNEXE 2 : MASSE VOLUMIQUE RÉELLE ET COEFFICIENT D'ABSORPTION DES GRANULATS



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

CSTC - WTCB

LABO GE

Détermination de la masse volumique réelle
et du coefficient d'absorption d'eau

Demandeur : CSTC-WTCB Labo "BE"
Avenue Pierre Holoffe, 21
B - 1342 LIMELETTE

Echantillon : Sable 0/1 FFA F3a
GE 2012.22 2012-2007 2012/042/029

Procédure : NBN EN 1097-6 (2000), NBN EN 1097-6 AC (2002), NBN EN 1097-6 A1 (2006)
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats.
Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient
d'absorption d'eau.
Clause 9: Méthode au pycnomètre pour granulats compris entre 0.063 et 4 mm.

Date de l'essai : Du 29 au 31.10.2012

A. Résultats des essais

Voir page suivante

B. Dérogations à la norme

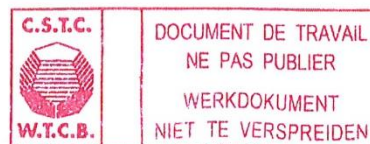
Contrairement à ce qui est mentionné dans la clause 8.3, on ajuste le niveau d'eau jusqu'au repère sur l'entonnoir.

C. Critères d'acceptation

Néant

D. Remarques

Néant



File : GE 2012.22 MDV DT sable 0-1 Masse volumique réelle+absorption (EN 1097-6)



Résultats des essais

M_1 = masse granulat saturé sans eau superficielle.

M_2 = masse pycnomètre rempli (granulats-eau)

M_3 = masse pycnomètre rempli d'eau.

M_4 = masse sèche du granulat.

P_a = masse volumique absolue = $M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))$

P_{sd} = masse volumique réelle par séchage à l'étuve = $M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

P_{sd} = masse volumique réelle saturée surface sèche = $M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

Vérification : $P_{sd} = 1 + P_a - (P_a / P_a)$

WA_{24} = coefficient d'absorption d'eau (en % de la masse sèche) après immersion pendant 24 heures.

$$WA_{24} = 100 * (M_1 - M_2) / M_4$$

Essai n°	M_1 (g)	M_2 (g)	temp. (°C)	M_3 (g)	temp. (°C)	M_4 (g)	P_{eau} (Mg/m ³)	P_a (Mg/m ³)	P_{sd} (Mg/m ³)	P_{sd} (Mg/m ³)	P_{sd} (Mg/m ³) check	WA_{24} (%)
III	1019.9	9240.8	22.0	8601.6	22.0	1019.5	0.9978	2.67	2.67	2.67	2.67	0.03
IV	1045.2	9263.4	22.0	8607.4	22.0	1044.9	0.9978	2.68	2.68	2.68	2.68	0.04
						Moyenne		2.68	2.68	2.68	2.68	0.0





CSTC - WTCB

LABO GE

Détermination de la masse volumique réelle
et du coefficient d'absorption d'eau

Demandeur : CSTC - WTCB Labo"BE"
Avenue Pierre Holoffe, 21
B - 1342 LIMELETTE

Echantillon : Sable 0/4
GE 2011.18 D 56102064 2011/40/017

Procédure :
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats.
Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient
d'absorption d'eau.
Clause 9: Méthode au pycnomètre pour granulats compris entre 0.063 et 4 mm.

*Le laboratoire GE n'est pas accrédité pour cet essai qui a été
effectué selon le Manuel de Qualité du CSTC*

Date de l'essai : Du 09 au 14.11.11

A. Résultats des essais

Voir page suivante

B. Dérogations à la norme

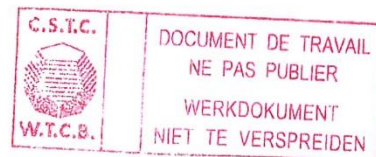
Contrairement à ce qui est mentionné dans la clause 8.3, on ajuste le niveau d'eau
jusqu'au repère sur l'entonnoir.

C. Critères d'acceptation

Néant

D. Remarques

Néant



**Résultats des essais**

M_1 = masse granulats saturés sans eau superficielle.

M_2 = masse pycnomètre rempli (granulats+eau)

M_3 = masse pycnomètre rempli d'eau.

M_4 = masse sèche du granulats.

ρ_a = masse volumique absolue = $M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))$

ρ_{ad} = masse volumique réelle par séchage à l'étuve = $M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

ρ_{sd} = masse volumique réelle saturée surface sèche = $M_1 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

Vérification : $\rho_{sd} = 1 + \rho_{ad} - (\rho_{ad} / \rho_a)$

WA_{24} = coefficient d'absorption d'eau (en % de la masse sèche) après immersion pendant 24 heures.

$WA_{24} = 100 * (M_1 - M_4) / M_4$

Essai n°	M_1 (g)	M_2 (g)	temp. (°C)	M_3 (g)	temp. (°C)	M_4 (g)	ρ_{eau} (Mg/m³)	ρ_a (Mg/m³)	ρ_{ad} (Mg/m³)	ρ_{sd} (Mg/m³)	ρ_{sd} (Mg/m³) check	WA_{24} (%)
A	987,7	9584,2	22,4	8964,6	22,8	985,0	0,9978	2,69	2,67	2,68	2,68	0,3
D	1008,8	9147,2	22,0	8517,6	22,8	1004,2	0,9978	2,67	2,64	2,65	2,65	0,5
								2,68	2,66	2,67	2,67	0,4





CSTC - WTCB

LABO GE

Détermination de la masse volumique réelle
et du coefficient d'absorption d'eau

Demander : CSTC - WTCB Labo "BE"
Avenue Pierre Holoffe, 21
B - 1342 LIMELETTE

Echantillon : Gravier 10/14
GE 2011.18 B 56102064 2011/40/013

Procédure : EN 1097-6 (Septembre 2000)
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats.
Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient
d'absorption d'eau.
Clause 8: Méthode au pycnomètre pour granulats compris entre 4 et 31,5 mm.

*Le laboratoire GE n'est pas accrédité pour cet essai qui a été
effectué selon le Manuel de Qualité du CSTC*

Date de l'essai : Du 07 au 14.11.2011.

A. Résultats des essais

Voir page suivante

B. Dérogations à la norme

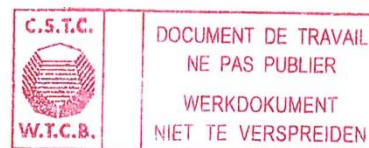
Contrairement à ce qui est mentionné dans la clause 8.3, on ajuste le niveau d'eau
jusqu'au repère sur l'entonnoir.

C. Critères d'acceptation

Néant

D. Remarques

Néant



**Résultats des essais**

M_1 = masse granulats saturés sans eau superficielle.

M_2 = masse pycnomètre rempli (granulats+eau)

M_3 = masse pycnomètre rempli d'eau.

M_4 = masse sèche du granulats.

ρ_a = masse volumique absolue = $M_4 / (M_4 - (M_2 - M_3))$

ρ_{rd} = masse volumique réelle par séchage à l'étuve = $M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

ρ_{sd} = masse volumique réelle saturée surface sèche = $M_4 / (M_1 - (M_2 - M_3))$

Vérification : $\rho_{sd} = 1 + \rho_{rd} \cdot (\rho_a / \rho_a)$

WA_{24} = coefficient d'absorption d'eau (en % de la masse sèche) après immersion pendant 24 heures.

$$WA_{24} = 100 \cdot (M_1 - M_4) / M_4$$

Essai n°	M_1 (g)	M_2 (g)	temp. (°C)	M_3 (g)	temp. (°C)	M_4 (g)	ρ_{em} (Mg/m ³)	ρ_a (Mg/m ³)	ρ_{rd} (Mg/m ³)	ρ_{sd} (Mg/m ³)	ρ_{sd} (Mg/m ³) check	WA_{24} (%)
III	2196,7	10010,2	22,0	8601,4	22,0	2174,7	0,9978	2,83	2,75	2,78	2,78	1,0
IV	2091,7	9942,6	22,0	8601,4	22,0	2071,6	0,9978	2,83	2,75	2,78	2,78	1,0
						Moyenne		2,83	2,75	2,78	2,78	1,0



DOCUMENT DE TRAVAIL
NE PAS PUBLIER
WERKDOCUMENT
NIET TE VERSPREIDEN

ANNEXE 3 : GRANULOMÉTRIE DES GRANULATS



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION

CSTC - WTCB
LABO G.E.
Analyse granulométrique d'un sable : tamisage à sec sans élimination des fines.

Demandeur: CSTC - WTCB Labo "BE"
Avenue Pierre Holoffe, 21
B - 1342 LIMELETTE

Echantillon: Sable 0/1 FFA F3a
GE 2012.22 2012-2007 2012/042/029

Procédure : NBN EN 933-1 (1997 + addendum 2006)
Caractéristiques géométriques des granulats.
Partie 1. Analyse granulométrique par tamisage.

Date de l'essai: Le 26.10.12

Méthode de tamisage utilisée: Tamisage mécanique suivi d'un tamisage manuel jusqu'au moment critique.

A. Resultats des tamisages.

Tamis I.S.O. mm	Refus cumulé				Moyenne %
	Essai I		Essai II		
	g	%	g	%	
63.00					
31.50					
25.00					
20.00					
16.00					
14.00					
12.50					
10.00					
8.000					
7.100					
6.300					
4.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
2.000	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
1.000	0.1	0.0	0.1	0.0	0.0
0.500	2.4	0.7	2.7	0.7	0.7
0.250	91.7	27.2	108.7	27.9	27.5
0.125	273.5	81.0	315.7	81.1	81.1
0.063	336.6	99.7	388.1	99.7	99.7
<0.063	337.5		389.4		
Masse sèche M ₁ (g)	338.3		389.8		
Pourcentage de fines (%)	0.5		0.4		
Perte de matière (%)	0.22		0.09		



DOCUMENT DE TRAVAIL
NE PAS PUBLIER
WERKDOKUMENT
NIET TE VERSPREIDEN

SP/GE/6 03a
GE 2012.22 MDV DT Tamisage à sec d'un sable 0-1 NBN EN 933-1(2006)



B. Dérogations à la norme.

Néant

C. Critères d'acceptation.

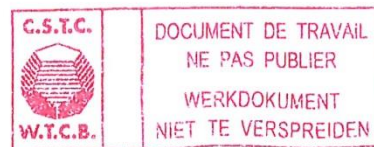
Critère	Limite	OK ?
Perte de matière.	$\leq 1.0 \%$	OK
Différence entre essai I et II	r1	OK

D. Remarques.

- Le tamisage à sec n'est pas précédé du lavage de l'échantillon.
- Les masses sont exprimées en "g" et non en "kg".
- Les différences de refus cumulé entre l'essai I et II sont inférieures à r1 pour tous les tamis jusque 4 mm. Pour les tamis avec des ouvertures plus grandes, l'expression pour r1, mentionnée dans la norme, n'est plus valable.

E. Courbe(s) granulométrique(s).

Voir feuille annexe.





CSTC - WTCB
LABO G.E.
Analyse granulométrique d'un granulat : tamisage à sec sans élimination des fines.

Demandeur: CSTC - WTCB Labo "BE"
Avenue Pierre Holoffé, 21
B - 1342 LIMELETTE

Echantillon: Sable 0/4
GE 2011.18 D 56102064 2011/40/017

Procédure : NBN EN 933-1 (1997 + addendum 2006)
Caractéristiques géométriques des granulats.
Partie 1. Analyse granulométrique par tamisage.

Date de l'essai: le 02.11.11

Méthode de tamisage utilisée: Tamisage mécanique suivi d'un tamisage manuel
jusqu'au moment critique.

A. Résultats des tamisages.

Tamis I.S.O. mm	Refus cumulé				Moyenne %
	Essai I		Essai II		
	g	%	g	%	
63,00					
31,50					
25,00					
20,00					
16,00					
14,00					
12,50					
10,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
8,000	1,1	0,2	0,00	0,0	0,1
7,100	1,1	0,2	0,00	0,0	0,1
6,300	1,1	0,2	0,00	0,0	0,1
4,000	17,2	3,2	14,08	2,6	2,9
2,000	109,7	20,7	118,42	22,1	21,4
1,000	185,0	34,9	197,30	36,9	35,9
0,500	303,0	57,1	315,12	58,9	58,0
0,250	453,5	85,5	459,90	85,9	85,7
0,125	501,4	94,5	506,21	94,6	94,5
0,063	522,2	98,4	526,37	98,3	98,4
<0.063	530,5		535,30		
Masse sèche M ₁ (g)	530,8		535,54		
Pourcentage de fines (%)	1,6		1,7		
Perte de matière (%)	0,06		0,04		





B. Dérogations à la norme.

Néant

C. Critères d'acceptation.

Critère	Limite	OK ?
Perte de matière.	$\leq 1.0 \%$	OK
Différence entre essai I et II	r1	NOK

D. Remarques

- Le tamisage à sec n'est pas précédé du lavage de l'échantillon.
- Les masses sont exprimées en "g" et non en "kg".
- Les différences de refus cumulé entre l'essai I et II sont inférieures à r1 pour tous les tamis jusque 4 mm. Pour les tamis avec des ouvertures plus grandes, l'expression pour r1, mentionnée dans la norme, n'est plus valable.

E. Type de sable selon le tableau B.1 de la EN 12620 : 2002

-A partir du pourcentage du passant au tamis de 0,500 mm.

Sable à grains fins	FP
Sable à grains moyens	MP
Sable à grains gros	CP
Type de sable :	CP/MP

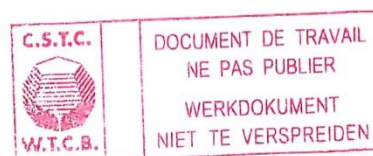
F. Type de sable selon le tableau B.2 de la EN 12620 : 2002

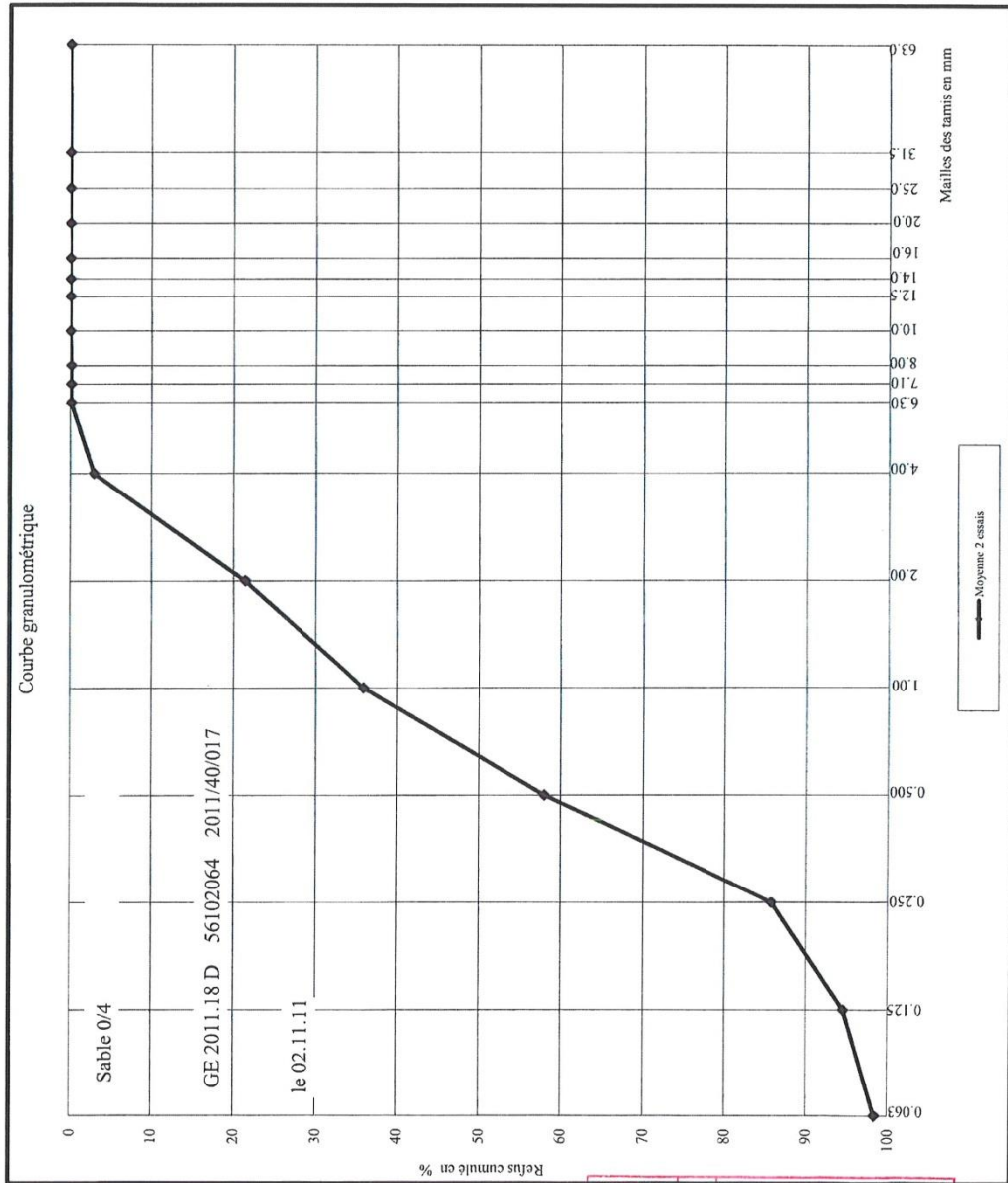
-A partir du module de finesse (FM).

Sable à grains fins	FF
Sable à grains moyens	MF
Sable à grains gros	CF
Type de sable :	CF

G. Courbe(s) granulométrique(s).

Voir feuille annexe.





DOCUMENT DE TRAVAIL
NE PAS PUBLIER
WERKDOKUMENT
NIET TE VERSPREIDEN

SP/GE/6.03a
GE.2011.18 D MDV DT Tamisage à sec d'un sable 0-4 NBN EN 933-1(2006)(+ module de finesse).xls

	CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION <small>ETABLISSEMENT RECONNU PAR APPLICATION DE L'ARRÊTÉ-LOI DU 30 JANVIER 1947</small>	 N° 042 – TEST
- Station expérimentale : B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe, 21 Tél : (32) 2 655 77 11 Fax : (32) 2 653 07 29 - Bureaux : B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg, 7 Tél : (32) 2 716 42 11 Fax : (32) 2 725 32 12 - Siège social : B-1000 Bruxelles, rue du Lombard, 42 Tél : (32) 2 502 66 90 Fax : (32) 2 502 81 80 TVA n° : BE 407.695.057 Page : 1/4		
LABORATOIRE : (GE) Géotechnique	RAPPORT D'ESSAIS	N° DE, DAT, RE : 56072081 N° Labo : GE 2009.27 N° Echantillon : 2009/040/013
DEMANDEUR : CSTC-WTCB – Labo « BE » avenue P. Holoffe, 21 B – 1342 LIMELETTE		
Personnes contactées :	- Demandeur - Madame J. Pierard	- CSTC - Madame M. De Vos
Essais effectués : Analyse granulométrique d'un granulat. Tamisage à sec		
Références : NBN EN 933-1 (1997) + addendum (2006)		
Date et référence de la demande : 2009.12.08 Date de réception de(des) échantillon(s) : 2009.12.08 Date de l'essai : 2009.12.11 et 10 Date d'établissement du rapport : 2010.03.11		
<p>Ce rapport contient 4 pages, numérotées de 1/4 à 4/4. Il ne peut être reproduit que dans son ensemble. Sur chaque page figure le cachet du laboratoire (en rouge) et le paraphe du chef de laboratoire. Les résultats et constatations ne sont valables que pour les échantillons testés.</p> <input type="checkbox"/> Pas d'échantillon <input type="checkbox"/> Echantillon(s) ayant subi un essai destructif <input checked="" type="checkbox"/> Echantillon(s) évacué(s) de nos laboratoires 60 jours calendriers après l'envoi du rapport, sauf demande écrite de la part du demandeur.		
Responsable des essais  C. Verbeke	Le Chef de laboratoire  M. De Vos, ir. 	
<i>Collaboration technique : /</i>		CV/CGO



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION



N° 042 - TEST

56072081
GE 2009.27
Page 2/4

CSTC - WTCB
LABO G.E.
Analyse granulométrique d'un granulat : tamisage à sec sans élimination des fines.

Demandeur: CSTC-WTCB Labo"BE"
Avenue Pierre Holoffe, 21
B - 1342 LIMLETTTE

Echantillon: Concassé calcaire 4/6
GE 2009.27 56072081 2009/040/013

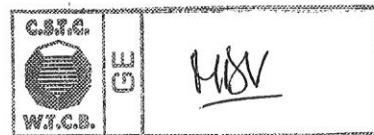
Procédure : NBN EN 933-1 (1997 + addendum 2006)
Caractéristiques géométriques des granulats.
Partie 1. Analyse granulométrique par tamisage.

Date de l'essai: Les 10 et 11.12.09

Méthode de tamisage utilisée: Tamisage mécanique suivi d'un tamisage manuel jusqu'au moment critique.

A. Resultats des tamisages.

Tamis I.S.O. mm	Refus cumulé				Moyenne %
	Essai I		Essai II		
	g	%	g	%	
63,00					
31,50					
25,00					
20,00					
16,00					
14,00					
12,50					
10,00	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0
8,000	0,00	0,0	0,84	0,1	0,1
6,300	20,44	2,8	23,48	3,3	3,0
4,000	532,23	72,9	508,52	71,4	72,2
2,000	719,26	98,6	700,82	98,4	98,5
1,000	726,27	99,5	708,22	99,5	99,5
0,500	727,28	99,7	709,26	99,6	99,6
0,250	727,89	99,8	709,84	99,7	99,7
0,125	728,22	99,8	709,99	99,7	99,8
0,063	728,32	99,8	710,15	99,7	99,8
<0.063	729,66		711,95		
Masse sèche M ₁ (g)	729,91		712,43		
Pourcentage de fines (%)	0,2		0,3		
Perte de matière (%)	0,03		0,07		



SP/GE/6.03a
GE 2009 27 MDV Tamisage à sec d'un concassé 4-6 mm NBN EN 933-1 (2006)



B. Dérogations à la norme.
Néant

C. Critères d'acceptation.

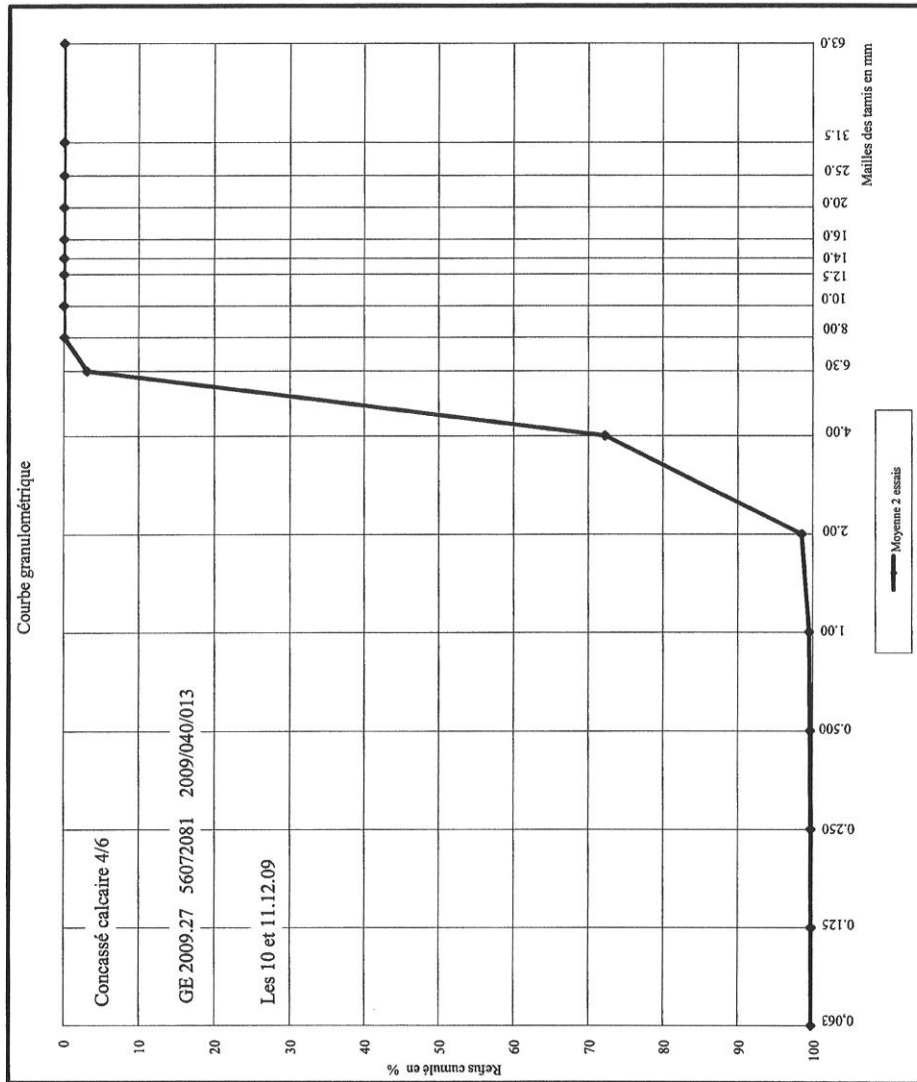
Critère	Limite	OK ?
Perte de matière.	$\leq 1.0 \%$	OK
Différence entre essai I et II	r1	Voir remarques

D. Remarques

- Le tamisage à sec n'est pas précédé du lavage de l'échantillon.
- Les masses sont exprimées en "g" et non en "kg".
- Les différences de refus cumulé entre l'essai I et II sont inférieures à r1 pour tous les tamis jusque 4 mm. Pour les tamis avec des ouvertures plus grandes, l'expression pour r1, mentionnée dans la norme, n'est pas valable.

E. Courbe(s) granulométrique(s).
Voir feuille annexe.





SP/GE/6.03a
GE 2009 27 MDV Tamisage à sec d'un concassé 4-6 mm NBN EN 933-1 (2006)



	CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION <small>ETABLISSEMENT RECONNU PAR APPLICATION DE L'ARRÊTÉ-LOI DU 30 JANVIER 1947</small>	 N° 042 – TEST
- Station expérimentale : B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe, 21 Tél : (32) 2 655 77 11 Fax : (32) 2 653 07 29 - Bureaux : B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg, 7 Tél : (32) 2 716 42 11 Fax : (32) 2 725 32 12 - Siège social : B-1000 Bruxelles, rue du Lombard, 42 Tél : (32) 2 502 66 90 Fax : (32) 2 502 81 80 TVA n° : BE 407.695.057 Page : 1/4		
LABORATOIRE : (GE) Géotechnique	RAPPORT D'ESSAIS	N° DE, DAT, RE : 56072081 N° Labo : GE 2009.26bis N° Echantillon : 2009/046/001
DEMANDEUR : CSTC-WTCB – Labo « BE » avenue P. Holoffe, 21 B – 1342 LIMELETTE		
Personnes contactées :	- Demandeur - Madame J. Pierard	- CSTC - Madame M. De Vos
Essais effectués : Analyse granulométrique d'un granulat. Tamisage à sec		
Références : NBN EN 933-1 (1997) + addendum (2006)		
Date et référence de la demande : 2009.12.08 Date de réception de(des) échantillon(s) : 2009.12.08 Date de l'essai : 2009.12.10 et 11 Date d'établissement du rapport : 2010.03.11		
<p>Ce rapport contient 4 pages, numérotées de 1/4 à 4/4. Il ne peut être reproduit que dans son ensemble. Sur chaque page figure le cachet du laboratoire (en rouge) et le paraphe du chef de laboratoire. Les résultats et constatations ne sont valables que pour les échantillons testés.</p> <input type="checkbox"/> Pas d'échantillon <input type="checkbox"/> Echantillon(s) ayant subi un essai destructif <input checked="" type="checkbox"/> Echantillon(s) évacué(s) de nos laboratoires 60 jours calendriers après l'envoi du rapport, sauf demande écrite de la part du demandeur.		
Responsable des essais  C. Verbeke	Le Chef de laboratoire   M. De Vos, ir.	
Collaboration technique : /		CV/CGO



CENTRE SCIENTIFIQUE ET TECHNIQUE DE LA CONSTRUCTION



N° 042 – TEST

56072081
GE 2009.26bis
Page 2/4

CSTC - WTCB
LABO G.E.
Analyse granulométrique d'un granulat : tamisage à sec sans élimination des fines.

Demandeur: CSTC-WTCB Labo"BE"
Avenue Pierre Holoffe, 21
B - 1342 LIMLETTE

Echantillon: Concassé calcaire 6/10
GE 2009.26 bis 56072081 2009/046/001

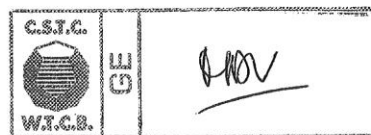
Procédure : NBN EN 933-1 (1997 + addendum 2006)
Caractéristiques géométriques des granulats.
Partie 1. Analyse granulométrique par tamisage.

Date de l'essai: Le 15.12.09

Méthode de tamisage utilisée: Tamisage mécanique suivi d'un tamisage manuel
jusqu'au moment critique.

A. Résultats des tamisages.

Tamis I.S.O. mm	Refus cumulé				Moyenne %
	Essai III		Essai IV		
	g	%	g	%	
63,00					
31,50					
25,00					
20,00					
16,00					
14,00					
12,50	0,00	0,0	0,00	0,0	0,0
10,00	76,57	4,9	92,43	5,7	5,3
8,000	673,75	43,5	734,17	45,2	44,4
6,300	1308,87	84,5	1381,46	85,1	84,8
4,000	1490,29	96,2	1565,67	96,4	96,3
2,000	1519,36	98,1	1594,32	98,2	98,2
1,000	1527,37	98,6	1602,30	98,7	98,7
0,500	1530,74	98,9	1605,63	98,9	98,9
0,250	1532,72	99,0	1607,98	99,0	99,0
0,125	1534,05	99,1	1609,33	99,1	99,1
0,063	1535,15	99,1	1610,46	99,2	99,2
<0.063	1548,49		1623,74		
Masse sèche M ₁ (g)	1550,19		1625,52		
Pourcentage de fines (%)	1,0		0,9		
Perte de matière (%)	0,11		0,11		



SP/GE/6.03a
GE 2009 26 bis MDV Tamisage à sec d'un concassé 6-10 mm NBN EN 933-1 (2006) (2)



B. Dérogations à la norme.
Néant

C. Critères d'acceptation.

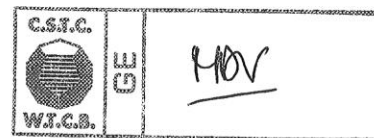
Critère	Limite	OK ?
Perte de matière.	$\leq 1.0 \%$	OK
Différence entre essai I et II	r1	OK

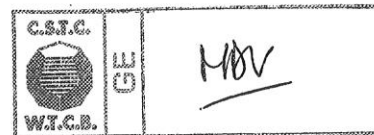
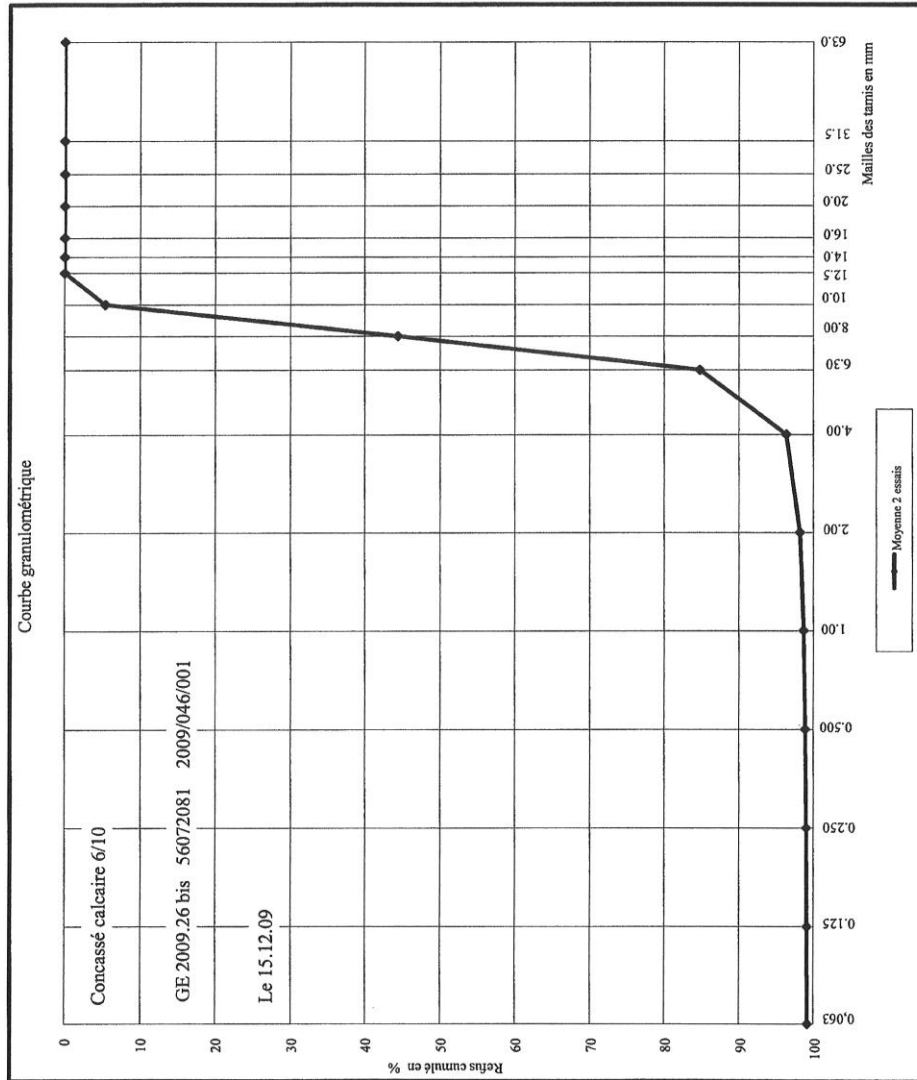
D. Remarques

- Le tamisage à sec n'est pas précédé du lavage de l'échantillon.
- Les masses sont exprimées en "g" et non en "kg".

E. Courbe(s) granulométrique(s).

Voir feuille annexe.





SP/GE/6.03a
GE 2009 26 bis MDV Tamisage à sec d'un concassé 6-10 mm NBN EN 933-1 (2006)



CSTC - WTCB
LABO G.E.
Analyse granulométrique d'un granulat : tamisage à sec sans élimination des fines.

Demandeur: CSTC - WTCB Labo "BE"
Avenue Pierre Holoffe, 21
B - 1342 LIMELETTE

Echantillon: Gravier 10/14
GE 2011.18 B 56102064 2011/40/013

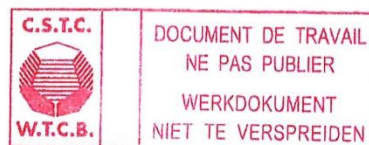
Procédure : NBN EN 933-1 (1997 + addendum 2006)
Caractéristiques géométriques des granulats.
Partie I. Analyse granulométrique par tamisage.

Date de l'essai: Le 03.11.11

Méthode de tamisage utilisée: Tamisage mécanique suivi d'un tamisage manuel
jusqu'au moment critique.

A. Résultats des tamisages.

Tamis I.S.O. mm	Refus cumulé				Moyenne %
	Essai I		Essai II		
	g	%	g	%	
63,00					
31,50					
25,00					
20,00	0,0	0,0	0,00	0,0	0,0
16,00	10,9	0,4	12,51	0,4	0,4
14,00	107,5	4,4	117,06	4,1	4,2
12,50	441,7	17,9	546,39	19,3	18,6
10,00	1642,4	66,6	1941,80	68,7	67,6
8,000	2325,0	94,3	2687,64	95,0	94,7
6,300	2439,2	98,9	2795,52	98,9	98,9
4,000	2447,3	99,2	2805,17	99,2	99,2
2,000	2449,4	99,3	2807,53	99,3	99,3
1,000	2451,3	99,4	2809,38	99,3	99,4
0,500	2452,3	99,4	2810,66	99,4	99,4
0,250	2453,1	99,5	2811,55	99,4	99,4
0,125	2453,6	99,5	2812,14	99,4	99,5
0,063	2454,9	99,5	2813,50	99,5	99,5
<0.063	2466,4		2827,97		
Masse sèche M ₁ (g)	2467,4		2829,04		
Pourcentage de fines (%)	0,5		0,5		
Perte de matière (%)	0,04		0,04		





B. Dérogations à la norme.

Néant

C. Critères d'acceptation.

Critère	Limite	OK ?
Perte de matière.	$\leq 1.0 \%$	OK
Différence entre essai I et II	r1	NOK

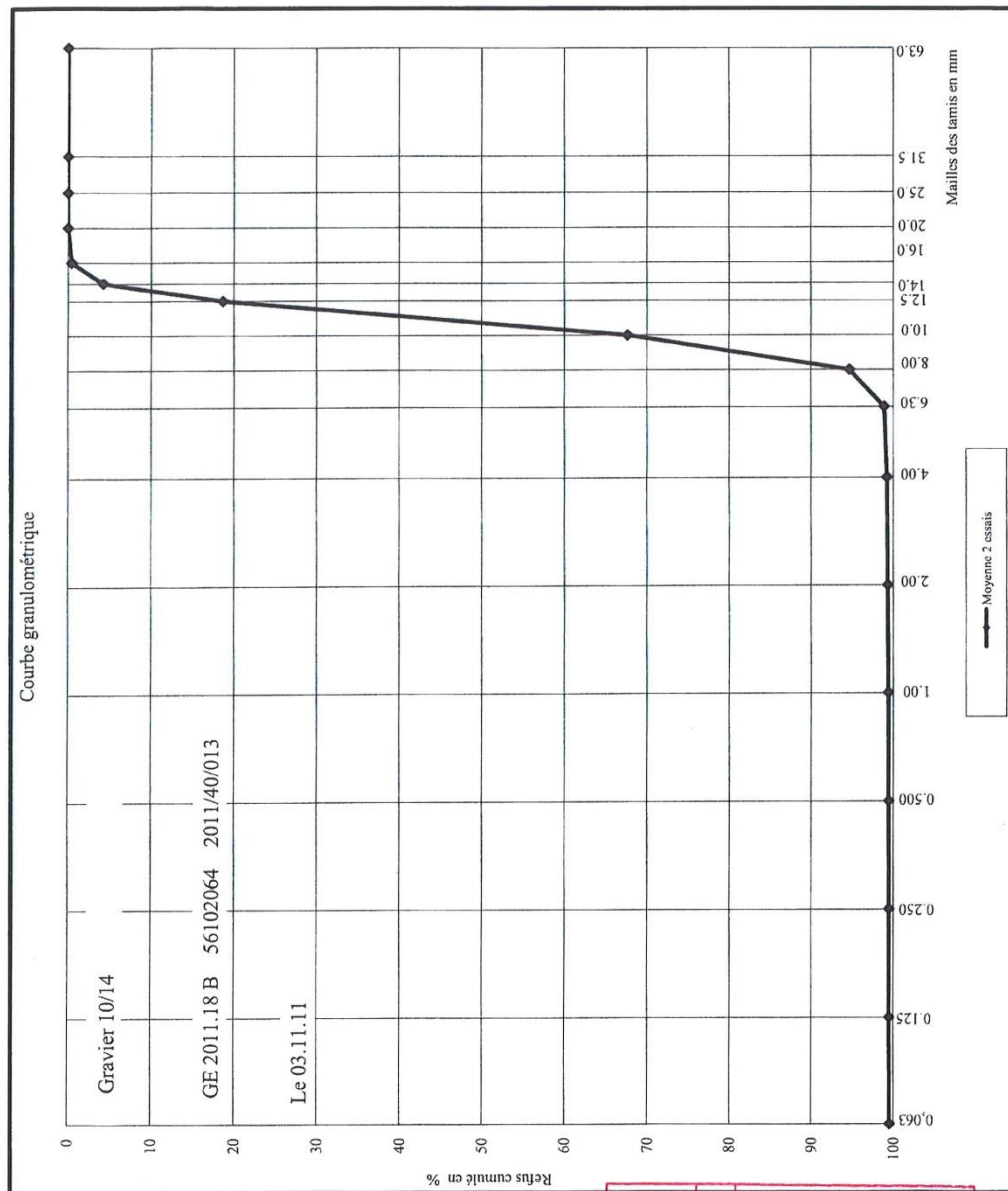
D. Remarques

- Le tamisage à sec n'est pas précédé du lavage de l'échantillon.
- Les masses sont exprimées en "g" et non en "kg".
- Les différences de refus cumulé entre l'essai I et II sont inférieures à r1 pour tous les tamis jusque 4 mm. Pour les tamis avec des ouvertures plus grandes, l'expression pour r1, mentionnée dans la norme, n'est plus valable.

E. Courbe(s) granulométrique(s).

Voir feuille annexe.





Gravier 10/14

GE 2011.18 B 56102064 2011/40/013

Le 03.11.11

C.S.T.C.

W.T.C.B.

DOCUMENT DE TRAVAIL
 NE PAS PUBLIER
 WERKDOKUMENT
 NIET TE VERSPREIDEN

SP/GE/6.03³⁴
 GE 2011.18 B MDV DT Tamisage à sec d'un granulat 10-14 NBN EN 933-1 (2006).xls

Tous les essais repris dans ce rapport ont été réalisés en conformité avec le système de management de la qualité du CSTC certifié ISO 9001

Station expérimentale
 Bureaux
 Siège social

B-1342 Limelette, avenue P. Holoffe 21
 B-1932 Sint-Stevens-Woluwe, Lozenberg 7
 B-1000 Bruxelles, rue du Lombard 42

Tel.: +32 (0)2 655 77 11
 Tel.: +32 (0)2 716 42 11
 Tel.: +32 (0)2 502 66 90

RAPPORT D'ESSAIS

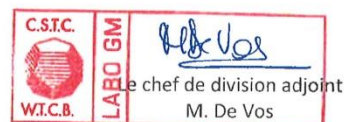
Laboratoire	GÉOTECHNIQUE ET MONITORING (GM)	N/Références	3-2003 GE 2014.04 Page 1/6
--------------------	---------------------------------	---------------------	----------------------------------

Demandeur	CSTC-WTCB Labo « BE » avenue Pierre Holoffe, 21 B-1342 LIMELETTE		
Date de la demande	07/03/2014	Enregistrement des échantillons	2014/10/29
		Date de réception des échantillons	12/03/2014
Date d'établissement du rapport	27.03.2014		
Essais effectués	Analyse granulométrique : tamisage à sec d'un gravier 14/20 Coefficient d'absorption d'eau		
Références	NBN EN 933-1 (2012) NBN EN 1097-6 (2006)		

Ce rapport d'essais contient 6 pages. Ce rapport d'essais ne peut être reproduit que dans son intégralité. Sur chaque page figurent le cachet du laboratoire (en rouge) et le paraphe du chef de laboratoire. Les résultats et constatations ne sont valables que pour les échantillons testés.

- Pas d'échantillon
- Echantillon(s) ayant subi un essai destructif
- Echantillon(s) évacué(s) de nos laboratoires 30 jours calendriers après l'envoi du rapport, sauf demande écrite de la part du demandeur

Le responsable des essais
 C. Verbeke

CSTC - WTCB
LABO G.E.
Analyse granulométrique d'un granulat : tamisage à sec sans élimination des fines.

Demandeur: CSTC - WTCB Labo "BE"
Avenue Pierre Holoffé, 21
B - 1342 LIMELETTE

Echantillon: Gravier 14/20
GE 2014.04 3-2003 2014/10/29

Procédure: NBN EN 933-1 (2012)
Caractéristiques géométriques des granulats.
Partie 1. Analyse granulométrique par tamisage.

Date de l'essai: Le 17.03.2014

Méthode de tamisage utilisée: Tamisage mécanique suivi d'un tamisage manuel jusqu'au moment critique.

A. Résultats des tamisages.

Tamis I.S.O. mm	Refus cumulé				Moyenne %
	Essai I		Essai II		
	g	%	g	%	
63.00					
31.50					
25.00	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
20.00	174.7	5.9	81.01	2.5	4.2
16.00	2104.7	71.2	2298.62	71.0	71.1
14.00	2775.2	93.9	3034.30	93.7	93.8
12.50	2901.6	98.2	3171.98	97.9	98.0
10.00	2912.5	98.5	3187.83	98.4	98.5
8.000	2914.6	98.6	3189.30	98.5	98.5
6.300	2915.1	98.6	3190.27	98.5	98.6
4.000	2915.3	98.6	3190.39	98.5	98.6
2.000	2916.0	98.6	3190.90	98.5	98.6
1.000	2916.9	98.7	3191.95	98.6	98.6
<1.000	2956.3		3238.78		
Masse sèche M _i (g)	2957.8		3240.60		
Perte de matière (%)	0.05		0.06		



B. Dérogations à la norme.
Néant

C. Critères d'acceptation.

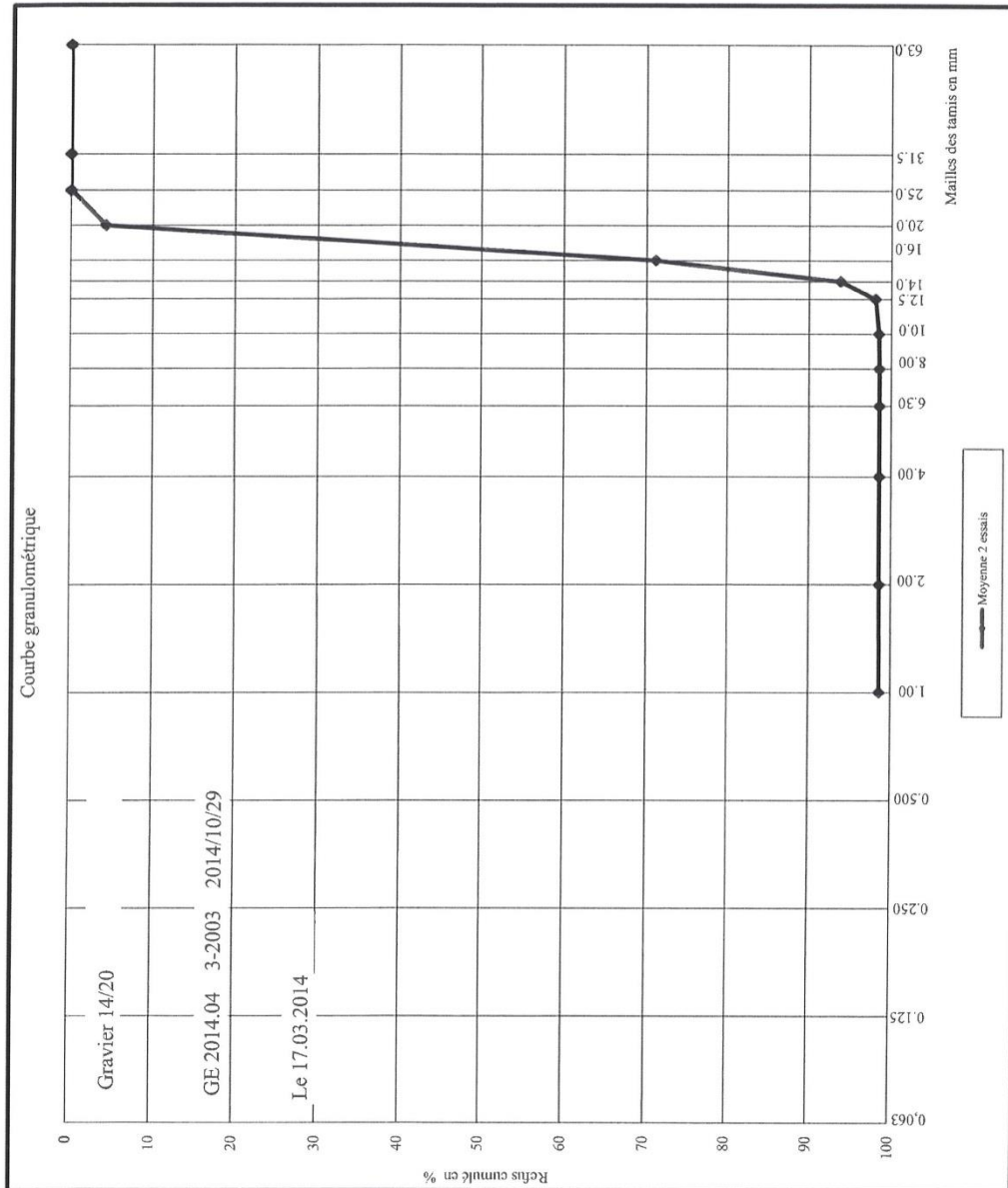
Critère	Limite	OK ?
Perte de matière.	$\leq 1.0 \%$	OK
Différence entre essai I et II	r1	OK

D. Remarques

- Le tamisage à sec n'est pas précédé du lavage de l'échantillon.
- Les masses sont exprimées en "g" et non en "kg".
- Les différences de refus cumulé entre l'essai I et II sont inférieures à r1 pour tous les tamis jusque 4 mm. Pour les tamis avec des ouvertures plus grandes, l'expression pour r1, mentionnée dans la norme, n'est plus valable.

E. Courbe(s) granulométrique(s).
Voir feuille annexe.





SP/GE/6.03a
 GE 2014.04 MDV Tamisage à sec d'un granulat 14-20 NBN EN 933-1 (2012)



CSTC - WTCB

LABO GE

Détermination de la masse volumique réelle
et du coefficient d'absorption d'eau

Demandeur : CSTC-WTCB Labo "BE"
Avenue Pierre Holoffe, 21
B - 1342 LIMELETTE

Echantillon : Granulats calcaires 14/20
GE 2014.04 3-2003 2014/10/29

Procédure : NBN EN 1097-6 (2000), NBN EN 1097-6 AC (2002), NBN EN 1097-6 A1 (2006)
Essais pour déterminer les caractéristiques mécaniques et physiques des granulats.
Partie 6: Détermination de la masse volumique réelle et du coefficient
d'absorption d'eau.
Clause 8: Méthode au pycnomètre pour granulats compris entre 4 et 31.5 mm.

Date de l'essai : Du 18 au 20.03.2014

A. Résultats des essais

Voir page suivante

B. Dérogations à la norme

Contrairement à ce qui est mentionné dans la clause 8.3, on ajuste le niveau d'eau
jusqu'au repère sur l'entonnoir.

C. Critères d'acceptation

Néant

D. Remarques

Néant



ANNEXE 4 : ÉCHÉANCES DE CASSES DES ÉPROUVETTES SOUMISES À UNE ATTAQUE SULFATIQUE À 5°C

Ciment	N° Epreuve	Dimension épreuve (cm ³)	Échéance depuis attaque SO ₄ (semaines)	Échéance depuis attaque SO ₄ (jours)
CEM 6 v2-FP	A	2*2*16	10	71
CEM 12 v2-FP	B	2*2*28	12	85
CEM 10 v2-FP	C	2*2*28	14	98
	D	2*2*28	14	98
CEM 12 v2-FP	A	2*2*28	14	98
	C, D	2*2*28	14	98
CEM 12 v2-FP	A	2*2*16	14	98
	B, C	2*2*16	14	98
CEM 6 v2-FI	A	2*2*28	14	98
	B, C, D	2*2*28	14	98
CEM 3 v2-FP	A	2*2*16	16	113
	B,C,D	2*2*16		
CEM 6 v2-FP		2*2*16	16	113
CEM 10 v2-FP	A	2*2*16	16	112
CEM 6 v2-FI	A	2*2*16	16	112
	B, C	2*2*16	16	112
CEM 6 v2-FP	B	2*2*28	16	113
	A	2*2*28		
	D	2*2*28	16	113
	C	2*2*28		

CEM 10 v2-FP	A	2*2*28	16	112
	B	2*2*28		
CEM 6 v2-FI	C	2*2*28	16	112
	D	2*2*28		
CEM 3 v2-FP	A, B, C	2*2*28	20	141
CEM 1 v2-FP	A	2*2*28	22	155
CEM 1 v2-FP	C	2*2*16	24	169
CEM 1 v2-FP	B	2*2*28	26	183
CEM 1 v2-FP	A	2*2*16	26	183
CEM II/(B-M) LL-S-V 32,5 N	A, B, C	2*2*16	26	183
CEM 1 v2-FP	C, D	2*2*28	30	211
CEM 1 v2-FP	B	2*2*16	30	211
CEM II/(B-M) LL-S-V 32,5 N	C	2*2*28	30	211
CEM I 52,5 R HES	A&C	2*2*16	48	337
CEM I 52,5 R HES	B	2*2*16	50	351



PROJET CEMCALC II

CIMENTS TERNAIRES À HAUTE TENEUR EN CALCAIRE



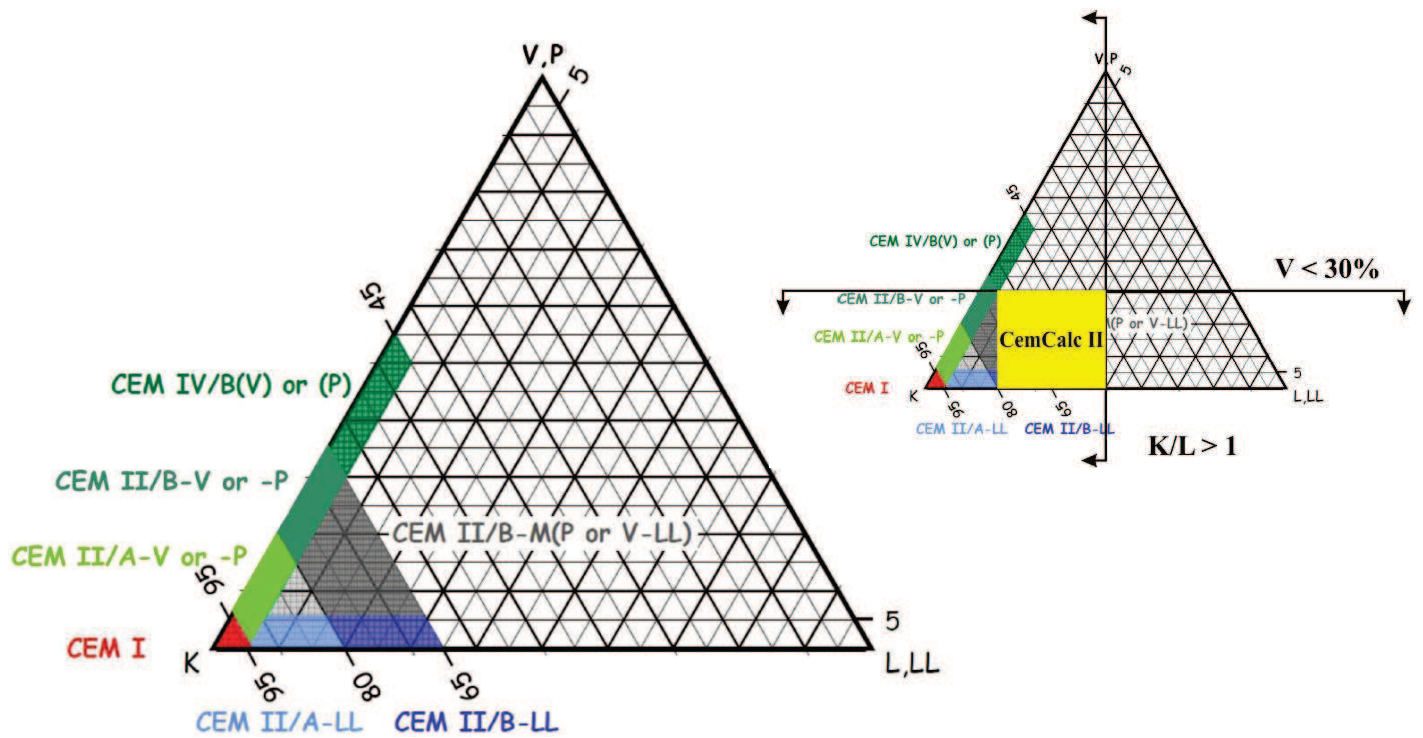
PLAN DE L'EXPOSÉ



- INTRODUCTION (CRIC)
- ÉVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

CIMENTS TERNAIRES :

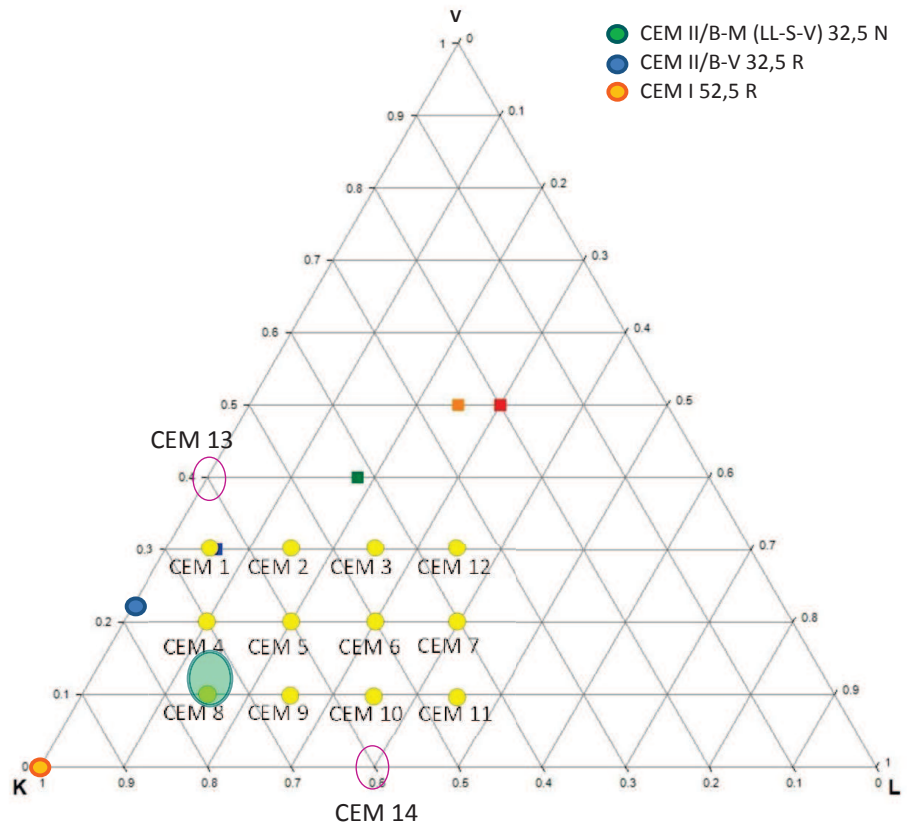
CV/POUZZOLANE (V,P) – CLINKER (K) – FILLER CALCAIRE (L,LL)



INTRODUCTION

CIMENTS CEMCALC II

	V (%)	K (%)	L (%)	S (%)
CEM 1	30	65	5	
CEM 2		55	15	
CEM 3		45	25	
CEM 12		35	35	
CEM 4	20	70	10	
CEM 5		60	20	
CEM 6		50	30	
CEM 7		40	40	
CEM 8	10	75	15	
CEM 9		65	25	
CEM 10		55	35	
CEM 11		45	45	
CEM II/B-V 32,5 R	22	78	0	0
CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	9	70	13	7
CEM I 52,5 R	0	100	0	0



- INTRODUCTION (CRIC)
- ÉVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

5

ÉVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER



CONSTITUANTS DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES : CENDRES VOLANTES

Composition chimique	Cendre combustion CV1	Cendre co-combustion CVco1	Cendre combustion CV2
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	0,73	1,09	1,45
P.F. à l'air 950°C (%)	6,39	4,47	3,36
SiO ₂ réactive (%)	38,36	37,87	39,09
P ₂ O ₅ soluble (mg/kg)	4,70	0,40	1,60
CaO réactive (%)	1,48	3,48	3,54
CaO libre (%)	<0.10	0,20	0,20
CO ₂ (%)	0,24	0,24	0,89
H ₂ O (%)	0,49	0,85	0,56
SiO ₂ +Al ₂ O ₃ +Fe ₂ O ₃ (%)	83,77	84,70	83,85
Composition minéralogique	CV1	CVco1	CV2
Amorphe (%)	73,8	69,6	79,5
Mullite (%) 3Al ₂ O ₃ .2SiO ₂	16,9	17,8	10,4
Quartz (%) SiO ₂	7,7	9,3	7,9
Hematite (%) Fe ₂ O ₃	0,7	1,3	1,1
Magnetite (%) Fe ₃ O ₄	0,9	1,6	1,0
Chaux libre (%) CaO	0,0	0,5	0,1
TOTAL (%)	100,0	100,0	100,0

Finesse		CV1	CV1 broyeur à disques	CV1 broyeur oscillant	CVco1	CV2
Blaine ACME (cm ² /kg)		2560	2650	4040	3210	3180
Granulométrie Laser	< 8 µm (%)	16,07	17,84	35,68	22,16	30,27
	< 32 µm (%)	47,06	50,16	74,19	62,97	64,89
Refus tamis humide 45µm (%)		34,26	31,08	17,38	17,23	20,58
Indice d'activité (%)		CV1	CV1 broyeur à disques	CV1 broyeur oscillant	CVco1	CV2
Échéance	Exigences EN 450-1					
	28 jours	> 70	75,79	76,26	78,93	79,40
91 jours	> 80	90,83	93,84	98,28	97,42	99,71

- Influence de la finesse sur la réactivité (CV1 différentes finesses)
- Mais influence également de la composition chimique et minéralogique (CV2)

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

6

PERFORMANCES ENVIRONNEMENTALES DES CENDRES VOLANTES

- Lixiviation des 3 CV (CV1, CVco1, CV2) à 5 pH (obtenus avec HNO₃) : 4 – 6 – 7 – 10,5 (=pH des CV dans eau sans acide) – 11 (atteint par ajout de NaOH).
- Dosage des éléments dans la solution par ICP-OES.



1) Dispositif de lixiviation des cendres volantes



2) ICP-OES

- Relargage en éléments sensiblement identique pour les 3 CV pour les 4 pH testés : aucune ne relargue de quantités problématiques pour l'environnement de métaux lourds ou d'autres éléments.
- Pour la plupart des éléments : un milieu acide est plus critique qu'un milieu alcalin.

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

7

EVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER

CONSTITUANTS DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES : FILLERS CALCAIRES

Composition chimique	Filler pur (FP)	Filler impur (FI)
P.F. sous Ar TG 750°C (%)	43,88	36,12
CO ₂ (%)	43,83	35,08
H ₂ O (%)	0,03	1,04
SiO ₂ (%)	0,19	13,98
Al ₂ O ₃ (%)	0,05	2,45
Fe ₂ O ₃ (%)	0,04	1,11
CaO (%)	55,04	42,76
SrO (%)	0,02	0,11
Na ₂ O (%)	0,00	0,07
K ₂ O (%)	0,01	0,77
MgO (%)	0,33	1,27
Mn ₂ O ₃ (%)	0,00	0,02
TiO ₂ (%)	0,00	0,13
P ₂ O ₅ (%)	/	0,17
S ²⁻ (%)	0,02	0,52
SO ₃ (%)	0,00	0,25
Cl ⁻ (%)	/	0,005
TOTAL (%)	99,58	99,74

Composition minéralogique	FP	FI	
Calcite (%) CaCO ₃	100,0	80,0	
Dolomite (%) CaMg(CO ₃) ₂	0,0	4,5	
Quartz (%) SiO ₂	0,0	11,1	
Illite (%) (K,H ₃ O)(Al,Mg,Fe) ₂ (Si,Al) ₄ O ₁₀ [(OH) ₂ (H ₂ O)]	0,0	2,7	
Chlorite (%) (Fe,Mg,Al) ₆ (Si,Al) ₄ O ₁₀ (OH) ₈	0,0	1,0	
Pyrite (%) Fe ₂ S	0,0	0,8	
TOTAL (%)	100,0	100,0	
	FP	FI	
Valeur de bleu (g/kg de filler)	1,1	6,9	
Teneur en matières organiques (% en masse)	0,3	0,7	
	FP	FI	
Finesse			
Blaine ACMEC (cm ² /kg)	4470	5560	
Granulométrie Laser	< 8 µm (%)	48,62	79,39
	< 32 µm (%)	36,88	76,48

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

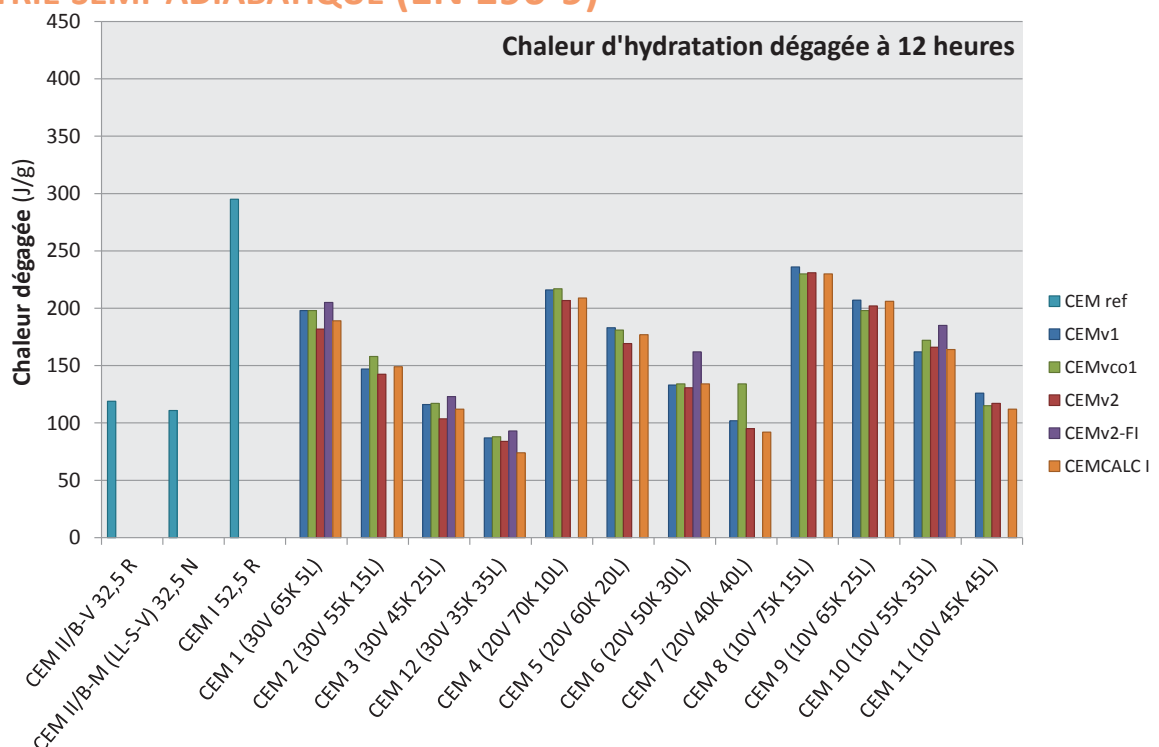
8

CIMENTS DE RÉFÉRENCE ET NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES DE LABORATOIRE : FINESSE

	22V 78K 0L	9V 70K 13LL 7S	0V 100K 0L				
	CEM II/B-V 32,5 R	CEM II/B-M 32,5 N	CEM I 52,5 R	12 CEM v1 moyenne	12 CEM vco1 moyenne	12 CEM v2 moyenne	5 CEM v2-FI moyenne
Finesse Blaine ACME (cm ² /kg)	2960	3360	4780	4109	4133	4231	4412
Granulométrie	< 8 μm (%)	27,28	30,81	39,08	38,58	41,13	37,13
	Lasers < 32 μm (%)	69,84	70,54	94,08	81,20	83,98	82,57

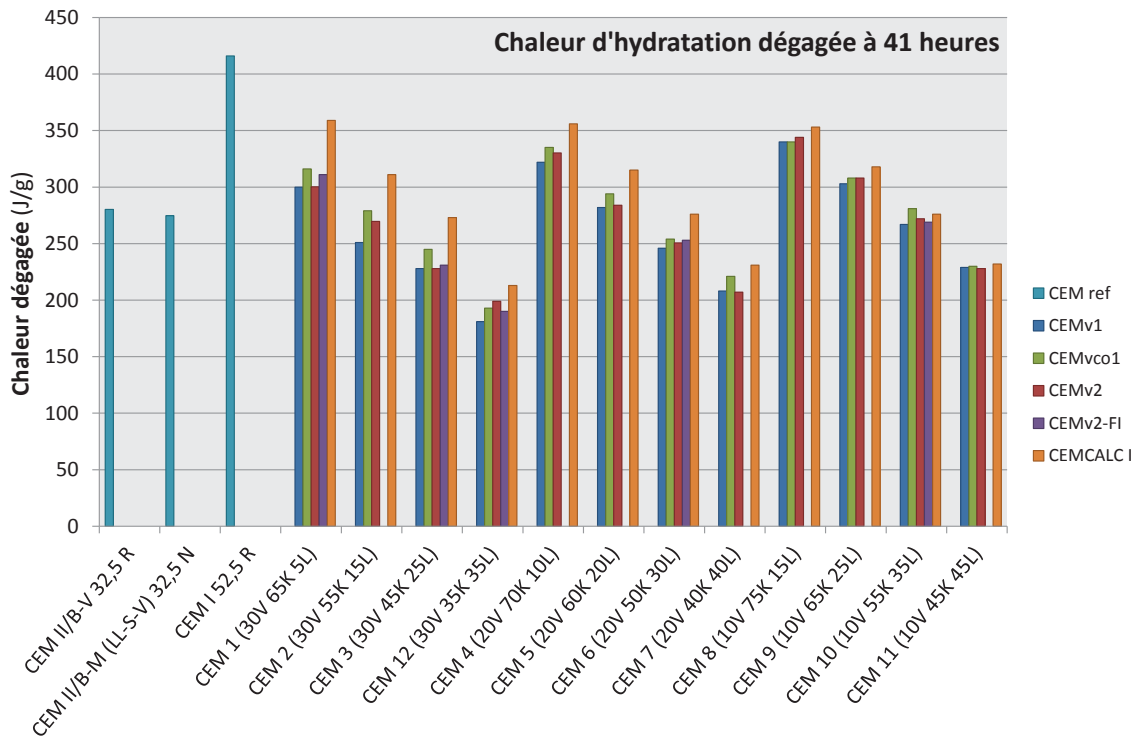
- Les ciments de laboratoire ont des finesses comprises entre le CEM I et les CEM II de référence.

COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS : CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE (EN 196-9)



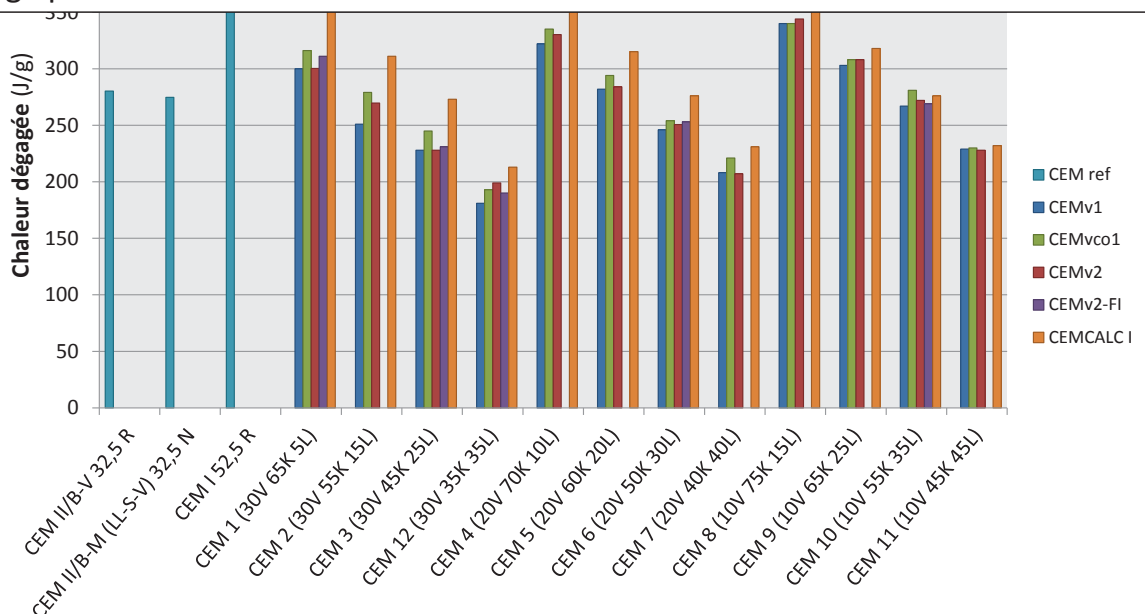
- A 12h : Quantité de chaleur dégagée par les ciments à base de V équivalente à celle des ciments à base de S.

COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS : CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE (EN 196-9)

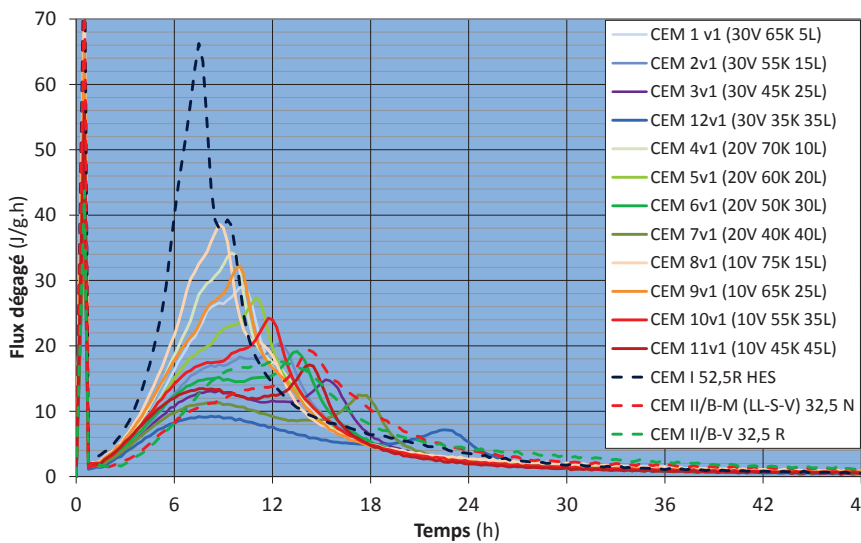


COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS : CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE (EN 196-9)

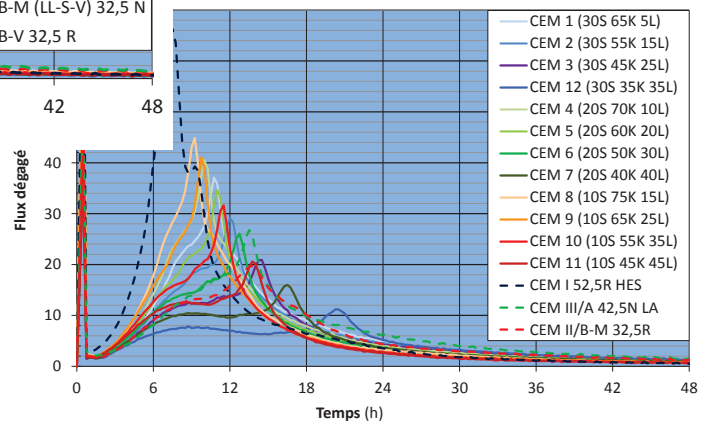
- A 41h : Quantité de chaleur dégagée par les ciments à base de V inférieure à celle des ciments à base de S surtout pour les ciments riches en V/S.
- Dégagement de chaleur équivalent entre les CEMv1 & CEMv2.
- CEMvco1 dégage plus de chaleur.



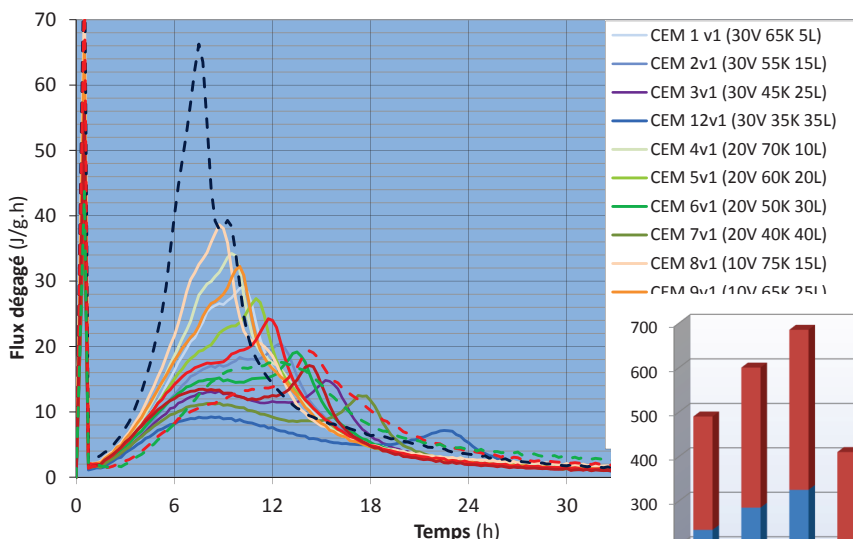
COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS : CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE (EN 196-9)



- Ordre de dégagement de chaleur identique avec V et S.
- Ralentissement et diminution du dégagement de chaleur avec augmentation simultanée de V et L.

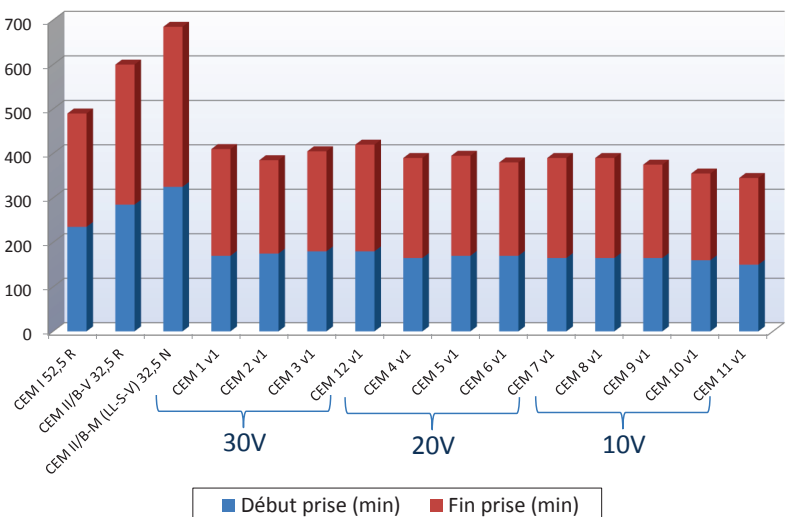


COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS : CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE (EN 196-9) – TEMPS DE PRISE (EN 196-3)



- Pas de différence marquée des temps de prise des 12 CEMv1.
- Très légère tendance à diminuer avec la teneur en V.
- Temps de prise un peu plus longs pour CEM riche en V & L (CEM12).

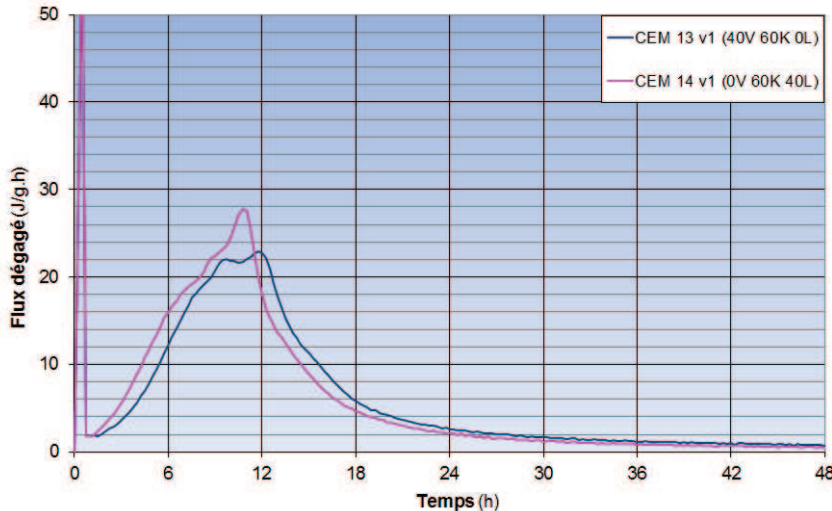
- Les CEM II de référence ont les temps de prise les plus longs.
- Début de prise plus long pour le CEM II/B-M 32,5N.



COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS :

CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE

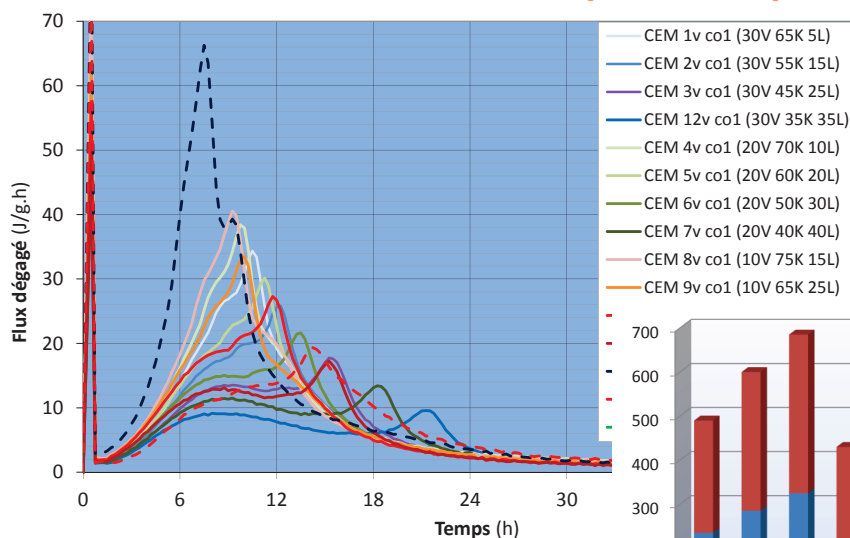
- Pas de différence significative de la quantité de chaleur dégagée entre le ciment V-K et le ciment K-L.
- Le ciment K-L semble s'hydrater un peu plus vite que le ciment V-K.



		(J/g)					
		12 h	24 h	36h	41 h	48 h	72 h
V40 K60 L0	CEM 13 v1	162	256	277	282	289	302
VO K60 L40	CEM 14 v1	187	261	277	281	285	294
Différence		25	5	0	-1	-4	-8

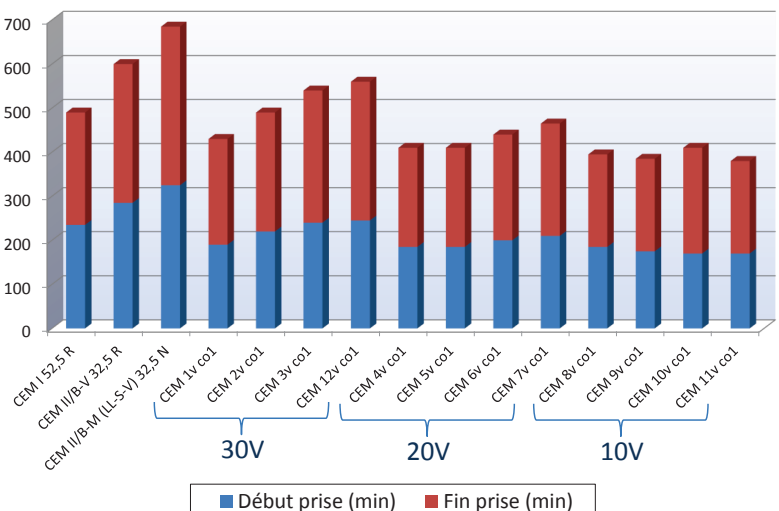
COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS :

CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE (EN 196-9) – TEMPS DE PRISE (EN 196-3)



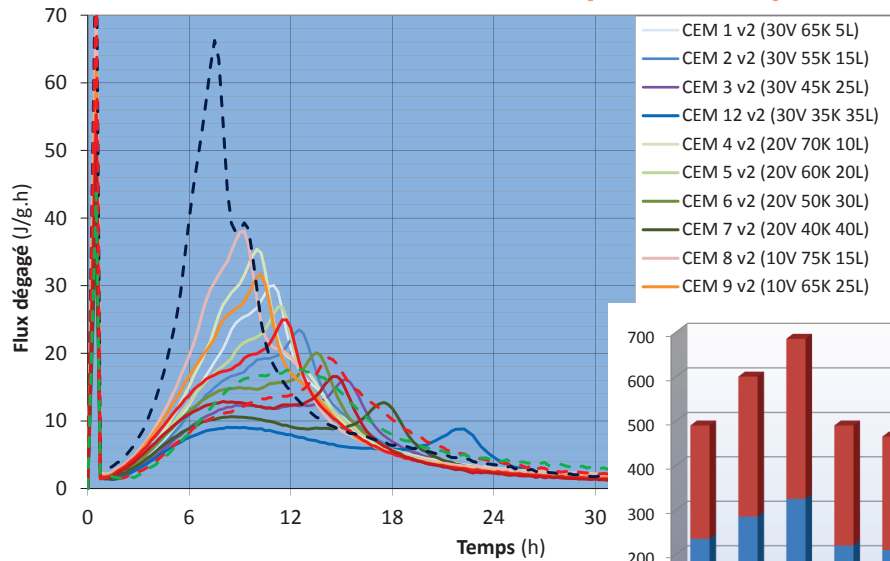
- Les CEM II de référence ont les temps de prise les plus longs.

- Les temps de prise semblent diminuer avec la teneur en V.
- Temps de prise plus longs pour CEM riche en V & L (CEM12).



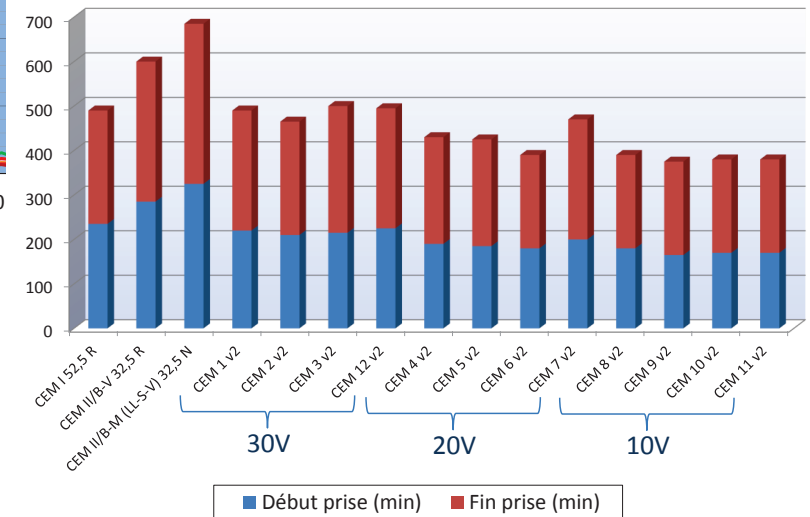
COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS :

CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE (EN 196-9) – TEMPS DE PRISE (EN 196-3)



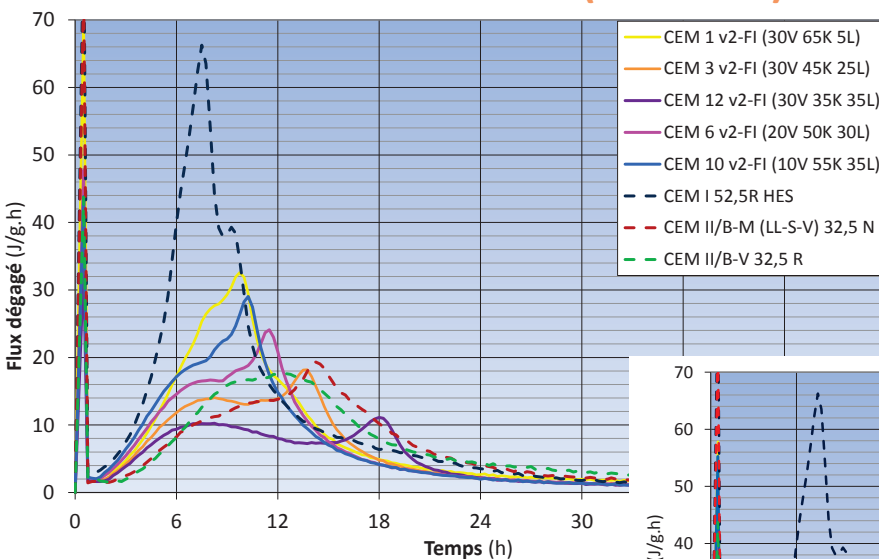
■ Les CEM II de référence ont les temps de prise les plus longs.

- Les temps de prise semblent diminuer avec la teneur en V.
- Temps de prise plus longs pour CEM riche en V & L (CEM12).

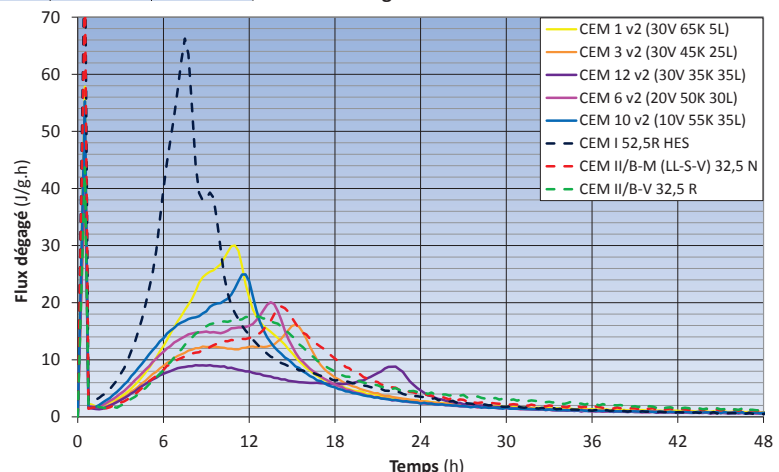


COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS :

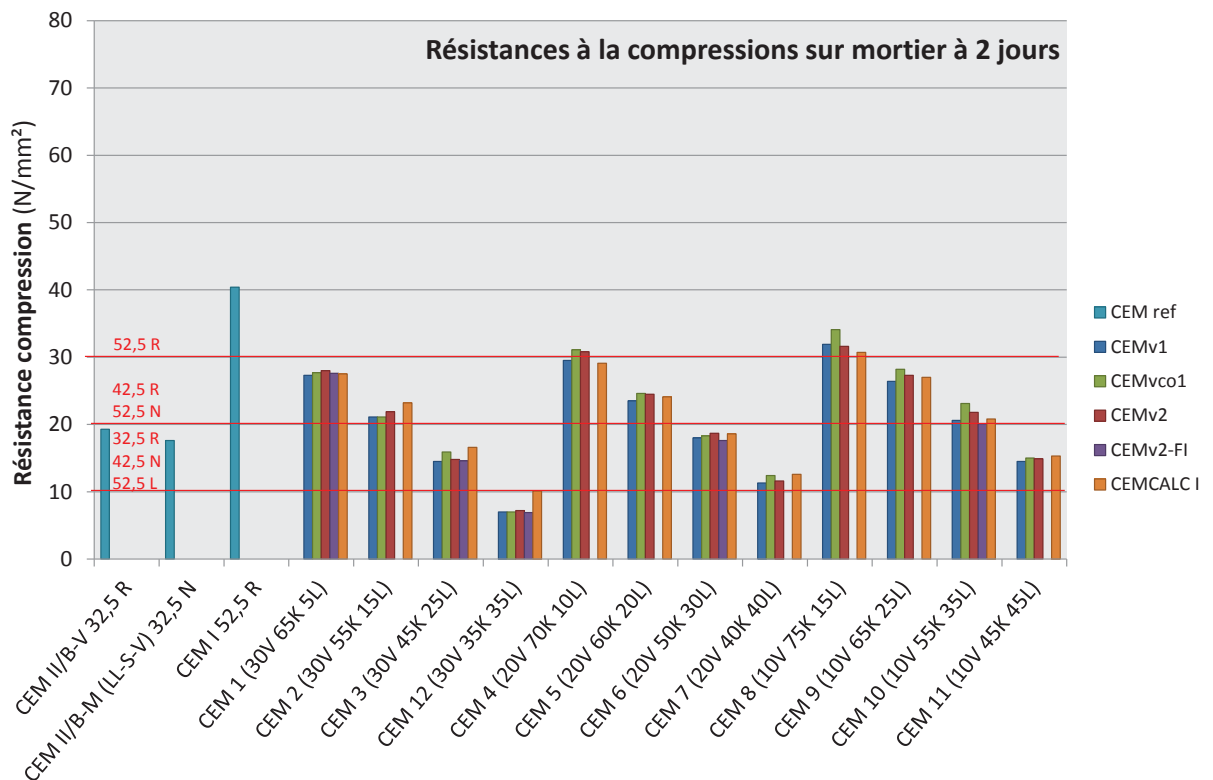
CALORIMÉTRIE SEMI-ADIABATIQUE (EN 196-9)



- L'utilisation de FI semble accélérer l'hydratation.
- La quantité de chaleur dégagee ne varie pas de façon significative à partir de 24h.

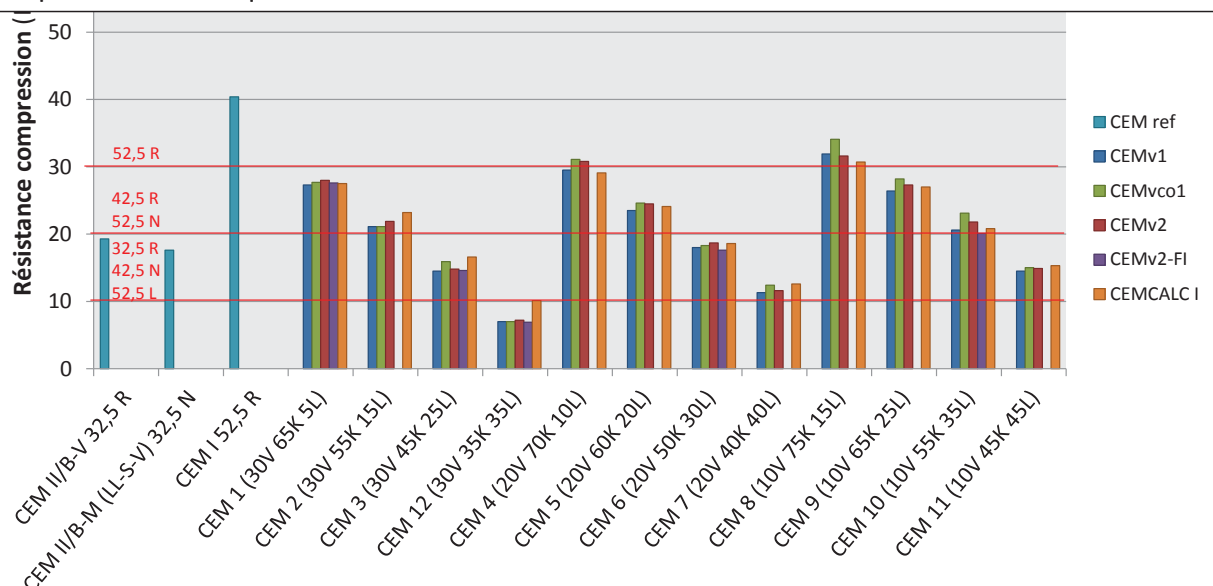


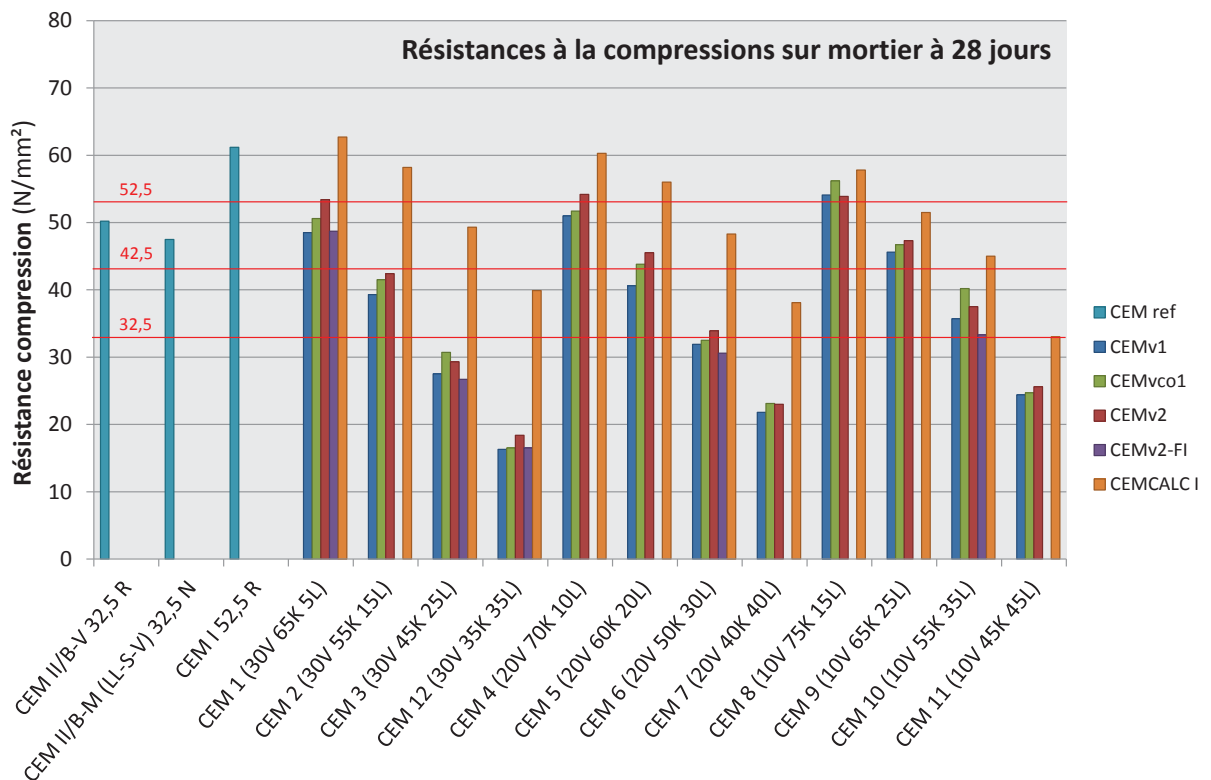
COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS (EN 196-1)



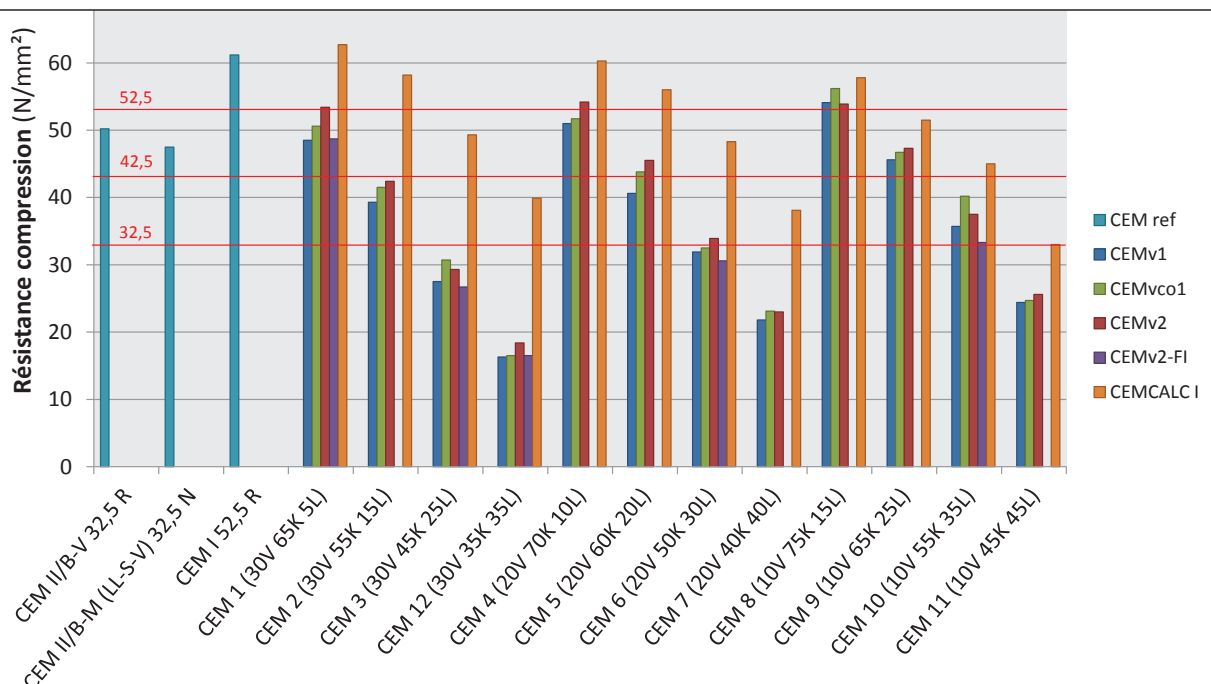
COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS (EN 196-1)

- A 2j : les ciments plus riches en V sont moins résistants pour une teneur en K équivalente.
- Les résistances diminuent avec l'augmentation en L.
- Meilleures Rc pour plusieurs familles de ciments que les CEMref.
- Souvent CEMv2 plus résistants, parfois CEMvco1.
- CEMv2-FI généralement très légèrement moins résistants qu'avec FP.
- CEMCALC II plus ou moins équivalent à CEMCALC I.

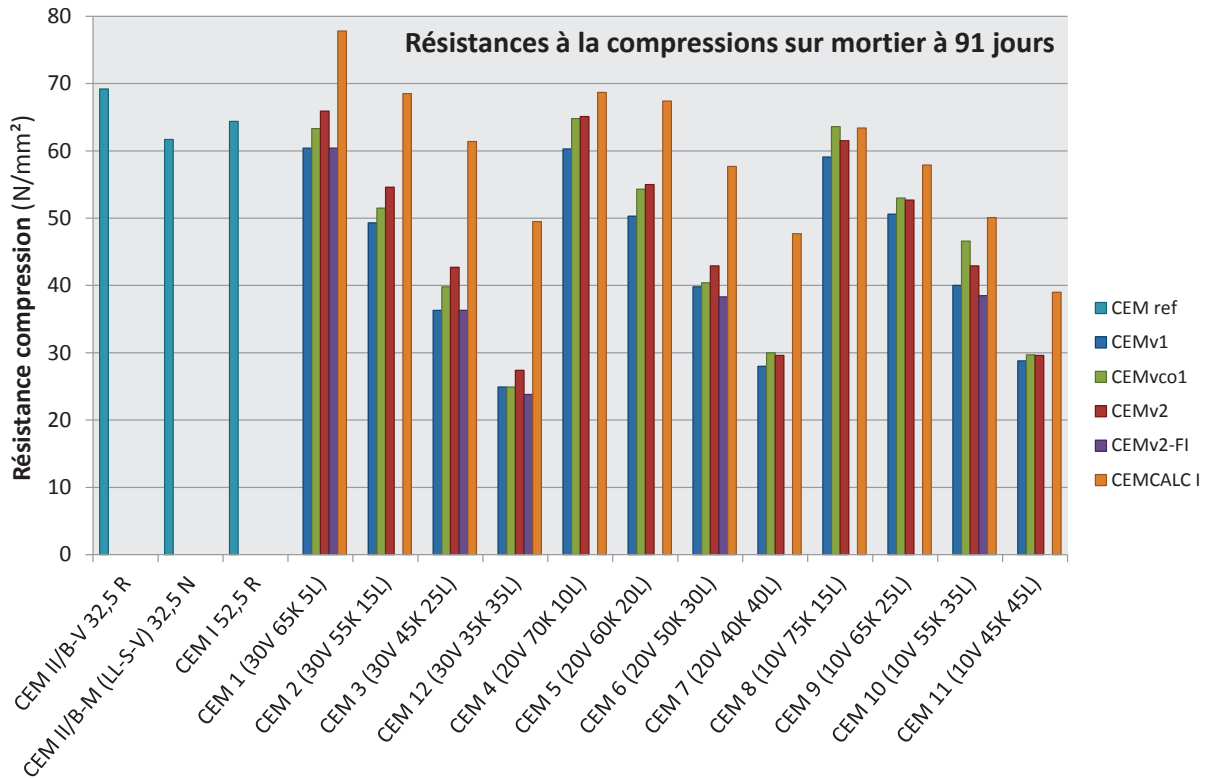




- A 28j : les ciments plus riches en V tendent à devenir aussi résistants que ceux pauvres en V pour une teneur en K équivalente.
- CEMCALC I plus résistants que CEMCALC II, l'action du laitier à long terme est plus efficace que V.

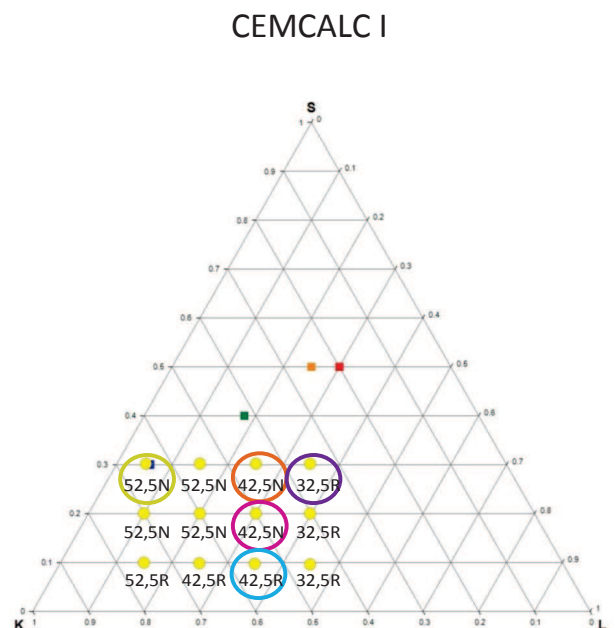
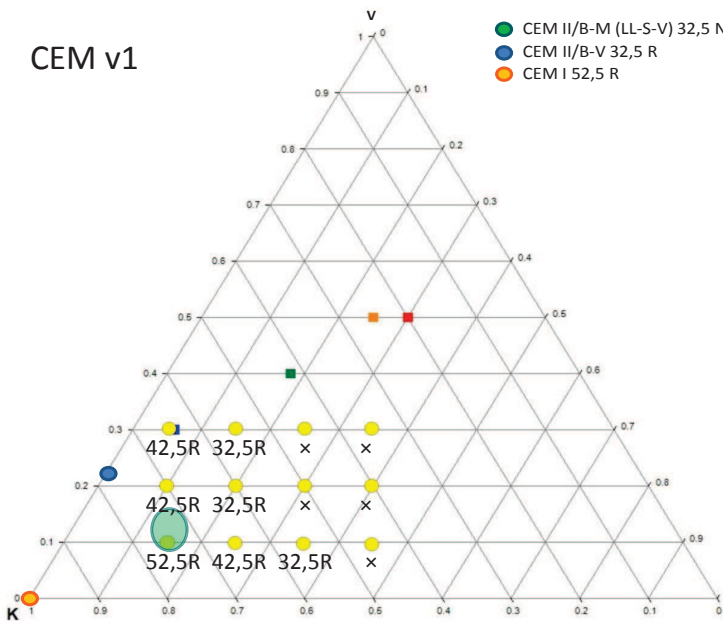


COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS (EN 196-1)

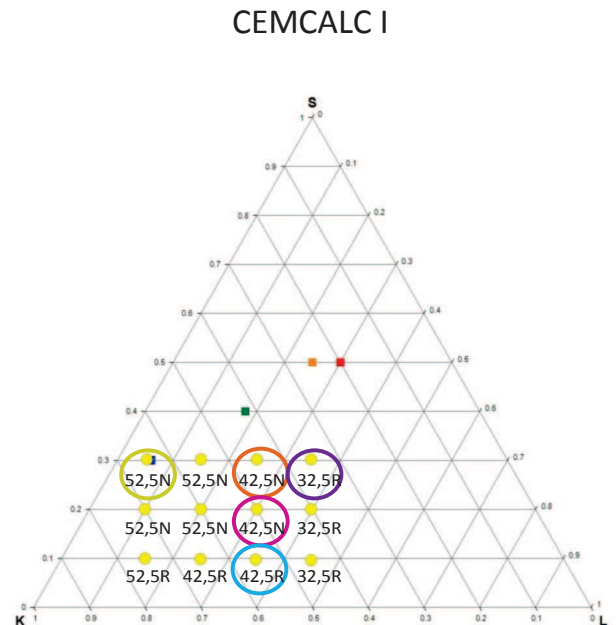
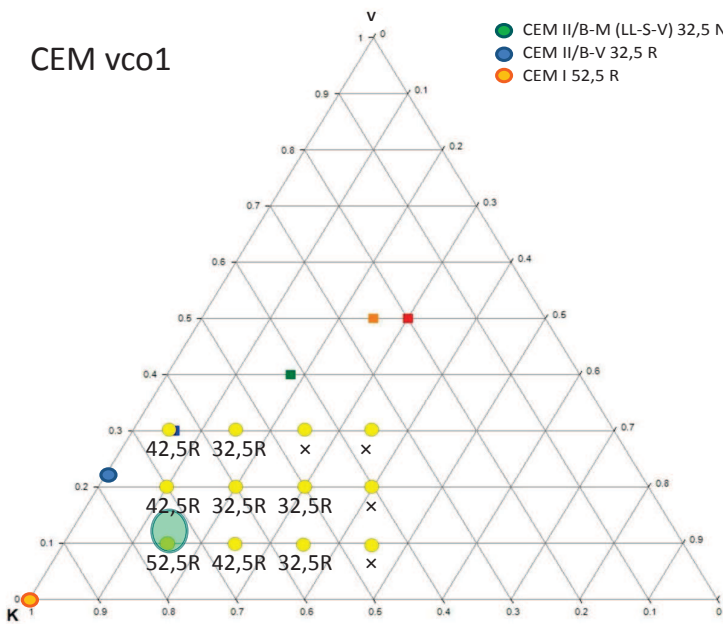


- A 91j : les ciments plus riches en V ont des résistances équivalentes voire meilleures que ceux pauvres en V pour une teneur en K équivalente.

COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION SUR MORTIER (EN 196-1)



COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION SUR MORTIER (EN 196-1)

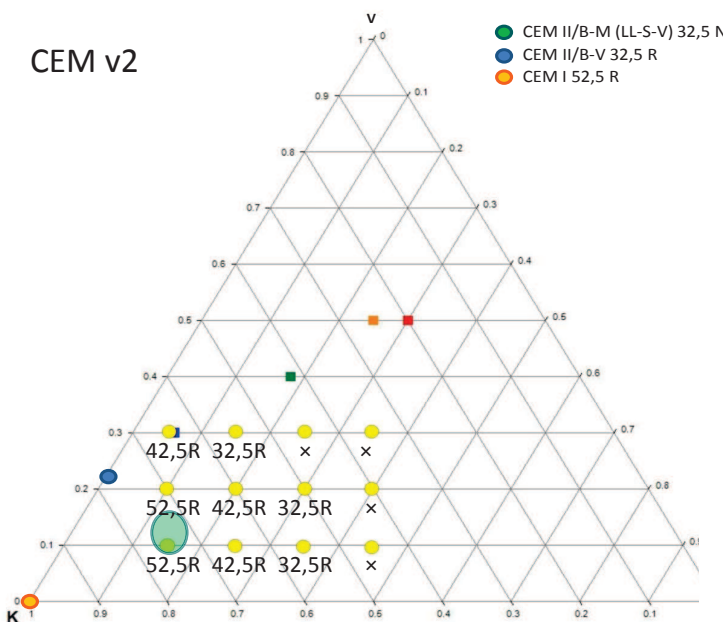


29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

25

COMPORTEMENT DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES HYDRATÉS : RÉSISTANCES À LA COMPRESSION SUR MORTIER (EN 196-1)



CEM v2-FI

● CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N
● CEM II/B-V 32,5 R
● CEM I 52,5 R

- Parmi les 5 formulations étudiées, seuls les CEM 1 et CEM 10 à base de filler impur entrent dans des classes de résistance.

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

26

CONCLUSION

- La finesse accrue d'une cendre volante, une teneur plus élevée en silice réactive, en chaux réactive et en phase amorphe permet d'augmenter sensiblement les performances des ciments.
- Les ciments à base de la cendre de co-combustion engendrent un dégagement de chaleur légèrement plus élevé que les ciments à base de cendre de combustion classique.
- A 12 heures, les ciments à base de cendres ont un dégagement de chaleur équivalent aux ciments à base de laitier. A partir de 41 heures, les ciments à base de laitier dégagent plus de chaleur.
- La cendre de combustion CV2 et la cendre de co-combustion donnent des performances mécaniques très proches. La cendre CV1 présente des performances légèrement inférieures.
- Les nouveaux ciments ternaires à base de cendres volantes deviennent moins performants mécaniquement que les ciments à base de laitier à partir de 28 jours. La différence de performance est plus marquée pour les ciments riches en S/V (30%).

CONCLUSION

- Diminution teneur K :
 - ⇒ Ralentissement et nette diminution des quantités de chaleur d'hydratation dégagées ;
 - ⇒ Diminution des résistances mécaniques.

C'est la composition la moins riche en V et la plus riche en K qui est la plus résistante jusqu'à 91j (CEM 8).
- Plus grandes teneurs V :
 - ⇒ Hydratation plus tardive (calorimétrie Langavant) ;
 - ⇒ Diminution des résistances mécaniques à jeune âge ;
 - ⇒ Meilleures performances à plus longue échéance également en présence de filler calcaire.

C'est la composition la plus riche en V et plus pauvre en L qui est la plus résistante à partir de 91j (CEM 1).

 - ⇒ Augmentation des temps de prise.
- Plus grandes teneurs L pour une même teneur V :
 - ⇒ Hydratation plus tardive (calorimétrie Langavant) ;
 - ⇒ Diminution des résistances mécaniques.

CONCLUSION

Pour une teneur en cendres volantes de (%)		Teneur en filler calcaire maximale acceptable (%)		Quantité totale d'addition (%)	Ciment correspondant
30 V	⇒	15 L	=	45	CEM 2
20 V	⇒	30 L	=	50	CEM 6 (ne passe pas pour CV1)
10 V	⇒	35 L	=	45	CEM 10

- Le filler issu du concassage (contenant calcite, quartz, dolomite, argiles) entraîne :
 - une légère accélération du dégagement de chaleur ;
 - une quantité de chaleur dégagée équivalente au CEM-FP mais légèrement plus élevée dans le cas du ciment plus riche en V et moins riche en L (CEM 1) ;
 - une légère diminution des résistances à la compression après 28 jours.

CONCLUSION

- Cinq formulations parmi les douze de départ à base de la cendre de combustion CV2 ont été sélectionnées pour la poursuite de l'étude : les mêmes que pour CEMCALC I.

Ciment	Classe de résistance (NBN EN 197-1)
CEM I 52,5 R HES	52,5 R
CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N	32,5 N
CEM II/B-V 32,5 R	32,5 R
CEM 1 v2-FP [30V 65K 5L]	52,5 N
CEM 3 v2-FP [30V 45K 25L]	—
CEM 6 v2-FP [20V 50K 30L]	32,5 R
CEM 10 v2-FP [10V 55K 35L]	32,5 R
CEM 12 v2-FP [30V 35K 35L]	—
CEM 6 v2-FI [20V 50K 30L]	—

- INTRODUCTION (CRIC)
- EVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

31

ACTIVATION DES CENDRES VOLANTES



POURQUOI?

- Réaction pouzzolanique tardive des cendres volantes qui s'opère suite à la libération des hydroxydes de calcium $[Ca(OH)_2]$ lors de la réaction d'hydratation du clinker
- Produits d'activation

Type d'activateur	Concentrations [% en masse de ciment]
CaSO ₄ (sulfate)	0 – 7 – 10 et 13
Na ₂ SO ₄ (hybride)	0 – 1 – 3 et 5
NaOH (8M - alcalin)	0 – 15 – 20 et 25

- Sélection finale: Na₂SO₄ (1 et 3%) – ajouté au ciment – E/C constant
- Mesure de l'effet: résistance en compression après 2, 7, 28 et 90 jours
- Ciments

	CEM CALC 1			CEM CALC 2		
	CEM1	CEM6	CEM12	CEM1	CEM6	CEM12
Laitier	30	20	30	-	-	-
Cendres volantes [%]	-	-	-	30	20	30
Clinker [%]	65	50	35	65	50	35
Filler calcaire [%]	5	30	35	5	30	35

29/10/2015

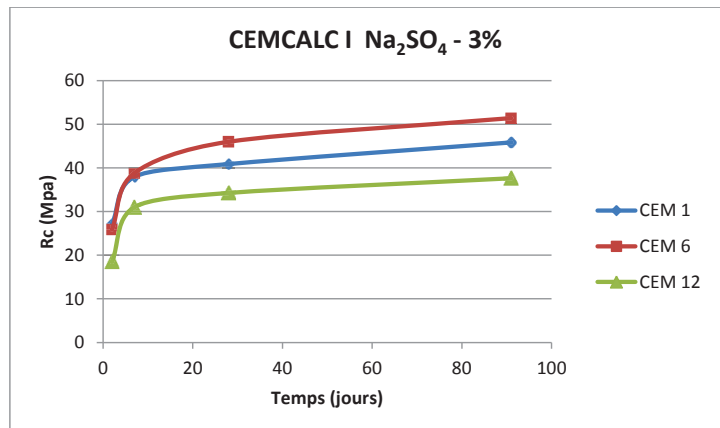
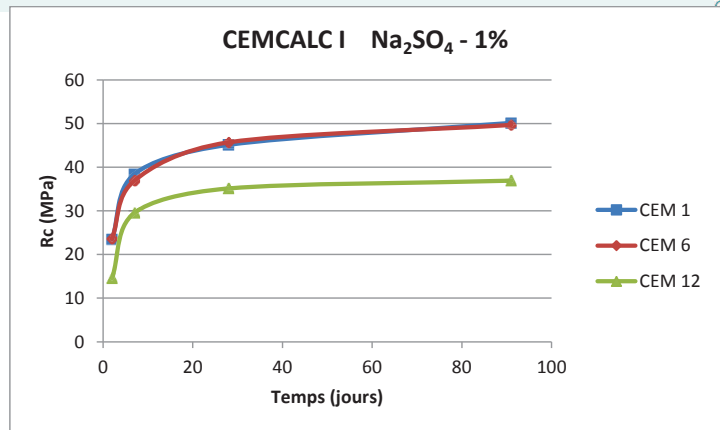
Comité d'accompagnement CemCalc II

32

CEMCALC I

■ Résistances en compression des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 1 et un activateur Na_2SO_4

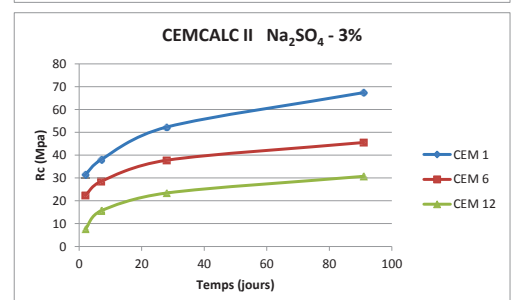
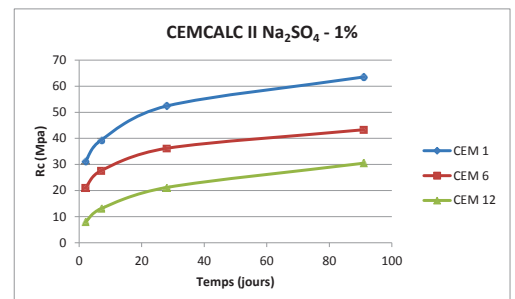
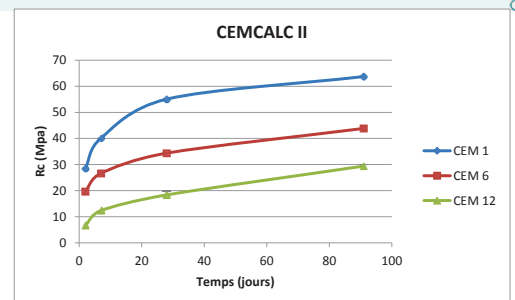
- CEM 12 moins réactif, avec ou sans activateur
- Avec 1% activateur, CEM6 rattrape CEM1 à 28 jours



CEMCALC II

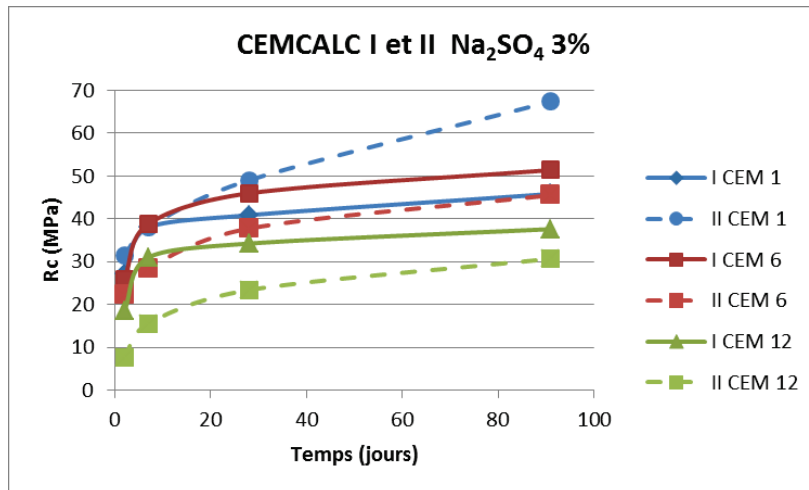
■ Résistances en compression des mortiers fabriqués avec les ciments provenant de CEMCALC 2 et un activateur Na_2SO_4

- Aucun effet de l'activation sur CEM 1 et CEM 6
- CEM 12 offre des résistances à 7 et 28 jours légèrement plus élevées avec 3% Na_2SO_4



CONCLUSIONS

- L'activation avec Na_2SO_4 n'est pas efficace, que ce soit pour les ciments ternaires avec laitier ou avec cendres volantes
- Seule la réactivité des ciments contenant plus de fillers calcaires est légèrement améliorée

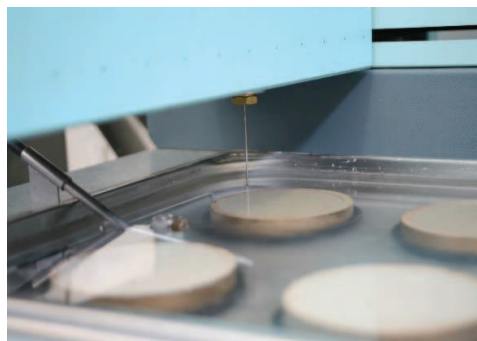


PLAN DE L'EXPOSÉ

- INTRODUCTION (CRIC)
- ÉVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
 - Etude sur mortiers
 - Etude sur bétons
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

MATÉRIEL ET MÉTHODE

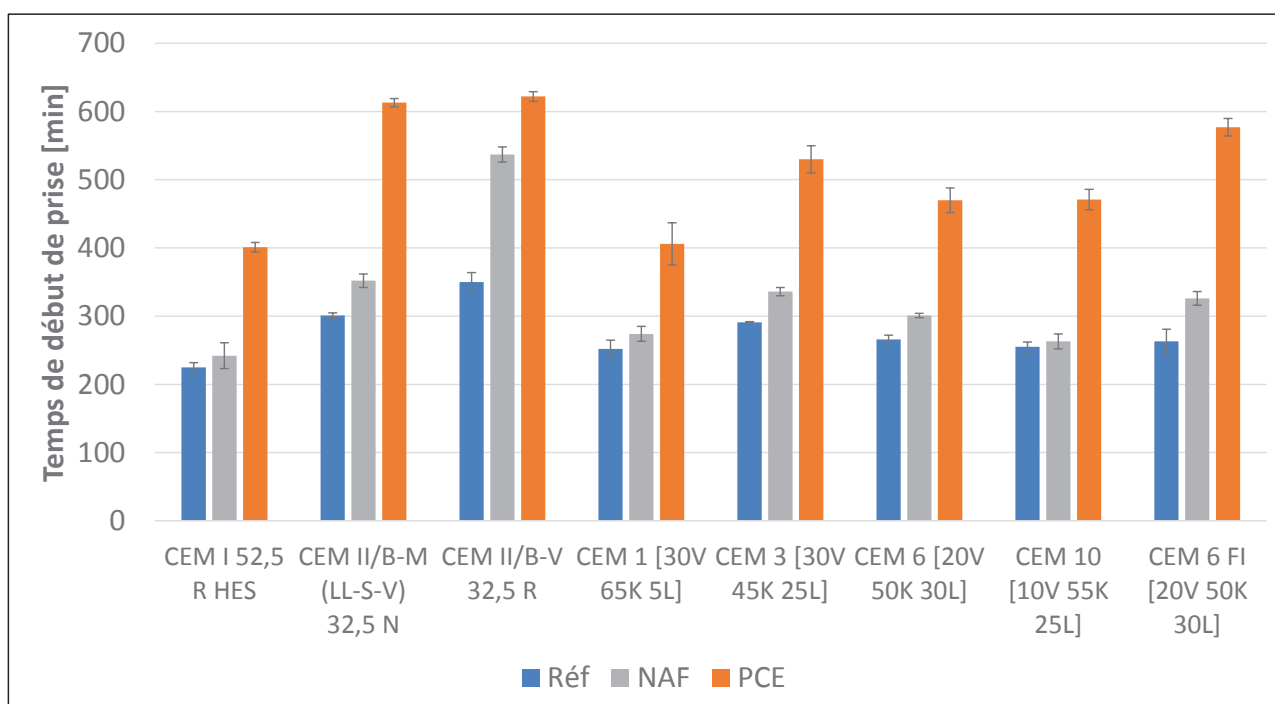
- 8 ciments (3 ciments industriels de référence et 5 ciments CemCalc II)
- 2 superplastifiants
 - SP de nouvelle génération : à base de polycarboxylate (PCE)
 - SP d'ancienne génération : à base de naphthalène (NAF)
- TRA 500 (certification des adjuvants)
 - Mesure de **temps de prise** sur mortiers (NBN EN 480-2)
 - Essais à **consistance constante** et à **dosage maximal en SP** recommandé par le fabricant
 - Signaler si retard > **5h** (édition 5.3, jusque fin 2015)
 - Signaler si retard > **12h** (édition 6.0, à partir de janvier 2016)



COMPATIBILITÉ CIMENT/SP SUR MORTIERS

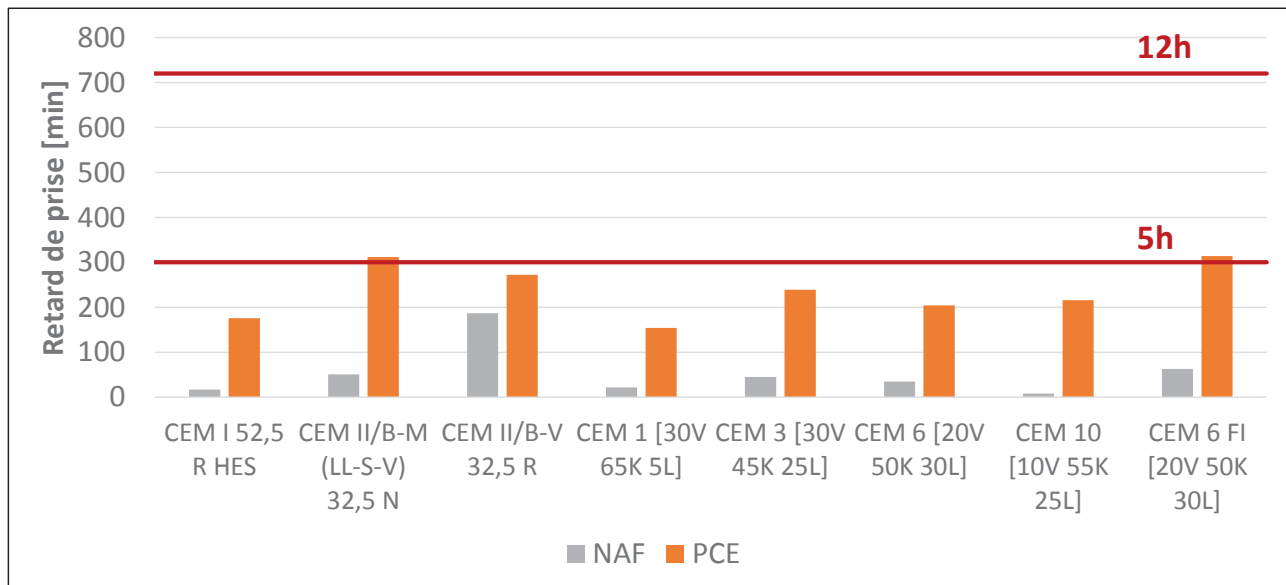
RÉSULTATS

- Le superplastifiant PCE engendre un retard de prise



RÉSULTATS

- Les retards de prise restent largement inférieurs aux 12h
- La présence du filler impur influence la prise
- Les retards de prise se situent dans la même gamme que les ciments industriels



PLAN DE L'EXPOSÉ

- INTRODUCTION (CRIC)
- ÉVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
 - Etude sur mortiers
 - Etude sur bétons
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

ETUDE SUR BÉTONS

■ EN 934-2: teneur en air, résistance en compression, affaissement

■ Matériaux

- 1 sable et 3 granulats
- Sept ciments ternaires
- Deux superplastifiants: PCE (polycarboxylate) et NAF (naphtalène)

■ Béton de référence

Constituants	Quantités [kg/m ³]
Ciment	350
Sable roulé 0/4	496
Concassé calcaire 2/7	590
Concassé calcaire 7/14	506
Concassé calcaire 14/20	283
Superplastifiant	
PCE	0,4%
NAF	0,5%
Eau réellement ajoutée ($E_{\text{eff}} + E_{\text{granulats}} - E_{\text{SP}}$)	177
E/C	0,5
TOTAL (kg/m ³)	+/- 2402

ETUDE SUR BÉTONS

■ EN 934-2: teneur en air, résistance en compression, affaissement

■ Exigences

- **Maintien de la consistance** : 30 min après l'ajout, la consistance du béton adjuvanté ne doit être inférieure à la valeur initiale de la consistance du béton témoin ;
- **Résistance à la compression** : à 28 jours, la résistance du béton adjuvanté est supérieure ou égale à 90% de celle du béton non adjuvanté ;
- **Teneur en air** : pour le béton adjuvanté, la teneur en air est inférieure ou égale à 2% au-dessus de celle du béton témoin.

ETUDE SUR BÉTONS

- **Caractéristiques à l'état frais et à l'état durci des bétons fabriqués avec et sans superplastifiant**

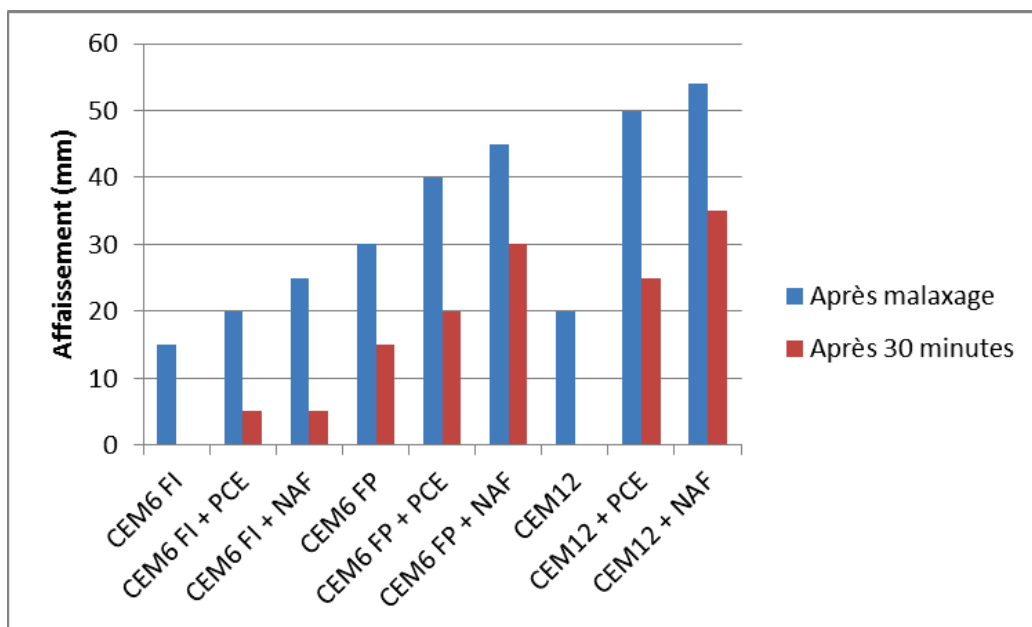
Type de Ciment	Type de Sp	Affaissement			Teneur en air [%]	Masse volumique [kg/m ³]	Rc moyenne [MPa]
		0 minute [mm]	30 minutes [mm]	Perte [%]			
CEM1 [30V 65K 5L]	-	15	5	66	1,8	2396	49,6
	PCE	45	30	33	2,5	2376	44,3
	NAF	45	35	22	1,8	2410	42,7
CEM3 [30V 45K 25L]	-	30	10	66	1,7	2375	27,1
	PCE	60	35	42	2,4	2360	26,3
	NAF	55	30	45	1,8	2413	24,5
CEM6 FI [20V 50K 30L]	-	15	0	100	1,9	2385	35,4
	PCE	20	5	75	2,5	2381	31,3
	NAF	25	5	80	2,3	2386	34,1
CEM6 FP [20V 50K 30L]	-	30	15	50	1,6	2390	31,6
	PCE	40	20	50	2,2	2380	30,1
	NAF	45	30	33	1,3	2401	29,5
CEM10 [10V 55K 35L]	-	10	0	100	2,0	2436	37,7
	PCE	30	10	66	2,4	2409	36,9
	NAF	30	10	66	2,3	2406	36,4
CEM12 [30V 35K 35L]	-	20	0	100	1,5	2395	18,7
	PCE	50	25	50	2,0	2373	15,9
	NAF	54	35	35	1,7	2411	17,6

ETUDE SUR BÉTONS

- **L'affaissement mesuré est toujours plus élevé lorsqu'il est mesuré à la fin du malaxage, par rapport à une mesure après 30 min**
- **Les bétons à base de ciments CEM10 et CEM12 (teneurs en filler calcaire les plus élevées), ont un affaissement faible à l'origine et nul après 30 min lorsqu'un superplastifiant n'est pas ajouté**
- **Les fillers impurs semblent avoir un impact très négatif sur la perte de consistance après 30 min.**
- **L'utilisation de filler pur (CEM6) limite considérablement la perte de consistance**
- **Lorsque des superplastifiants sont utilisés, la valeur d'affaissement à l'origine augmente et la perte après 30 min est moins importante**

ETUDE SUR BÉTONS

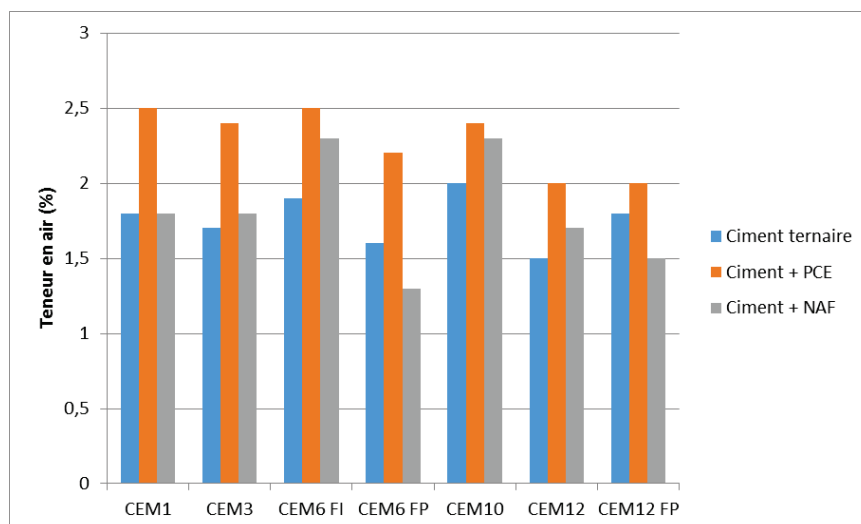
- **A l'exception du CEM6 FI (pour les deux adjuvants) et du CEM6 FP+PCE, les consistances mesurées après 30 min avec adjuvants sont égales ou supérieures à celles des bétons témoins et sont donc conformes à la norme**



COMPATIBILITÉ CIMENT/SP

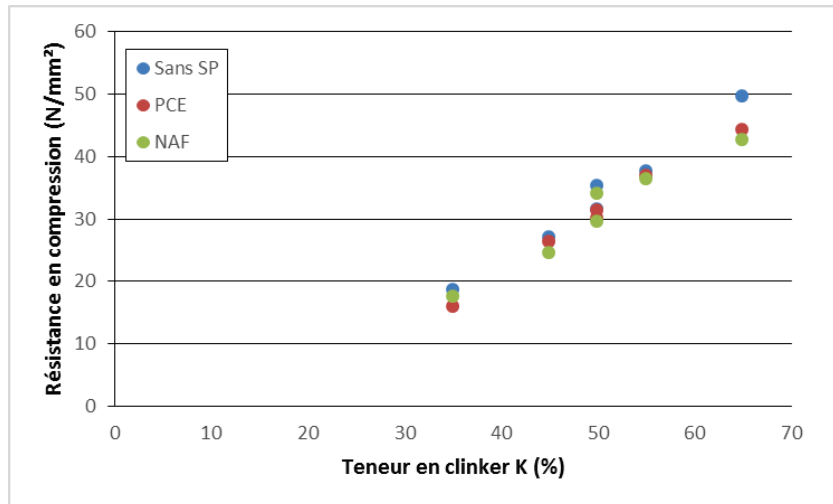
ETUDE SUR BÉTONS

- **La teneur en air augmente de façon systématique avec l'utilisation de superplastifiant de type PCE. Le superplastifiant de type NAF semble avoir un impact plus faible sur la teneur en air**
- **L'augmentation de la teneur en air avec l'ajout de superplastifiant est inférieure à 2%, quel que soit le type de ciment et de superplastifiant**



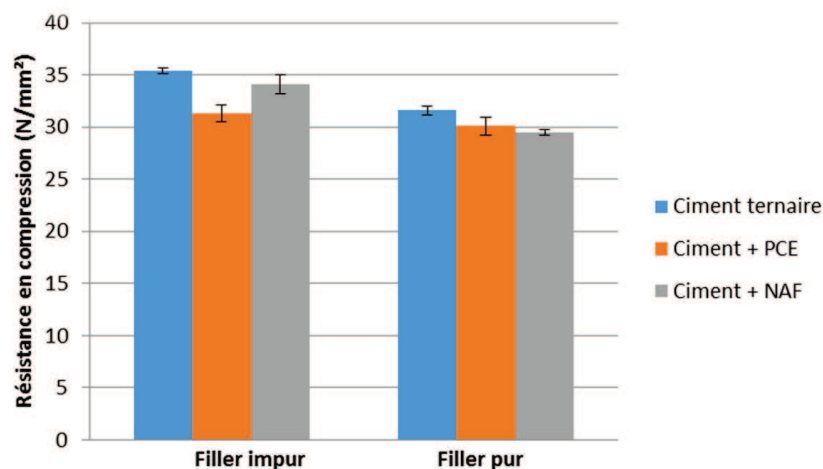
ETUDE SUR BÉTONS

- Les CEM10 présentent des résistances mécaniques doubles de celles des CEM12, alors que la teneur en filler est identique. C'est la teneur en clinker qui semble conditionner principalement les résistances
- Les CEM10 présentent des résistances en compression plus élevées que celles des CEM6 FI, ce qui correspond à nouveau à une plus grande teneur en clinker (55 vs 50%)



ETUDE SUR BÉTONS

- L'utilisation de filler pur à la place de filler impur engendre une perte légère mais systématique de résistance



- Les pertes de résistance par ajout de superplastifiant sont limitées dans la plupart des cas, sauf pour le CEM6 FI + PCE et le CEM12 + PCE, qui ne sont pas conformes à la norme

- INTRODUCTION (CRIC)
- EVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
 - Formulation et confection des bétons et mortiers
 - Etude comparative des performances physico-mécaniques
 - Etude comparative des performances de durabilité
 - Etablissement des règles technologiques
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

49

CONFECTION DES BÉTONS ET MORTIERS

SÉLECTION DES MATÉRIAUX

- **3 ciments industriels de référence**
 - CEM I 52,5 R HES [100K]
 - CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N [9V 71K 13L 7S]
 - CEM II/B-V 32,5 R [22V 78K]
- **5 ciments CemCalc II** fabriqués par mélange de : CEM I 52,5 R, cendres volantes CV2, filler calcaire (pur et impur) et gypse technique
 - CEM 1 [30V 65K 5L]
 - CEM 3 [30V 45K 25L]
 - CEM 6 [20V 50K 30L]
 - CEM 10 [10V 55K 35L]
 - CEM 6 FI [20V 50K 30L]
- **1 superplastifiant** PCE (plage de dosage 0,4 – 2,1%)
- **2 sables** roulés
- **4 granulats** concassés calcaires

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

50

FORMULATION DES BÉTONS ET MORTIERS

■ Trois types de bétons

Caractéristiques	Béton de type 1 T(0,45)	Béton de type 2 T(0,55)	Béton de type 3 T(0,50)
Ciment [kg/m ³]	340	300	320
Rapport E/C [kg/kg]	0.45	0.55	0.50
Classe d'environnement visée	EE4 Gel et agents de déverglaçage	EE2 Gel, mais pas de contact avec la pluie	EE3 Gel et contact avec la pluie (sans sels)
Classe de résistance visée	C35/45	C25/30	C30/37
Classe de consistance visée	S3	S4	S3 – S4
Affaissement visé	+/- 120 mm	+/- 180 mm	+/- 150 mm

2 gâchées / composition
+ 1 gâchée (mauvaise cure)

← 2 gâchées / composition

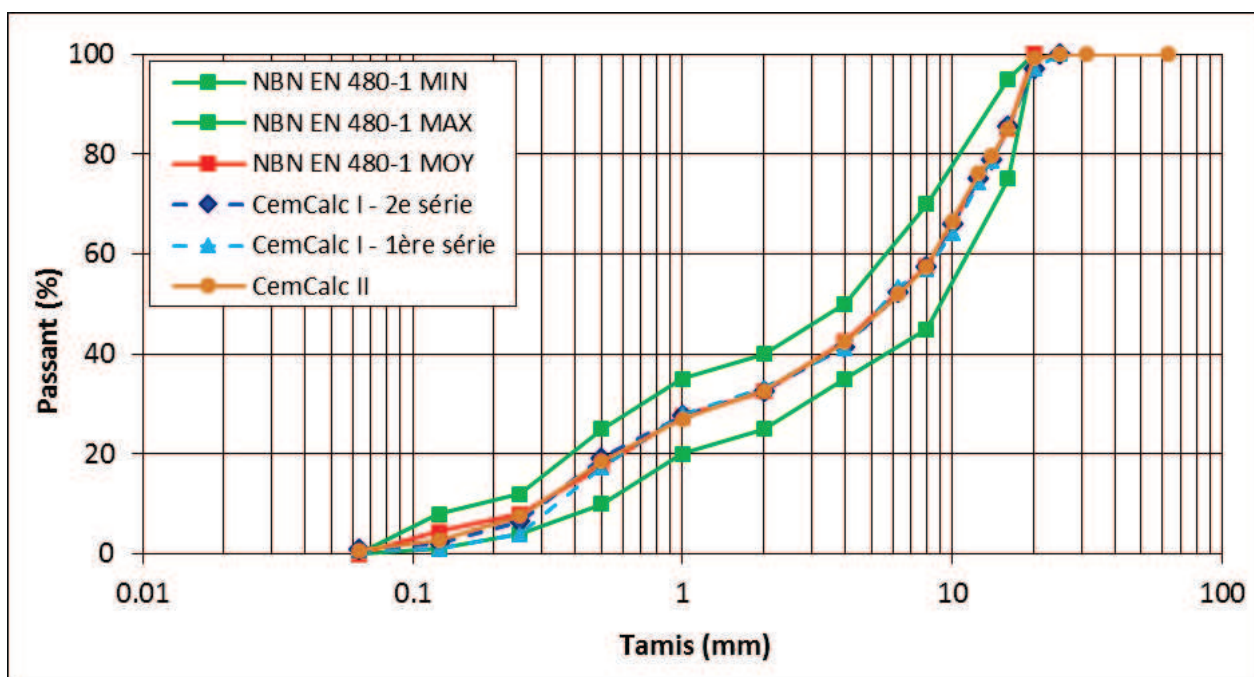
↓ 1 gâchée / composition

■ Un type de mortier normalisé (NBN EN 196-1)

CONFECTION DES BÉTONS ET MORTIERS

FORMULATION DES BÉTONS

■ Squelette granulaire (NBN EN 480-1)



FORMULATION DES BÉTONS

Constituants	Masse des constituants (kg) (pour 1 m ³)		
	Béton type 1 T(0,45)	Béton type 2 T(0,55)	Béton type 3 T(0,50)
Ciment	340	300	320
Sable roulé 0/1	54	54	54
Sable roulé 0/4	685	688	685
Concassé calcaire 4/6	201	201	201
Concassé calcaire 6/10	207	207	207
Concassé calcaire 10/14	341	342	341
Concassé calcaire 14/20	397	399	397
Superplastifiant PCE	0.7 – 2	0.6 – 1.3	0.7 – 1
Eau à ajouter réellement ($E_{\text{eff}} + E_{\text{granulats}} - E_{\text{SP}}$)	160	172	167
TOTAL [kg/m³]	+/- 2389	+/- 2368	+/- 2377

PLAN DE L'EXPOSÉ

- INTRODUCTION (CRIC)
- ÉVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
 - Formulation et confection des bétons et mortiers
 - Etude comparative des performances physico-mécaniques
 - Etude comparative des performances de durabilité
 - Etablissement des règles technologiques
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

MÉTHODOLOGIE D'ANALYSE DES RÉSULTATS

- **Analyse des résultats bruts** : comparaison des résultats entre les ciments de référence et les ciments CemCalc II
- **Facteurs d'influence** : composition
- Sensibilité à la **cure**
- Influence du **filler impur**
- **Comparaison** avec les résultats de **CemCalc I** (ciments K-S-L)
- **Critères d'évaluation de la NBN B 15-100** « Méthodologie pour l'évaluation et l'attestation de l'aptitude à l'emploi de ciments et d'additions de type II destinés au béton »

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

55

PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

LISTING DES ESSAIS MÉCANIQUES

Béton	Ciment	E_{eff}/C	f_{ck}	f_{cf}	f_{ct}	E	Fluage	Retrait	Prise	f_{ck}
TYPE 1 ($E/C = 0.45$ et $C = 340$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.45	•	•	•	•		•	•	•
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.45	•	•	•	•		•	•	
	CEM II/B-V 32.5 R	0.45	•	•	•	•	•	•	•	•
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.45	•	•	•	•		•	•	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.45	•	•	•	•		•	•	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.45	•	•	•	•	•	•	•	•
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.45	•	•	•	•		•	•	
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	0.45	•	•	•	•	•	•	•	•
TYPE 2 ($E/C = 0.55$ et $C = 300$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.55	•	•	•	•		•		
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.55	•	•	•	•		•		
	CEM II/B-V 32.5 R	0.55	•	•	•	•		•		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.55	•	•	•	•		•		
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.55	•	•	•	•		•		
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.55	•	•	•	•		•		
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.55	•	•	•	•		•		
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	0.55	•	•	•	•		•		
TYPE 3 ($E/C = 0.50$ et $C = 300$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.50	•							
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.50	•							
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.50	•							
CURE			28 j sous eau à 20°C			7 j sous eau à 20°C + 21 j CC (20°C et 60% HR)		Pas de cure	Mauvaise cure : 28 j CC	

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

56

CARACTÉRISATION DES BÉTONS À L'ÉTAT FRAIS

Béton	Ciment	E_{eff}/C	Ciment [kg/m ³]	PCE [% de ciment]	Affaissement [mm]	MV [kg/m ³]	Air [%]
TYPE 1 ($E/C = 0.45$ et $C = 340$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.45	340	2	110 / 210 / 210	2407	2.1
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.45	340	1	70 / 110	2399	2.2
	CEM II/B-V 32.5 R	0.45	340	0.85	90 / 100 / 120	2354	3.0
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.45	340	1.2	120 / 145	2369	2.1
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.45	340	0.7	130 / 140	2381	1.7
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.45	340	0.7	90 / 110 / 105	2387	2.2
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.45	340	1	95 / 125	2378	2.0
	CEM 6 [20V 50K 30L] – FI	0.45	340	1.4	110 / 140 / 160	2354	3.0
TYPE 2 ($E/C = 0.55$ et $C = 300$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.55	300	1.3	170 / 170	2396	1.8
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.55	300	0.6	180 / 140	2385	1.6
	CEM II/B-V 32.5 R	0.55	300	0.6	170 / 160	2357	1.5
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.55	300	0.8	180 / 200	2375	1.4
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.55	300	0.6	160 / 160	2372	1.5
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.55	300	0.6	180 / 200	2359	1.4
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.55	300	0.7	190 / 190	2373	1.5
	CEM 6 [20V 50K 30L] – FI	0.55	300	1.2	170 / 190	2361	2.2
TYPE 3 ($E/C = 0.50$ et $C = 300$ kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.50	320	1	160	2400	2
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.50	320	0.7	170	2381	2
	CEM 6 [20V 50K 30 L]	0.50	320	0.7	170	2362	1.8

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

57

PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

ESSAI DE PRISE KELLY-BRYANT

■ Norme NBN B 15-204

- Principe : suivre l'évolution du béton au cours de sa prise en mesurant la force nécessaire pour arracher une à une des tiges métalliques noyées dans le béton
- Moules 15 x 15 x 60 cm³ munis de 10 tiges en acier inox
- Tiges retirées à intervalles réguliers



29/10/2015

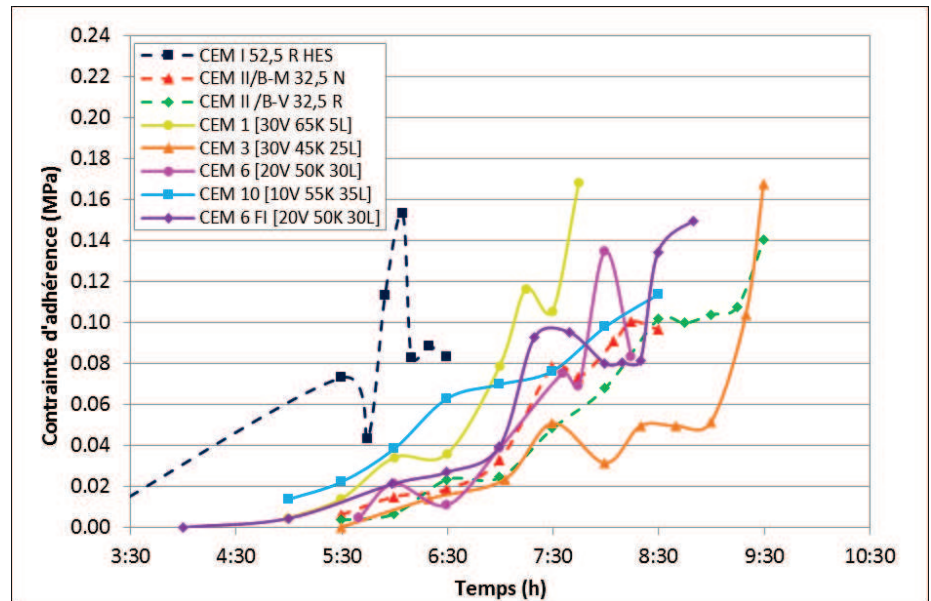
Comité d'accompagnement CemCalc II

58

ESSAI DE PRISE KELLY-BRYANT

■ Résultats

- Temps de prise intermédiaires entre les ciments de référence (CEM 3 isolé)
- Temps de prise proportionnel à $1/[K]$
- Pas d'influence significative du filler impur



PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

FACTEUR S – NORME NBN B 15-100

- **Coefficient** qui dépend du type de ciment (NBN EN 1992-1-1 «Eurocode 2»)
 - 0.20 pour les ciments de classe R (CEM 42.5 R, 52.5 N et 52.5 R)
 - 0.25 pour les ciments de classe N (CEM 32.5 R et 42.5 N)
 - 0.38 pour les ciments de classe S (CEM 32.5 N)

Ciment	Classe de résistance du ciment (NBN EN 197-1)	Coefficient s (NBN EN 1992-1-1)
CEM I 52.5 R HES	52.5 R	0.20
CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	32.5 N	0.38
CEM II/B-V 32.5 R	32.5 R	0.25
CEM 1 [30V 65K 5L]	52.5 N	0.20
CEM 3 [30V 45K 25L]	-	-
CEM 6 [20V 50K 30L]	32.5 R	0.25
CEM 10 [10V 55K 35L]	32.5 R	0.25
CEM 6 FI [20V 50K 30L]	-	-

Les nouveaux ciments ternaires sont de classe R ($s = 0.20$) ou N ($s = 0.25$), excepté les CEM 3 et CEM 6 FI.

RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

■ Norme NBN EN 12390-3

- 3 cubes 15 x 15 x 15 cm³
- Cure : sous eau (bonne cure) et en chambre climatique (mauvaise cure)
- Résistances à 2, 7, 28 et 91 jours



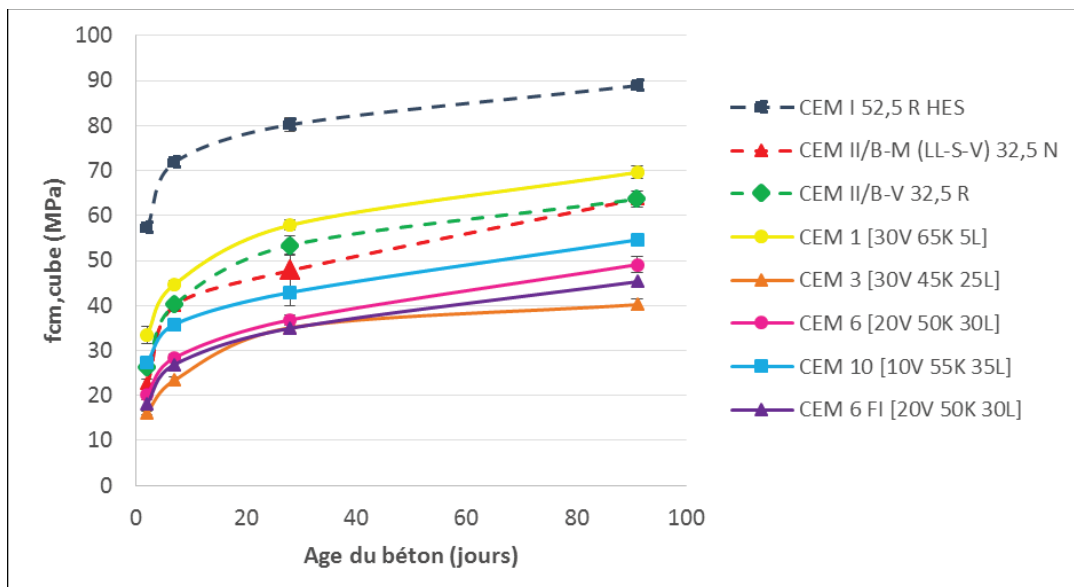
■ Critère NBN B 15-100 : $f_{ck,cyl} = \frac{f_{cm,cube}}{1.2} - 8$

PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

- Rc inférieurs par rapport aux ciments de référence, excepté le CEM 1 [30V 65K 5L]
- Rc proportionnel à [K]
- Pas d'influence significative du filler impur



RÉSISTANCE À LA COMPRESSION

Béton	Ciment	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]				$r = f_{cm2} / f_{cm28}$	$f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]
		f_{cm2}	f_{cm7}	f_{cm28}	f_{cm91}		
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	57.4	71.8	81.6 / 78.8	88.9	0.72	58.8
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	22.7	40.1	48.5 / 47.2	63.7	0.47	31.9
	CEM II/B-V 32.5 R	26.4	40.2	53 / 53.7	63.6	0.49	36.5
	CEM 1 [30V 65K 5L]	33.5	44.7	56.6 / 59.1	69.6	0.58	40.2
	CEM 3 [30V 45K 25L]	16.2	23.4	° / 35.07	40.2	0.46	16.5
	CEM 6 [20V 50K 30L]	20.3	28.4	40.5 / 33.1*	49.1	0.50	22.7
	CEM 10 [10V 55K 35L]	27.3	35.8	43.6 / 42.2	54.6	0.64	27.8
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	18.2	26.9	34.4 / 35.5	45.3	0.52	21.1
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	42.7	55.1	65.9 / 64	73.9	0.66	46.1
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	13.2	20.2	34.3 / 35.37	44	0.38	21
	CEM II/B-V 32.5 R	15.9	28.8	40.9 / 39.5	52.1	0.40	25.5
	CEM 1 [30V 65K 5L]	19.4	29.2	35.1 / 37.8	48.3	0.53	22.4
	CEM 3 [30V 45K 25L]	9.6	12.5	20.8 / 19.9	29.1	0.47	8.9
	CEM 6 [20V 50K 30L]	11	15.7	23.7 / 24.3	30.9	0.46	12
	CEM 10 [10V 55K 35L]	15.1	22	21.5 / 26.5	35.5	0.63	12
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	10.6	°	23.2 / 24.1	32.4	0.45	11.7
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	-	-	70.1	-	-	50.4
	CEM 1 [30V 65K 5L]	-	-	43.5	-	-	28.3
	CEM 6 [20V 50K 30L]	-	-	29.5	-	-	16.6

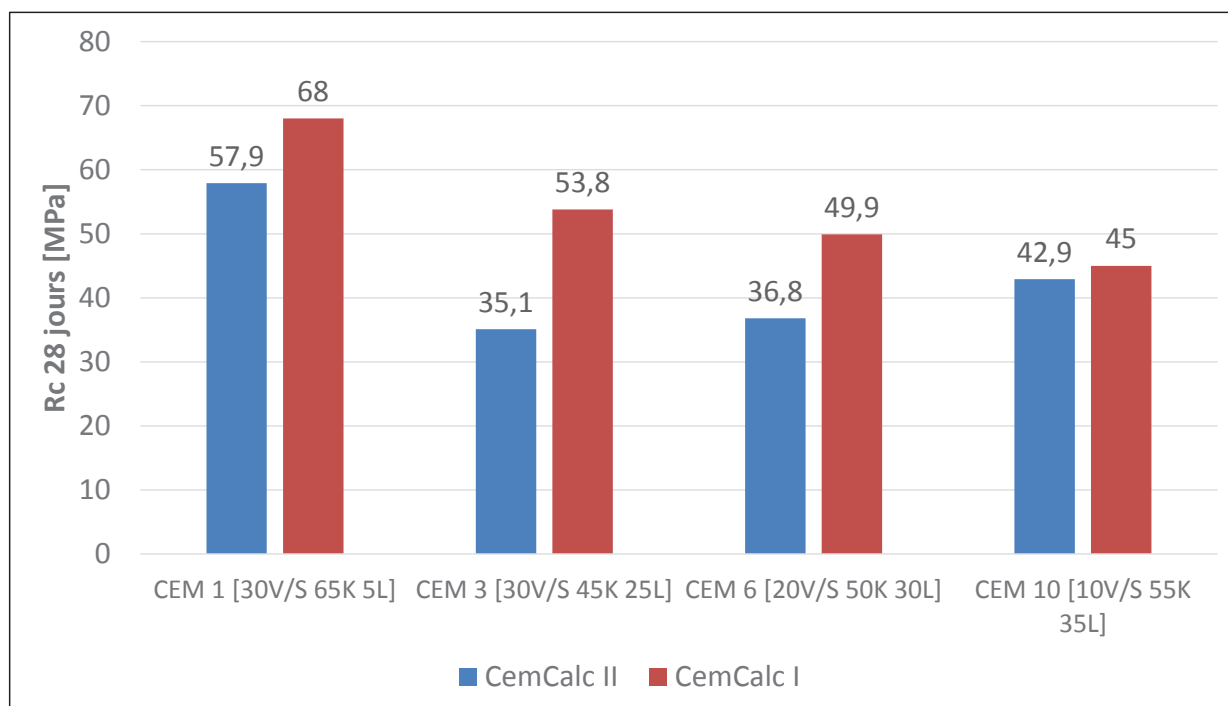
PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

RÉSISTANCE À LA COMPRESSION – INFLUENCE MAUVAISE CURE

Béton	Ciment	$f_{cm,cube}$ [N/mm ²]				$r = f_{cm2} / f_{cm28}$	$f_{ck,cyl}$ [N/mm ²]
		f_{cm2}	f_{cm7}	f_{cm28}	f_{cm91}		
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	-	-	78.3	-	-	57.3
	CEM II/B-V 32.5 R	-	-	48.6	-	-	32.5
	CEM 6 [20V 50K 30L]	-	-	34.5	-	-	20.8
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	-	-	37.5*	-	-	23.3

RÉSISTANCE À LA COMPRESSION – COMPARAISON AVEC CEMCALC I

■ Les résistances en compression des ciments KVL (CemCalc II) sont inférieures



PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

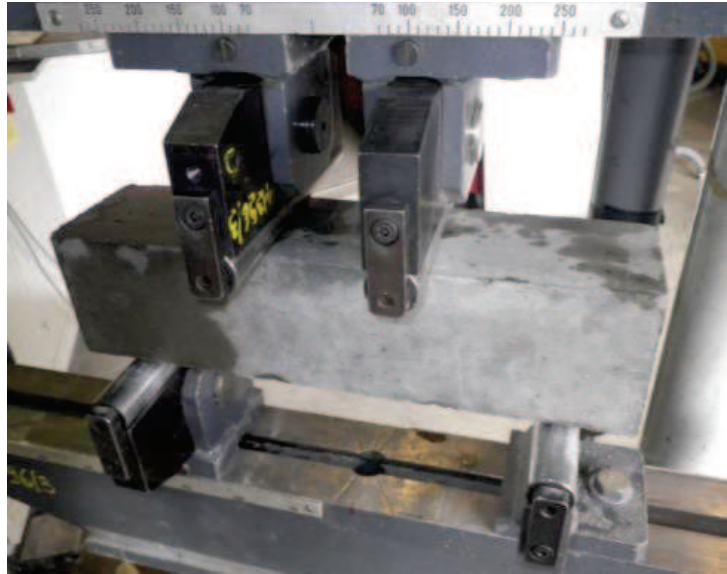
RÉSISTANCE À LA COMPRESSION – CLASSES DE RÉSISTANCE

Béton	Ciment	$f_{ck,cyl}$ [MPa]	Classe de résistance du béton (NBN EN 206-1)								
			12/15	16/20	20/25	25/30	30/37	35/45	40/50	45/55	50/60
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	58.8	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	31.9	X	X	X	X	X				
	CEM II/B-V 32.5 R	36.5	X	X	X	X	X	X			
	CEM 1 [30V 65K 5L]	40.2	X	X	X	X	X	X	X		
	CEM 3 [30V 45K 25L]	16.5	X	X							
	CEM 6 [20V 50K 30L]	22.7	X	X	X						
	CEM 10 [10V 55K 35L]	27.8	X	X	X	X					
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	21.1	X	X	X						
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	46.1	X	X	X	X	X	X	X	X	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	21	X	X	X						
	CEM II/B-V 32.5 R	25.5	X	X	X	X					
	CEM 1 [30V 65K 5L]	22.4	X	X	X						
	CEM 3 [30V 45K 25L]	8.9									
	CEM 6 [20V 50K 30L]	12	X								
	CEM 10 [10V 55K 35L]	12	X								
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	11.7									
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	50.4	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	CEM 1 [30V 65K 5L]	28.3	X	X	X	X					
	CEM 6 [20V 50K 30L]	16.6	X	X							

RÉSISTANCE À LA FLEXION

■ Norme NBN EN 12390-5

- Flexion en 4 points
- 3 prismes 10 x 10 x 40 cm³
- Cure : 28 jours sous eau

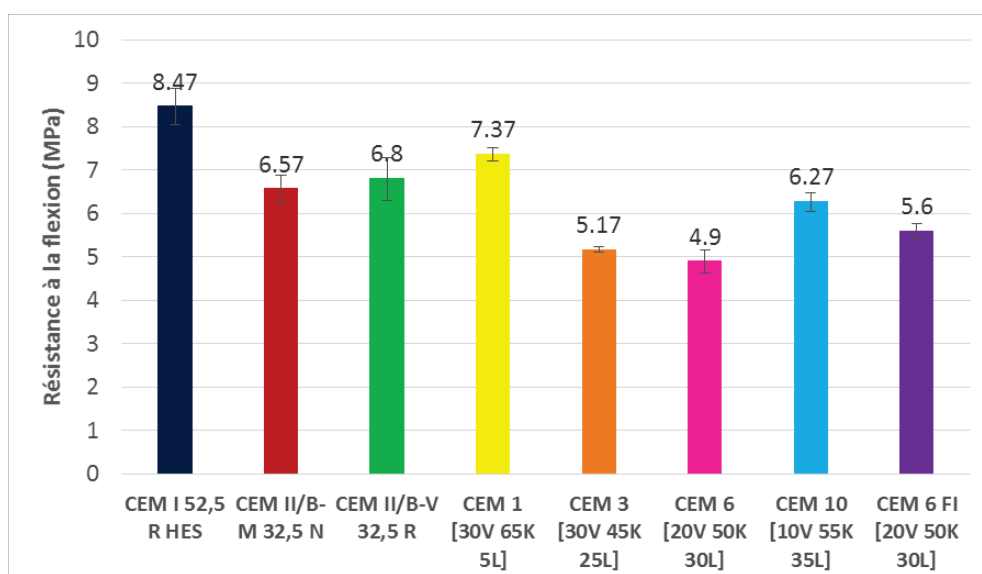


PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

RÉSISTANCE À LA FLEXION

■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

- Rf inférieurs par rapport aux ciments de référence, excepté le CEM 1 [30V 65K 5L]
- Rf proportionnel à [K]
- Pas d'influence significative du filler impur



RÉSISTANCE À LA TRACTION PAR FENDAGE

Norme NBN EN 12390-6

- Principe : éprouvette cylindrique soumise sur toute sa génératrice à un effort de compression; les contraintes de traction orthogonales qui en résultent provoquent la rupture de l'éprouvette par traction
- 6 carottes 113 Ø x 113 mm hauteur
- Cure : 28 jours sous eau



Critère NBN B 15-100 : 5 des 6 valeurs entre :

$$f_{ct,sp,5\%} = 0.23 \left(\frac{f_{cm,cube}}{1.2} - 8 \right)^{2/3}$$

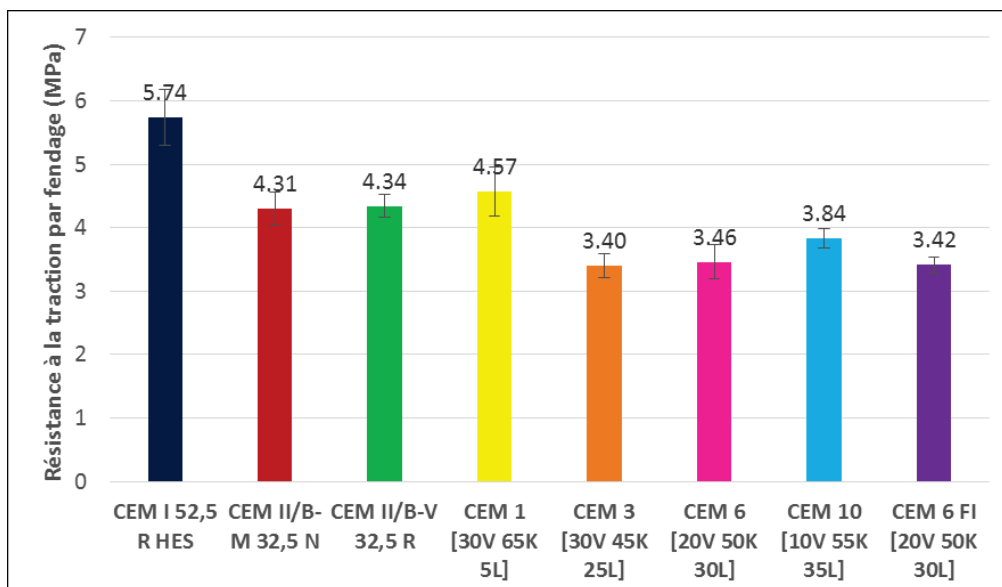
$$f_{ct,sp,95\%} = 0.43 \left(\frac{f_{cm,cube}}{1.2} - 8 \right)^{2/3}$$

PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

RÉSISTANCE À LA TRACTION PAR FENDAGE

Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

- Rt inférieurs par rapport aux ciments de référence, excepté le CEM 1 [30V 65K 5L]
- Rt proportionnel à [K]
- Pas d'influence significative du filler impur



RÉSISTANCE À LA TRACTION PAR FENDAGE – CRITÈRE NBN B 15-100

Béton	Ciment	fct,28 [MPa]						fctm,28 [MPa]		NBN B 15-100	
		1	2	3	4	5	6	fctm	σ	fct,sp,5%	fct,sp,95%
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	5.09	6.25	5.75	5.4	5.78	6.14	5.74	0.44	3.48	6.50
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	4.76	4.36	4.21	4.3	3.97	4.24	4.31	0.26	2.31	4.32
	CEM II/B-V 32.5 R	4.25	4.37	4.19	4.34	4.21	4.68	4.34	0.18	2.53	4.73
	CEM 1 [30V 65K 5L]	4.84	4.73	4.08	4.34	5.12	4.3	4.57	0.39	2.70	5.05
	CEM 3 [30V 45K 25L]	3.08	3.43	3.3	3.48	3.6	3.53	3.40	0.19	1.76	3.30
	CEM 6 [20V 50K 30L]	3.99	3.32	3.32	3.41	3.45	3.26	3.46	0.27	1.84	3.44
	CEM 10 [10V 55K 35L]	3.77	3.81	3.66	3.75	4.03	4.02	3.84	0.15	2.11	3.94
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	3.46	3.43	3.44	3.25	3.6	3.31	3.42	0.12	1.76	3.29
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	4.76	4.43	5.04	5.02	5.12	4.63	4.83	0.27	2.96	5.53
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	3.52	3.86	4	3.35	3.49	3.18	3.57	0.31	1.75	3.28
	CEM II/B-V 32.5 R	3.47	3.57	3.06	3.21	3.51	3.33	3.36	0.20	1.99	3.73
	CEM 1 [30V 65K 5L]	4.17	3.74	3.44	3.72	3.54	3.28	3.65	0.31	1.83	3.41
	CEM 3 [30V 45K 25L]	2.68	2.60	2.98	2.7	2.86	2.89	2.79	0.15	0.99	1.85
	CEM 6 [20V 50K 30L]	2.74	2.69	2.36	3.08	2.87	3.11	2.81	0.28	1.21	2.25
	CEM 10 [10V 55K 35L]	2.74	3.24	2.99	3.24	3.45	2.84	3.08	0.27	1.21	2.25
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	2.95	2.78	2.54	2.87	3.02	2.75	2.82	0.17	1.19	2.22

PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

MODULE D'ÉLASTICITÉ

■ Norme NBN B 15-203

- Principe : mesurer les déformations longitudinales d'une éprouvette soumise à un effort de compression croissant (jusqu'à 1/3 Rc)
- 3 prismes 10 x 10 x 40 cm³
- Cure : 7 j sous eau (identique à celle du fluage) puis 21 j en CC

$$E_c = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$



Critère NBN B 15-100 :

$E_{cm,28}$ compris entre E_{cm1} et E_{cm2}

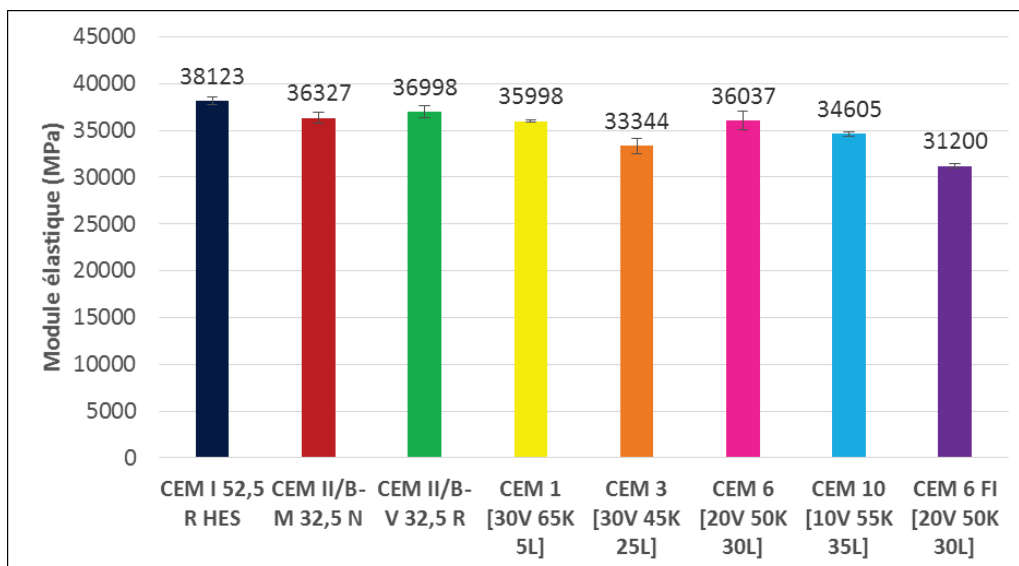
$$E_{cm1} = 21 \left(\frac{(f_{cm,cube}/1.2) - 8}{10} \right)^{0.3}$$

$$E_{cm2} = 23 \left(\frac{(f_{cm,cube}/1.2) + 8}{10} \right)^{0.3}$$

MODULE D'ÉLASTICITÉ

■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

- Modules E inférieurs par rapport aux ciments de référence
- Module E proportionnel à [K]
- Module E le plus faible avec CEM 6 FI



PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

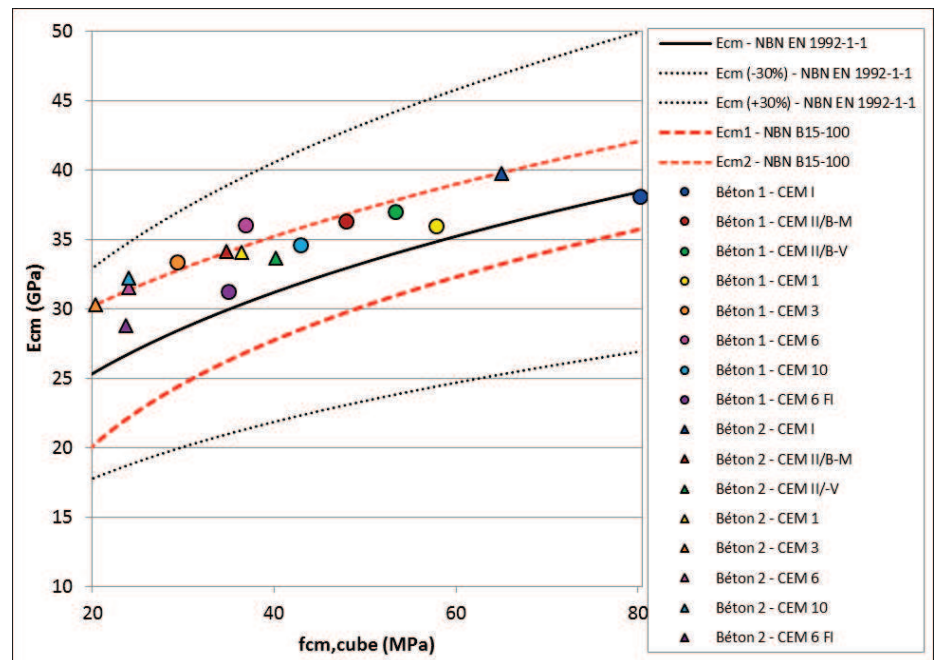
MODULE D'ÉLASTICITÉ – CRITÈRE NBN B 15-100

Béton	Ciment	Module d'élasticité à 28 jours (N/mm ²)		Critère de la NBN B 15-100 (N/mm ²)	
		E _{cm}	σ	E _{cm1}	E _{cm2}
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	38123	426	35736	42068
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	36327	591	29734	36793
	CEM II/B-V 32.5 R	36998	625	30957	37816
	CEM 1 [30V 65K 5L]	35998	126	31880	38607
	CEM 3 [30V 45K 25L]	33344	823	24399	32752
	CEM 6 [20V 50K 30L]	36037	973	26843	34509
	CEM 10 [10V 55K 35L]	34605	216	28523	35811
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	31200	231	26282	34090
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	39729*	655	33220	39784
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	34090	1519	26246	34064
	CEM II/B-V 32.5 R	33623	964	27809	35249
	CEM 1 [30V 65K 5L]	34025	654	26739	34430
	CEM 3 [30V 45K 25L]	30279	644	20318	30262
	CEM 6 [20V 50K 30L]	31454	877	22181	31324
	CEM 10 [10V 55K 35L]	32195	1798	22181	31324
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	28749	437	22017	31226

MODULE D'ÉLASTICITÉ

Relation E_{cm} vs f_{cm}

- Tous les bétons sont situés entre les limites +30% et -30% de E_{cm} théorique (Model Code 1978)
- Granulats calcaires utilisés 10/14 : LA faible (20)



29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

75

PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

RETRAIT

Norme NBN B 15-216

- Principe : mesurer la variation de longueur d'éprouvettes conservées dans des conditions thermiques ($20 \pm 2^\circ\text{C}$) et hygrométriques ($60 \pm 5\%$ HR) constantes
- 3 prismes $10 \times 10 \times 40 \text{ cm}^3$
- Cure : 7 j sous eau (identique à celle du fluage)



29/10/2015

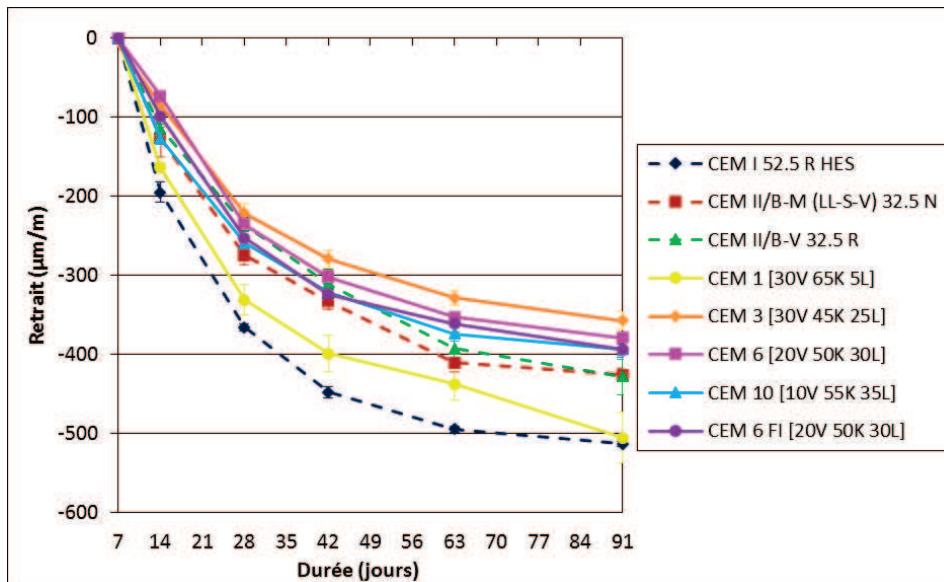
Comité d'accompagnement CemCalc II

76

RETRAIT

■ Résultats – E/C de 0.55 et C de 300 kg/m³

- Retraits inférieurs aux ciments de référence
- Retrait proportionnel à [K]
- Pas d'influence significative du filler impur



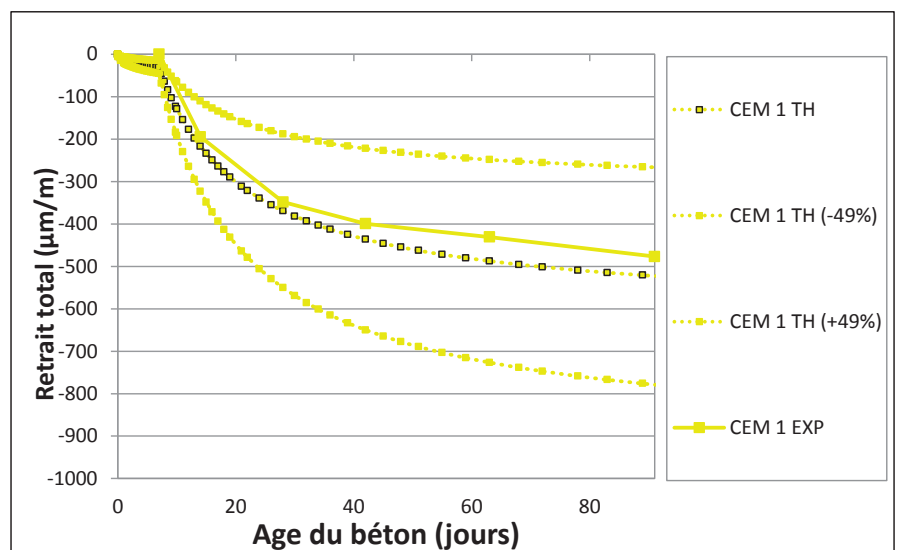
PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

RETRAIT – CRITÈRE NBN B15-100

■ **Critère NBN B 15-100** : courbe expérimentale comprise entre -49% et +49% de la courbe théorique (NBN EN 1992-1-1)

■ **Paramètres** de calcul de la courbe théorique :

- Classe de résistance du ciment
- Classe de résistance du béton
- Rayon moyen de la section transversale : 50 mm
- Humidité relative : 60 %
- Cure : 7 j sous eau



■ **Retrait exp < Retrait théo**

FLUAGE

■ Norme NBN B 15-228

- Principe : mesurer les déformations longitudinales d'éprouvettes soumises à un effort de compression constant durant une longue période
- 3 prismes 10 x 10 x 40 cm³
- Cure : 7 j sous eau



$$\varepsilon_{\text{fluage}} = \varepsilon_{\text{tot}} - \varepsilon_i - \varepsilon_{\text{retrait}}$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sigma_f \text{ appliquée}}{E_{cm,28}}$$

$$\varphi(t, t_0) = \frac{\varepsilon_{\text{fluage}}}{\varepsilon_i}$$

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

79

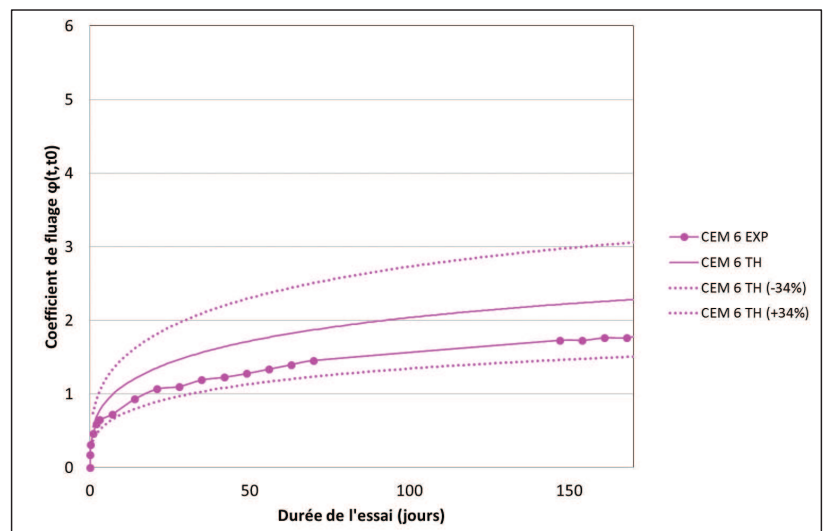
PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

FLUAGE

■ **Critère NBN B 15-100** : courbe expérimentale comprise entre -34% et +34% de la courbe théorique (NBN EN 1992-1-1)

■ Paramètres de calcul de la courbe théorique :

- $f_{ck,cyl}$
- Humidité relative : 60%
- Âge des béton au début des essais : 28 jours
- Ciments à prise normale (classe N)
- Rayon moyen de la section transversale : 50 mm



29/10/2015

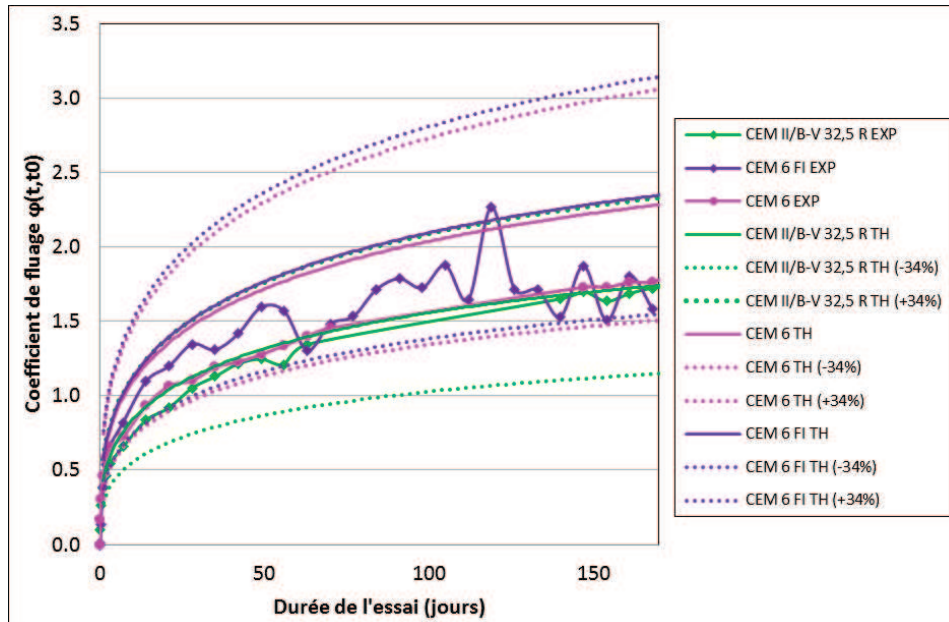
Comité d'accompagnement CemCalc II

80

FLUAGE

■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

- Coefficients de fluage CEM 6 et CEM II/B-V semblables
- Légère influence du filler impur



PERFORMANCES PHYSICO-MÉCANIQUES

CONCLUSIONS SUR BASE DES CHOIX RÉALISÉS DANS CETTE ÉTUDE

- Le **temps de prise** est principalement influencé par la teneur en clinker [K].
- Les **propriétés mécaniques** sont principalement proportionnelles à la teneur en clinker [K]. Toutes les propriétés mécaniques sont corrélées à la résistance en compression.
- La **mauvaise cure** des bétons entraîne une légère influence sur les résistances en compression.
- La présence de **filler impur** a une influence sur les propriétés du béton frais et généralement pas sur les propriétés mécaniques à l'état durci.
- Le **laitier** (CemCalc I) semble mieux contribuer aux résistances mécaniques par rapport aux cendres volantes (CemCalc II).

Béton	Ciment	Durcissement Facteurs	f_{ck} Classe	Traction $f_{ct,5\%} \leftrightarrow f_{ct,95\%}$	Module E $E_{cm1} \leftrightarrow E_{cm2}$	Retrait -49% \leftrightarrow +49% TH	Fluage -34% \leftrightarrow +34% TH
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	0.20	C50/60	✓	✓	✓	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.38	C30/37	X(*)	✓	✓	
	CEM II/B-V 32.5 R	0.25	C35/45	✓	✓	✓	✓
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.20	C40/50	✓	✓	✓	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	-	C16/20	X(*)	X(*)	✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.25	C20/25	X(*)	X(*)	✓	✓
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.25	C25/30	X(*)	✓	✓	
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	-	C20/25	X(*)	✓	✓	✓
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	0.20	C45/55	✓	X(*)	✓	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.38	C20/25	X(*)	X(*)	✓	
	CEM II/B-V 32.5 R	0.25	C25/30	✓	✓	✓	
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.20	C20/25	X(*)	✓	✓	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	-	-	X(*)	X(*)	✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.25	C12/15	X(*)	X(*)	✓	
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.25	C12/15	X(*)	X(*)	✓	
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	-	-	X(*)	✓	✓	
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	0.20	C50/60				
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.20	C25/30				
	CEM 6 [20V 50K 30L]	0.25	C16/20				

✓ : critère respecté – X : critère non respecté

(*) : critère de la NBN B 15-100 non respecté mais critère du Model Code de 1978 respecté

(^x) : critère de la NBN B 15-100 non respecté mais résistance à la traction supérieure à la limite supérieure $f_{ct,95\%}$

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

83

PLAN DE L'EXPOSÉ

- INTRODUCTION (CRIC)
- ÉVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
 - Formulation et confection des bétons et mortiers
 - Etude comparative des performances physico-mécaniques
 - Etude comparative des performances de durabilité
 - Etablissement des règles technologiques
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

84

LISTING DES ESSAIS DE DURABILITÉ

Béton	Ciment	E _{eff} /C	CO ₂	Gel sels	Gel interne	Cl-	SO ₄ ²⁻	Abs eau	Perméabilité	CO ₂	Gel sels	Cl-	Perméabilité	
TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.45	•	•		•		•	•	•	•	•	•	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.45	•	•		•		•	•	•	•	•	•	
	CEM II/B-V 32.5 R	0.45	•	•		•		•	•	•	•	•	•	
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.45	•	•		•		•	•	•	•	•	•	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.45	•	•		•		•	•	•	•	•	•	
	CEM 6 [20V 50 K 30 L]	0.45	•	•		•		•	•	•	•	•	•	
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.45	•	•		•		•	•	•	•	•	•	
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	0.45	•	•		•		•	•	•	•	•	•	
TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.55	•						•					
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.55	•						•					
	CEM II/B-V 32.5 R	0.55	•						•					
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.55	•						•					
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.55	•						•					
	CEM 6 [20V 50 K 30 L]	0.55	•						•					
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.55	•						•					
	CEM 6 FI [20V 50K 30L]	0.55	•						•					
TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 300 kg/m ³)	CEM I 52.5 R HES	0.50	•		•									
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.50	•		•									
	CEM 6 [20V 50 K 30 L]	0.50	•		•									
MORTIER	CEM I 52.5 R HES	0.50					•							
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	0.50					•							
	CEM II/B-V 32.5 R	0.50					•							
	CEM 1 [30V 65K 5L]	0.50					•							
	CEM 3 [30V 45K 25L]	0.50					•							
	CEM 6 [20V 50 K 30 L]	0.50					•							
	CEM 10 [10V 55K 35L]	0.50					•							
CEM 6 FI [20V 50K 30L]	0.50					•								
CURE			91 j sous eau						Mauvaise cure 28 j CC					

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

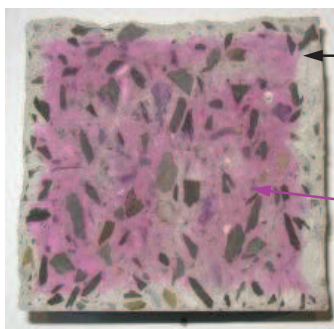
85

PERFORMANCES DE DURABILITÉ

RÉSISTANCE À LA CARBONATATION

■ Norme NBN EN 13295

- Principe : mesurer la profondeur de carbonatation d'éprouvettes soumises à un essai de carbonatation accéléré
- Cellule de carbonatation : 1% CO₂ à 20 ± 2°C et 60 ± 10% HR
- Mesure de la profondeur de carbonatation : fendage puis application d'une solution de φφ



Zone carbonatée (non colorée)

Zone non carbonatée (colorée)



■ Critère NBN B 15-100 : $d_{k,56} \leq 1.2 d_{k,56,réf}$

29/10/2015

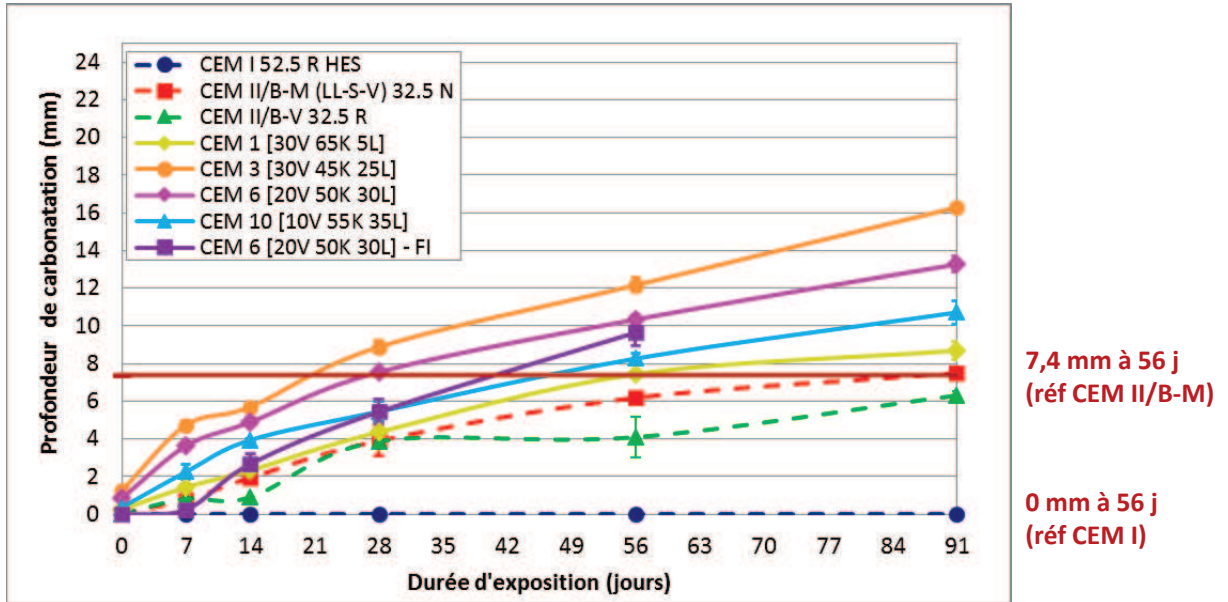
Comité d'accompagnement CemCalc II

86

RÉSISTANCE À LA CARBONATATION

■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

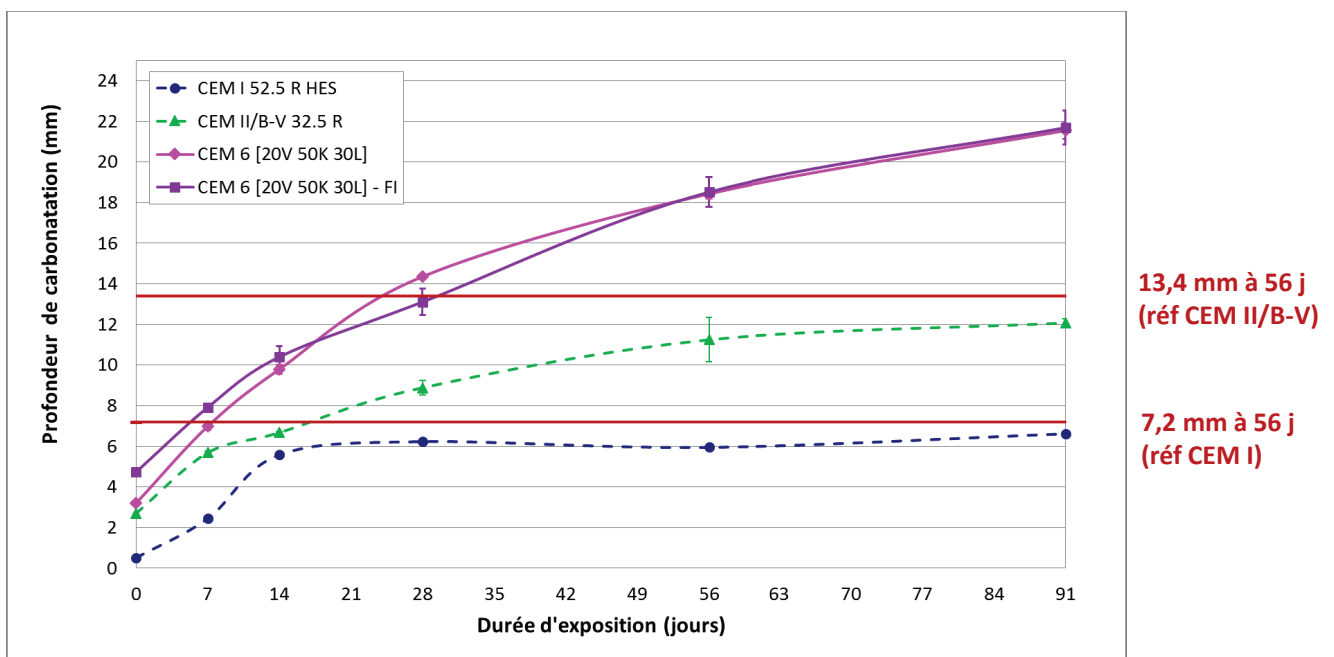
- Carbonatation supérieure par rapport aux ciments de référence
- Carbonatation augmente quand [K] diminue
- Pas d'influence significative du filler impur



PERFORMANCES DE DURABILITÉ

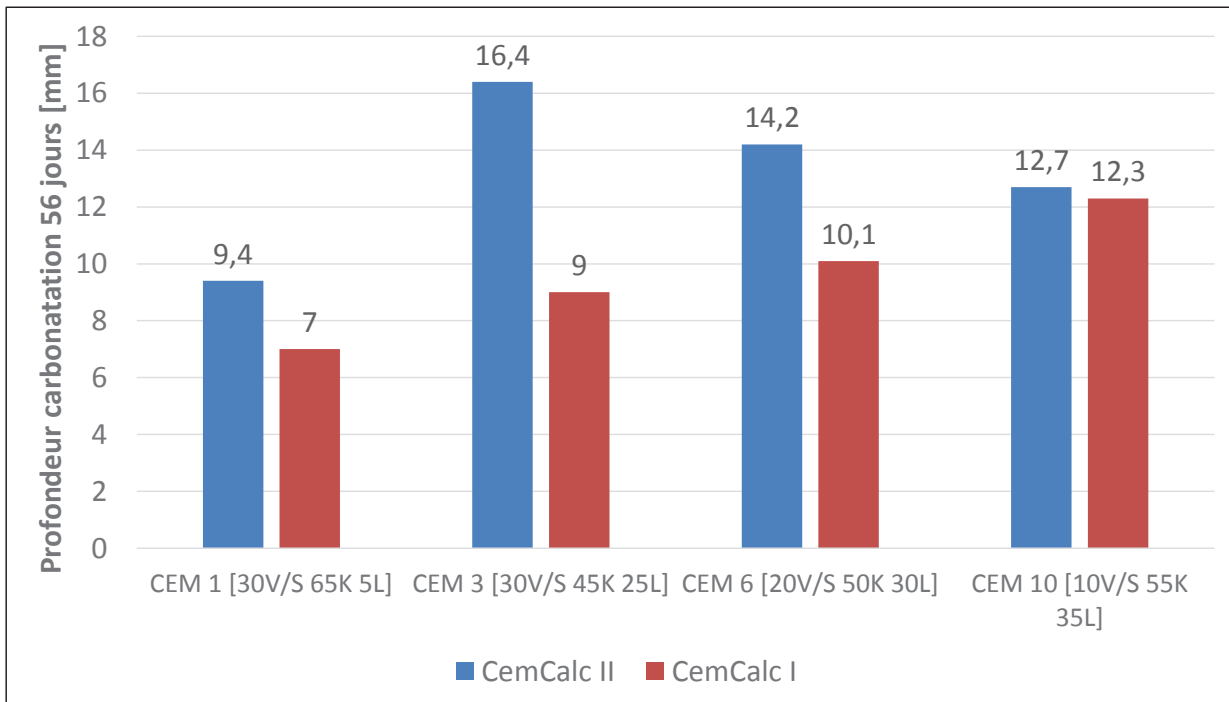
RÉSISTANCE À LA CARBONATATION – INFLUENCE MAUVAISE CURE

■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³



RÉSISTANCE À LA CARBONATATION – COMPARAISON AVEC CEMCALC I

- Les profondeurs de carbonatation des ciments KVL (CemCalc II) sont supérieures

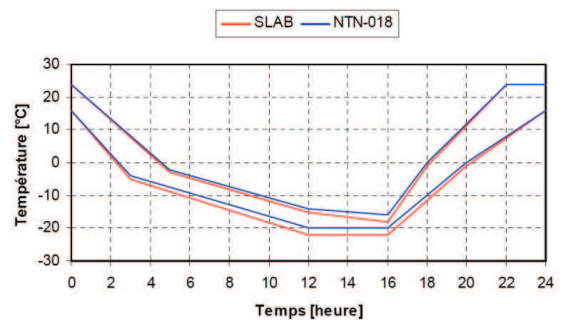


PERFORMANCES DE DURABILITÉ

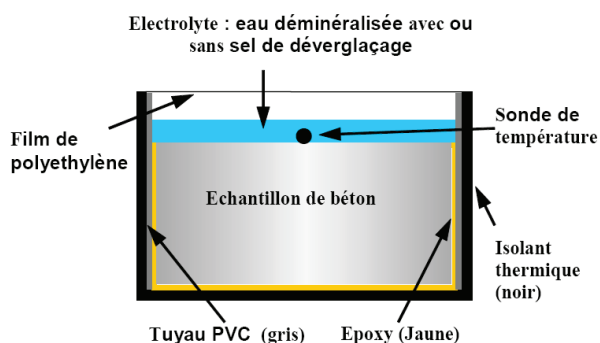
RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL AVEC SELS

Slab test CEN/TS 12390-9

- Principe : mesurer la perte de matière écaillée à la surface d'éprouvettes soumises à 56 cycles de gel-dégel en présence d'une solution de NaCl à 3% (3 mm)
- 4 carottes 113 mm Ø et 50 mm hauteur



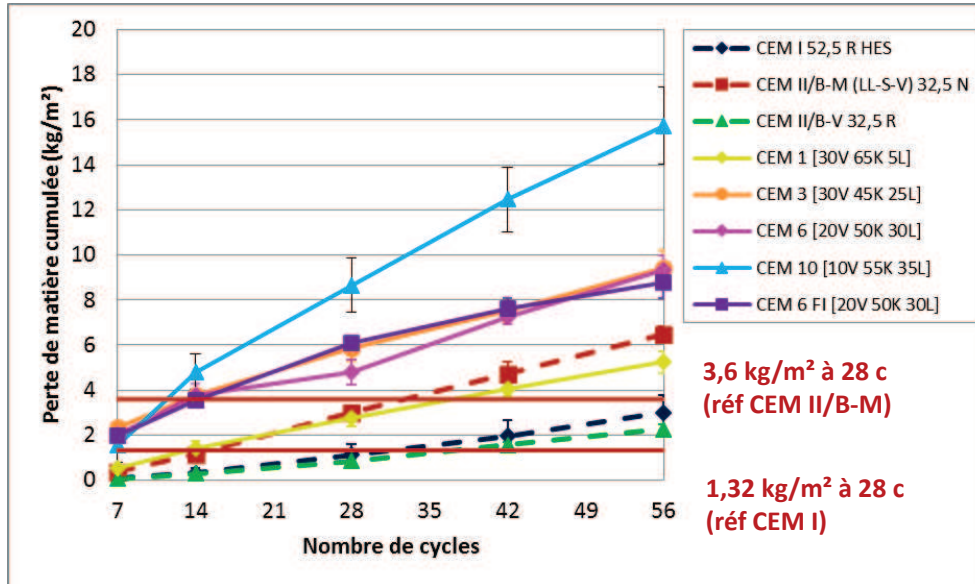
- Critère NBN B15-100 : $S_{28} \leq 1.2 S_{28, \text{réf}}$



RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL AVEC SELS

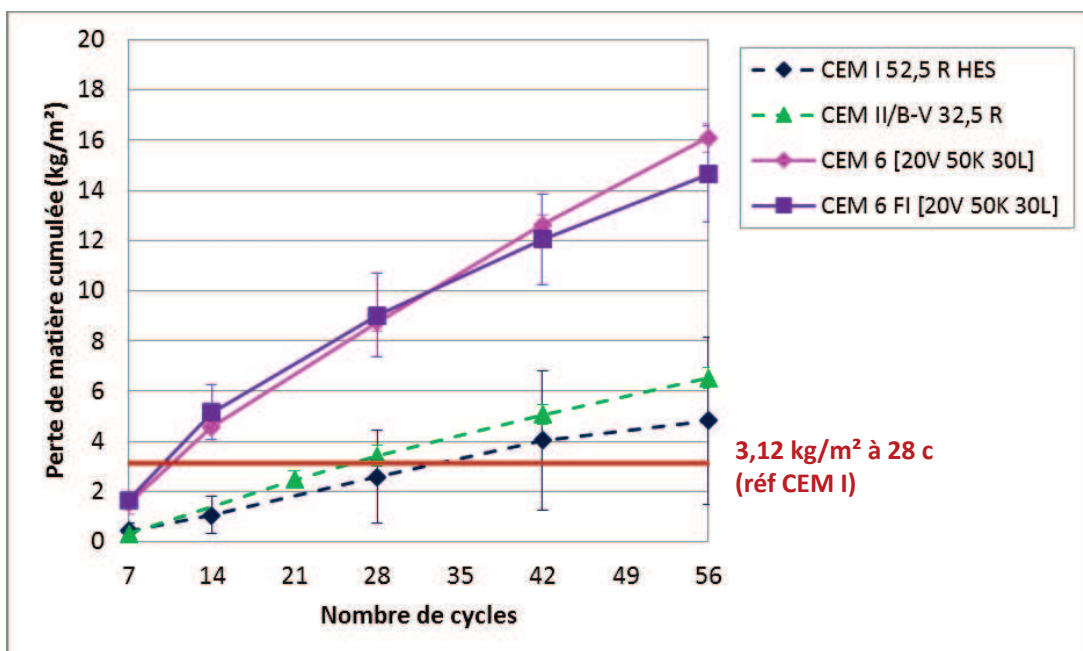
■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

- Pertes de matière supérieures par rapport aux ciments de référence, excepté le CEM 1
- Résistance au gel diminue lorsque [L] augmente
- Pas d'influence significative du filler impur



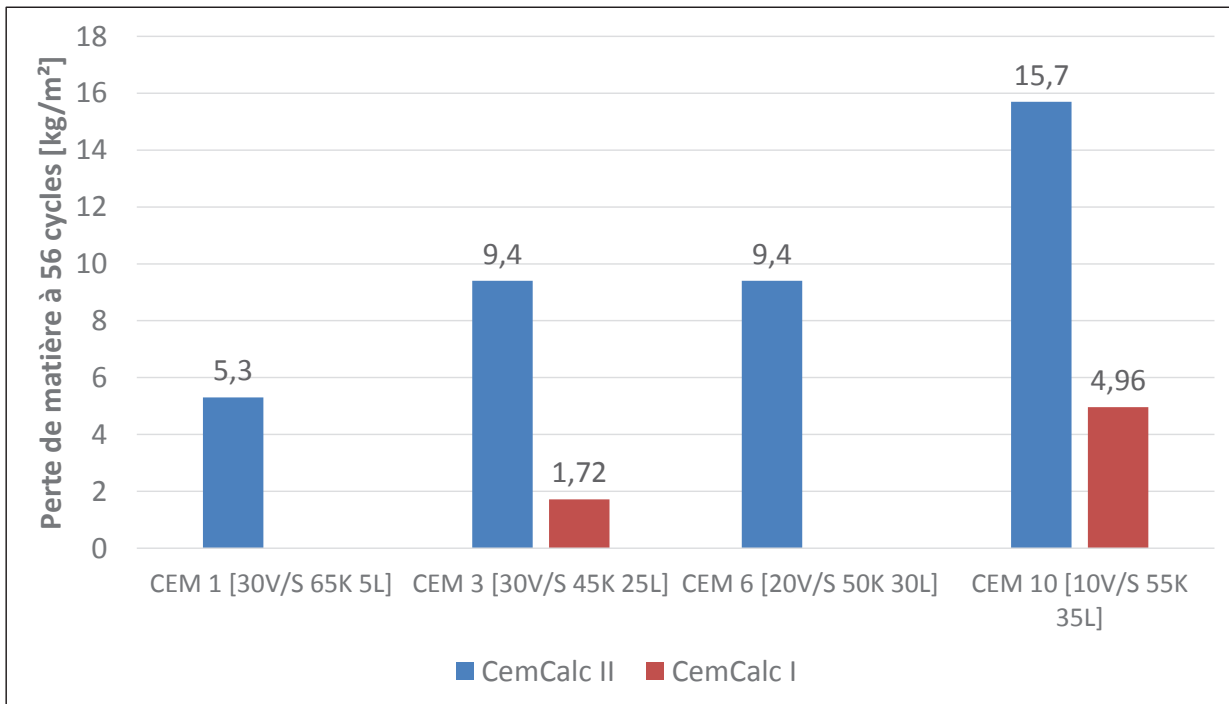
RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL AVEC SELS – INFLUENCE MAUVAISE CURE

■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³



RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL AVEC SELS – COMPARAISON AVEC CEMCALC I

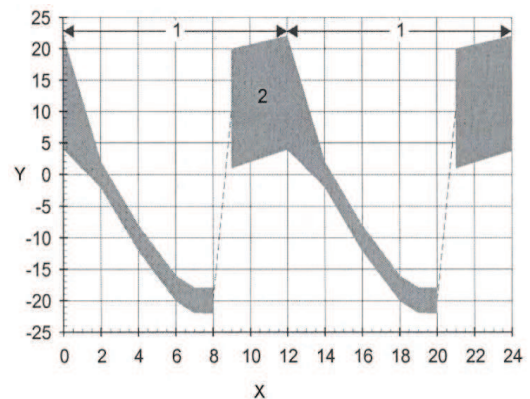
Les pertes de matière des ciments KVL (CemCalc II) sont supérieures



RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL INTERNE

Beam test CEN/TR 15177

- Principe : les dommages internes causés par le gel sont évalués sur base de la diminution du module élastique dynamique et de la perte de résistance à la traction par fendage
- 6 prismes 10 x 10 x 40 cm³



Critère NBN B 15-100 : $\Delta f_{ct,56} \leq 1.2 \Delta f_{ct,56,réf}$

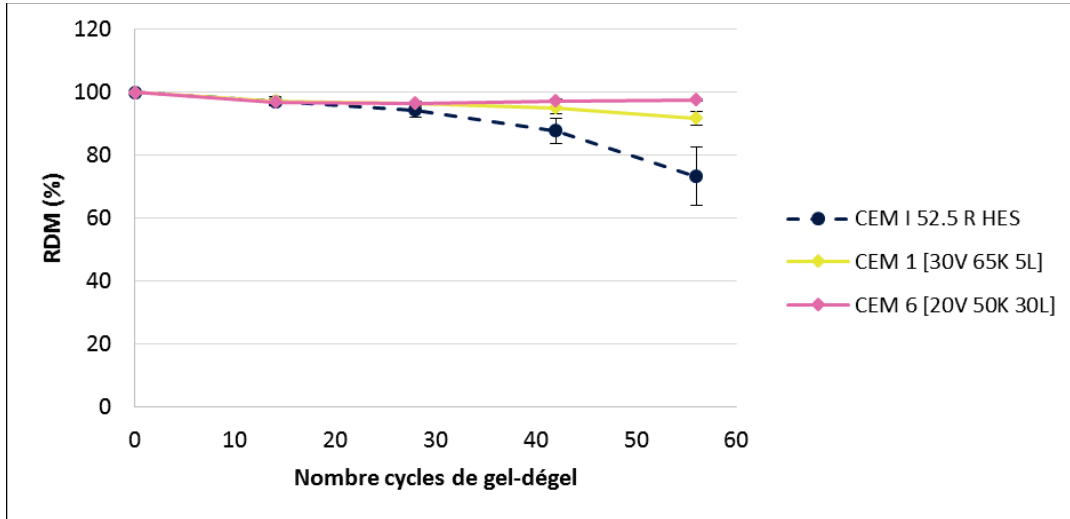
$$RDM_{UPTT,n} = \left(\frac{t_{s,0}}{t_{s,n}} \right)^2 \cdot 100$$



RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL INTERNE

■ Résultats – E/C de 0.50 et C de 320 kg/m³

- Perte de module élastique inférieure par rapport au CEM I 52,5

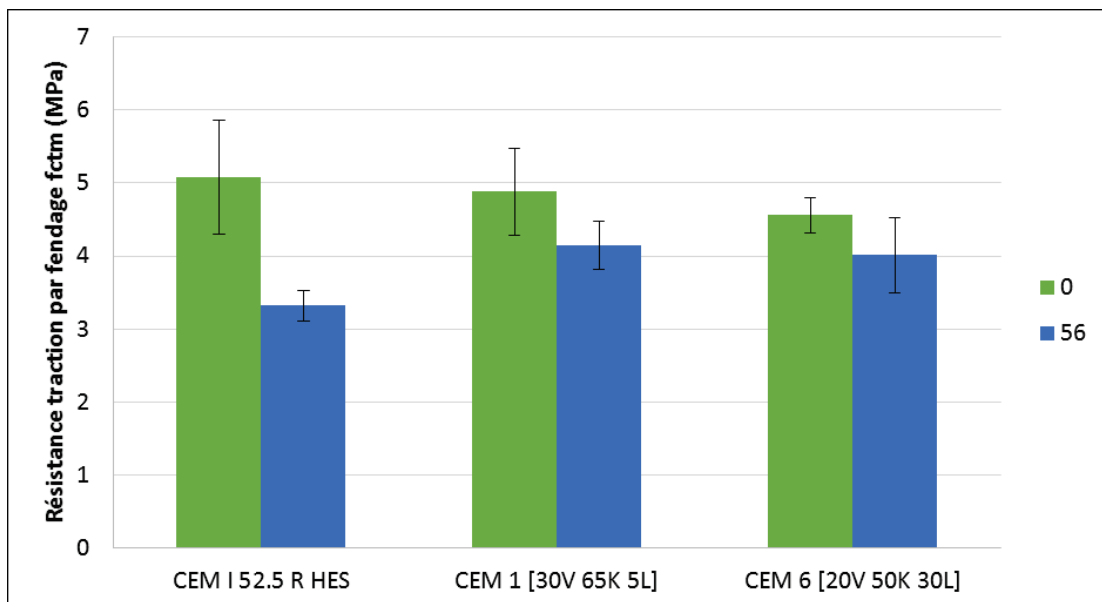


PERFORMANCES DE DURABILITÉ

RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL INTERNE

■ Résultats – E/C de 0.50 et C de 320 kg/m³

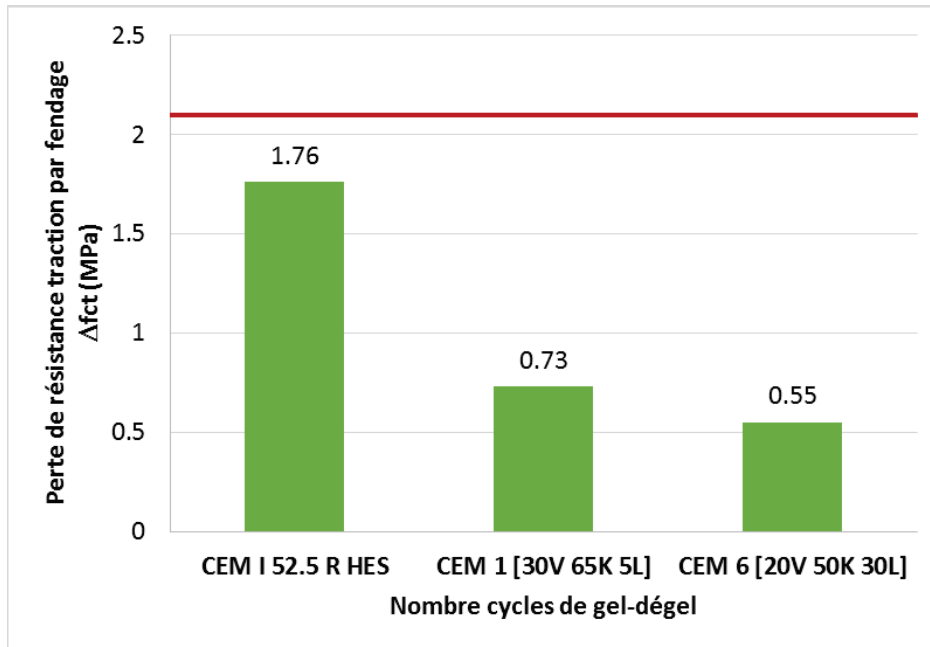
- Perte de résistance mécanique inférieure par rapport au CEM I 52,5
- Corrélation avec les mesures de vitesse sonore



RÉSISTANCE AU GEL-DÉGEL INTERNE

■ Résultats – E/C de 0.50 et C de 320 kg/m³

- Critère NBN B 15-100



2,1 MPa à 56 c
(réf CEM I)

PERFORMANCES DE DURABILITÉ

DIFFUSION DES CHLORURES

■ Norme CEN/TS 12390-11

- Principe : calculer le coefficient de diffusion D_{nss} d'un béton (régime non stationnaire) à partir de profils de concentration en Cl^- d'éprouvettes ayant été immergées dans une solutions de Cl^-
- Profil de concentration en Cl^- : prélèvement à différentes profondeurs et l'analyse de la $[Cl^-]$
- 4 carottes 100 mm \varnothing et 70 mm hauteur



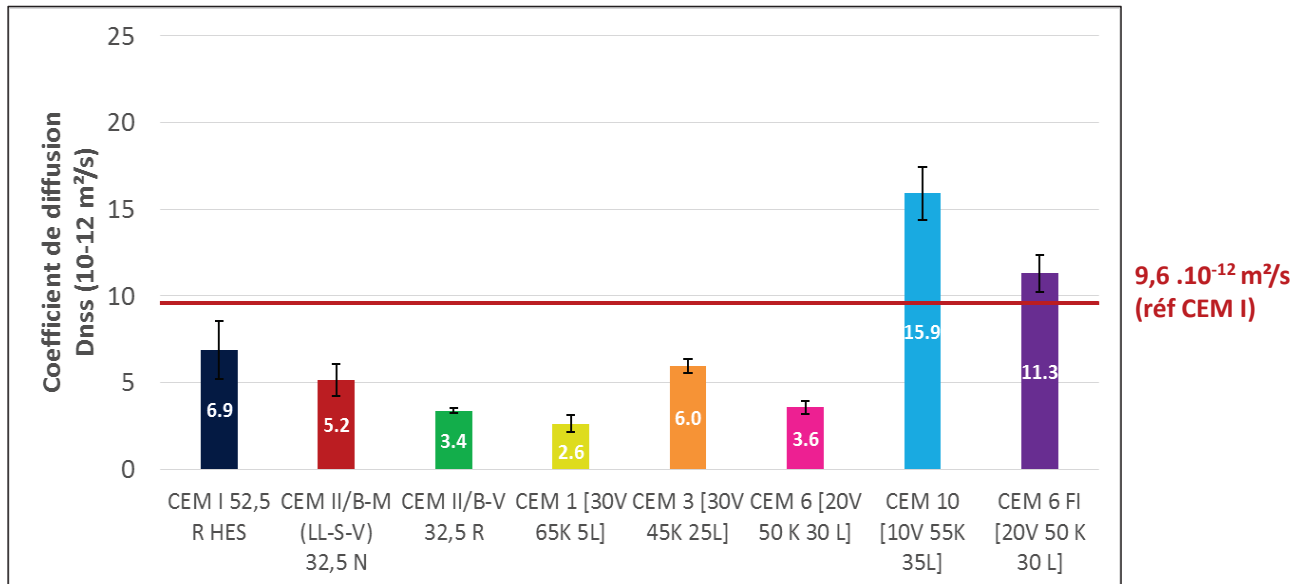
Procédure	CEN/TS 12390-11
Saturation préalable	Eau sous vide
Solution d'immersion NaCl	3% en masse
Temps d'immersion	91 jours

■ Critère NBN B15-100 : $D_{nss} \leq 1.4 D_{nss,réf}$

DIFFUSION DES CHLORURES

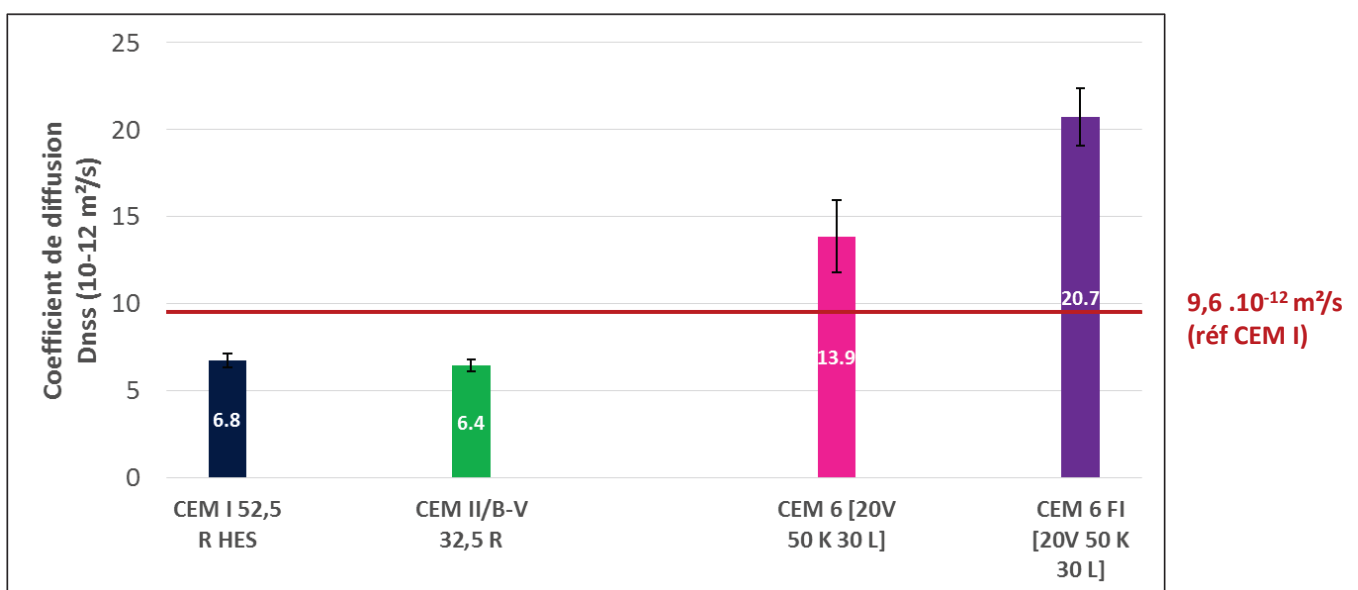
■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

- Coefficients inférieurs ou égaux aux ciments de référence, excepté les CEM 10 et CEM 6-FI
- Diffusion augmente lorsque [V] diminue
- Influence du filler impur



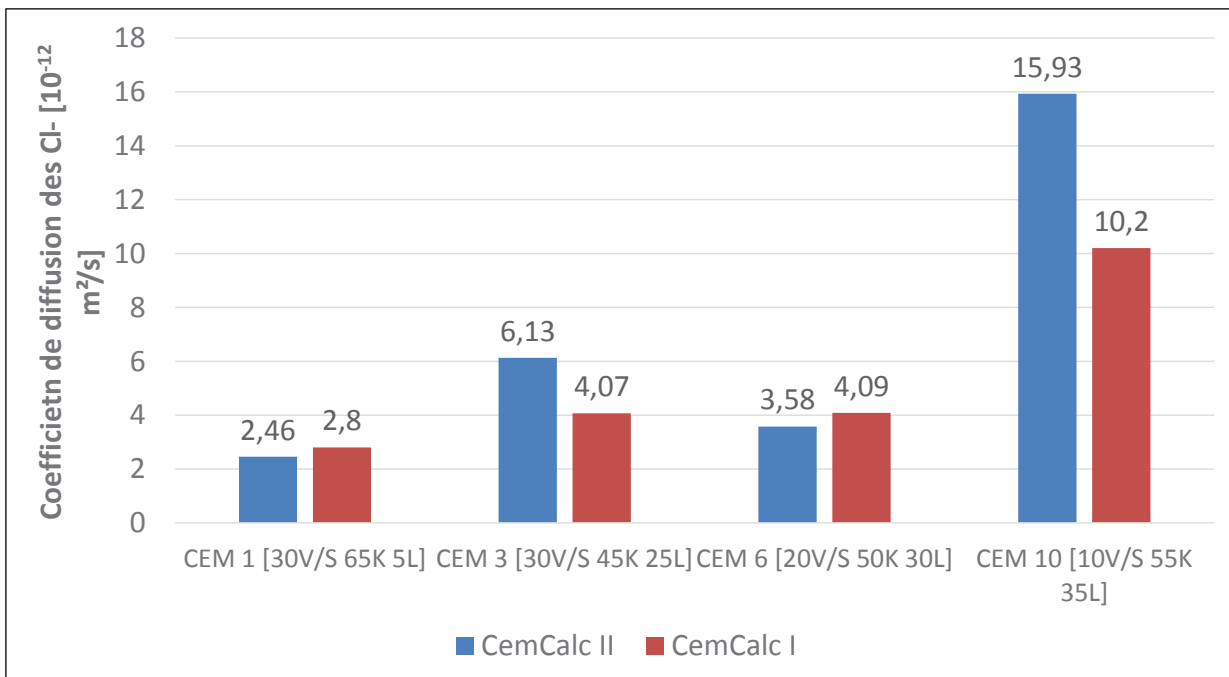
DIFFUSION DES CHLORURES – INFLUENCE MAUVAISE CURE

■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³



DIFFUSION DES CHLORURES – COMPARAISON AVEC CEMCALC I

- Les coefficients de diffusion des ciments KVL (CemCalc II) ont tendance à être supérieurs



PERFORMANCES DE DURABILITÉ

RÉSISTANCE AUX SULFATES À 20°C

Norme CUR 48

- Principe : mesurer la variation de longueur d'éprouvettes placées dans une solution sulfatique (16 ± 0.5 g/l de SO_4), par rapport à des éprouvettes contrôles placées dans l'eau
- 6 prismes $2 \times 2 \times 16$ cm³

Critère NBN B15-100 :

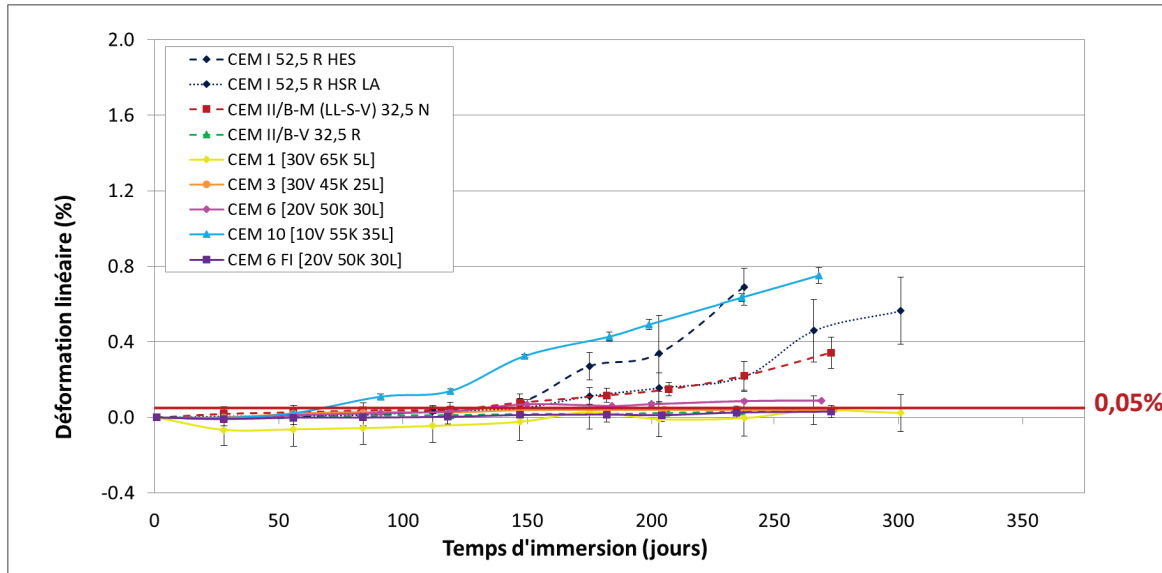
$$L_{365} \leq 1.2 L_{365, \text{réf}} \text{ ou } L_{365} \leq 0.05\%$$



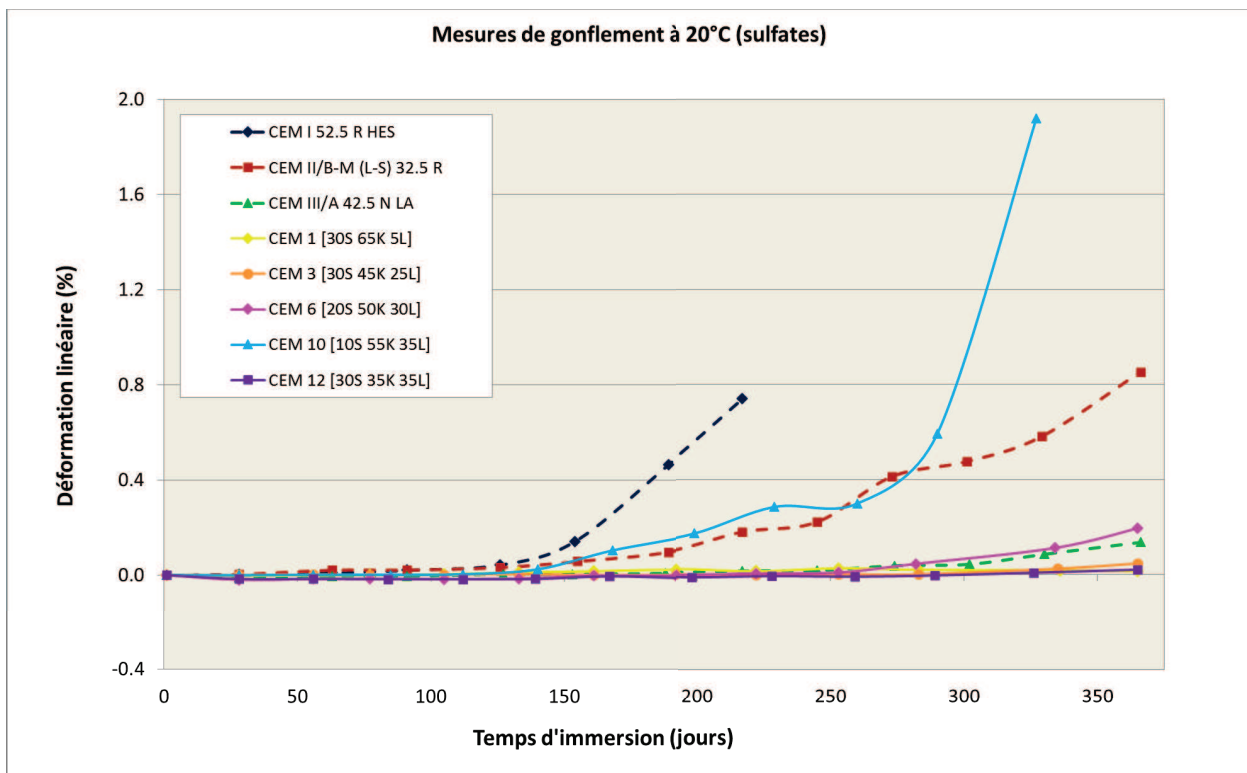
RÉSISTANCE AUX SULFATES À 20°C

■ Résultats – en cours

- Gonflement moins important que les ciments de référence
- Résistance aux sulfates augmente lorsque [V] augmente
- Pas d'influence significative du filler impur



RÉSISTANCE AUX SULFATES À 20°C – COMPARAISON AVEC CEMCALC I



ATTAQUES SULFATIQUES À 5°C (CRIC)

- a) Cure à 20°C dans H₂O saturée en chaux pendant 28 jours ;
- b) Cure à 5°C dans eau sulfatée (16,0±0,5g SO₄²⁻/litre : Na₂SO₄ + H₂O_{dist}) ;
- c) Mesure des dimensions, de la masse, de E & vitesse sonore toutes les 2 semaines.

Mesure vitesse sonore
(2*2*16cm³)

Mesure module élasticité dynamique
E (2*2*28cm³)



10/12/2013

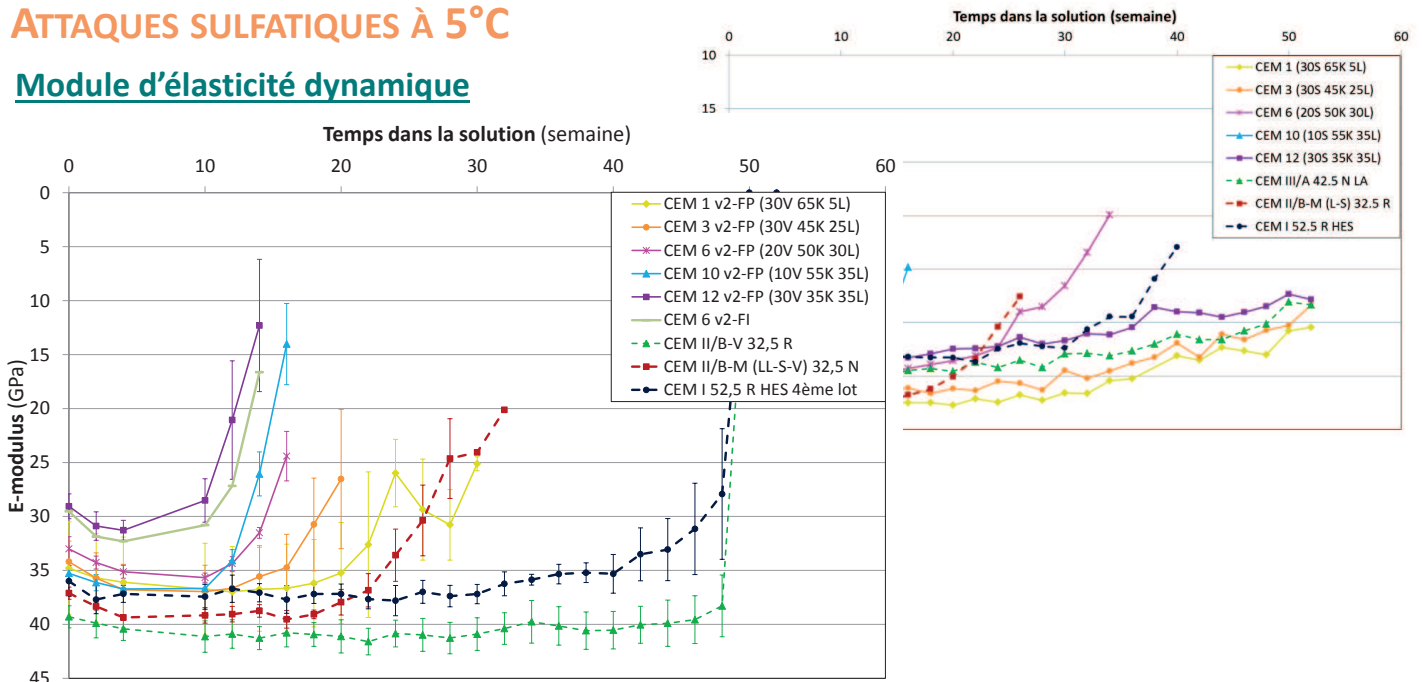
Comité d'accompagnement CemCalc

105

PERFORMANCES DE DURABILITÉ

ATTAQUES SULFATIQUES À 5°C

Module d'élasticité dynamique



- ✓ Les ciments de laboratoire cèdent avant les ciments de référence.
- ✓ Le CEM 12 se dégrade plus rapidement (plus riche en V & L).
- ✓ Le ciment de laboratoire le moins dégradé est le CEM 1 (riche en V et K).
- ✓ FI semble diminuer légèrement la résistances aux attaques sulfatiques à basse température.

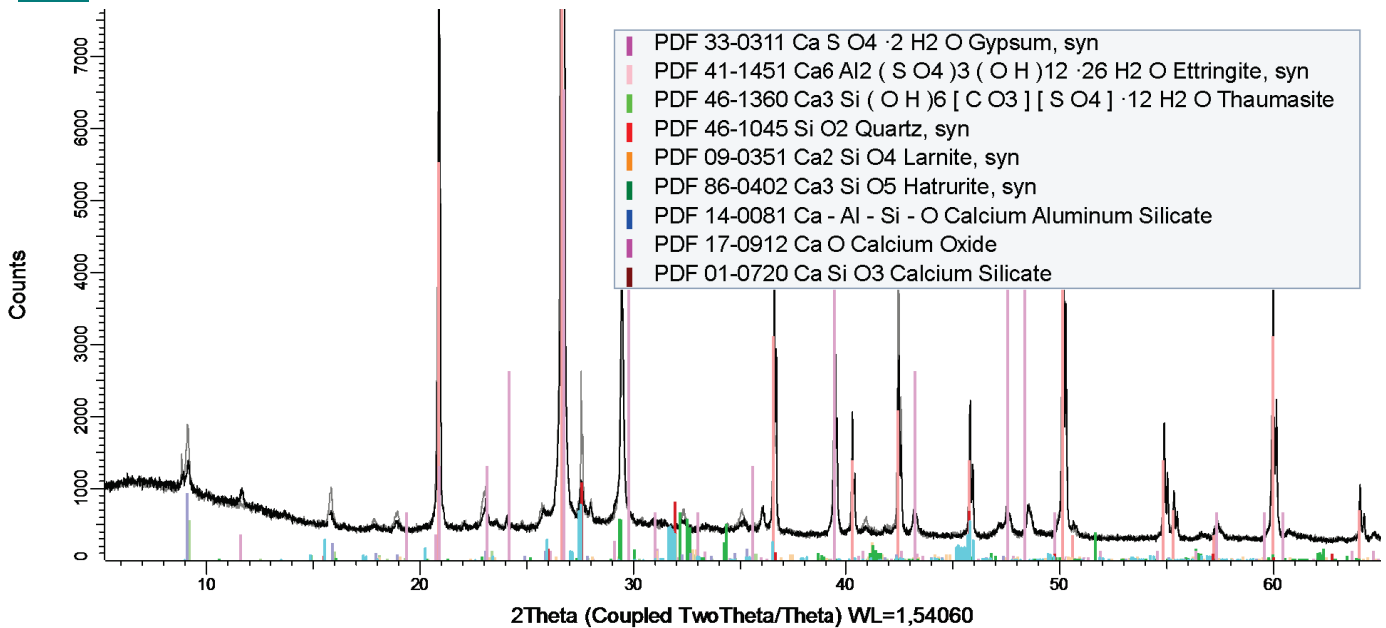
10/12/2013

Comité d'accompagnement CemCalc

106

ATTAQUES SULFATIQUES À 5°C (CUR-48)

DRX : Mortier de CEM 12 v2-FP à 12 et 14 semaines



- ✓ Le CEM 12 v2-FP contient une solution solide **ettringite** ($\text{Ca}_6\text{Al}_2(\text{SO}_4)_3(\text{OH})_{12}\cdot 26\text{H}_2\text{O}$) - **thaumasite** ($\text{Ca}_3\text{Si}(\text{OH})_6(\text{CO}_3)(\text{SO}_4)\cdot 12\text{H}_2\text{O}$).
- ✓ A 12 semaines, il contient encore un peu de gypse (11,5°2th) contrairement à 14 semaines.

10/12/2013

Comité d'accompagnement CemCalc

107

PERFORMANCES DE DURABILITÉ

ATTAQUES SULFATIQUES À 5°C : CONCLUSIONS

- Les ciments ternaires à base de cendres résistent moins aux attaques sulfatiques à 5°C que les ciments ternaires à base de laitier.
- Le ciment de référence contenant simultanément du filler, laitier et cendre volante (CEM II/B-M (LL-S-V) 32,5 N) cède après 28 semaines (vitesse sonore) et 32 semaines (E) d'attaque contrairement aux ciments de référence CEM I 52,5 R et CEM II/B-V 32,5 R.
- Les ciments ternaires riches en filler et cendre simultanément sont sensibles aux attaques sulfatiques à basse température. Le CEM 12 (30V 35K 35L) cède après 14 semaines d'attaque.
- La résistance aux attaques sulfatiques à 5°C diminue avec l'augmentation de la teneur en filler calcaire [L].
- Observation d'une solution solide thaumasite-ettringite dans les éprouvettes altérées (DRX) dont la quantité augmente avec la durée d'attaque. Elle est à la base de la désintégration des éprouvettes.
- A 14 semaines d'attaque, le gypse est totalement consommé dans les ciments de laboratoire. (DRX)

10/12/2013

Comité d'accompagnement CemCalc

108

ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION

■ Norme NBN B 15-215

- Principe : quantité d'eau présente dans le béton au terme d'une immersion sous eau jusqu'à masse constante (M1) et libérée lors d'une dessiccation jusqu'à masse constante en étuve ventilée à la température de 105 °C (M2)
- 4 cubes 10 x 10 x 10 cm³

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

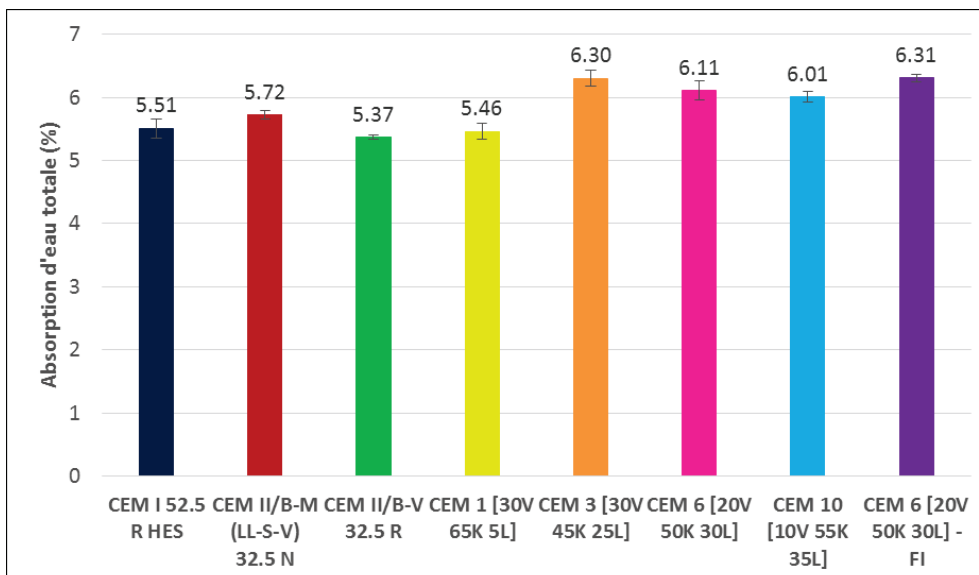
109

PERFORMANCES DE DURABILITÉ

ABSORPTION D'EAU PAR IMMERSION

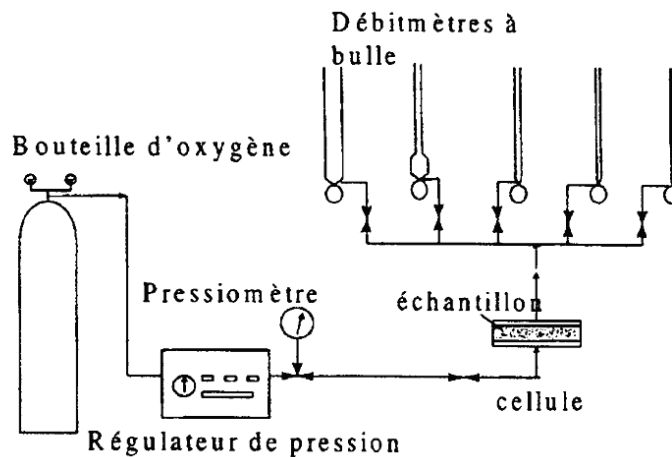
■ Résultats – E/C de 0.45 et C de 340 kg/m³

- Absorption d'eau plus élevée par rapport aux ciments de référence, excepté CEM 1
- Absorption d'eau augmente lorsque [L] augmente
- Pas d'influence significative du filler impur



PERMÉABILITÉ O₂

- Perméamètre à charge constante de type CEMBUREAU.
- Mesurer les débits traversant un échantillon de mortier cylindrique sous l'effet de gradients de pression variables et en déduire la perméabilité en régime permanent.



PERMÉABILITÉ O₂

■ Principes

$$k_a = \frac{2 Q P_a L \eta}{A (P^2 - P_a^2)}$$

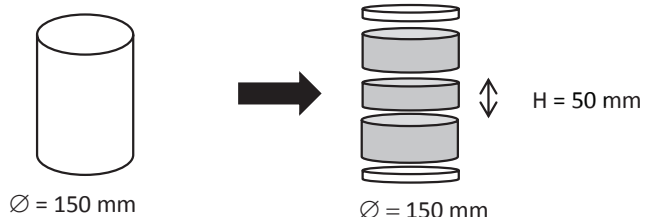
- k_a [m²] est le coefficient de perméabilité apparente, P est la pression absolue d'alimentation appliquée [N/m²], L [m] et A [m²] sont respectivement la longueur et la section de l'échantillon, Q est le débit volumique mesuré à la pression atmosphérique en [m³/s], P_a est la pression atmosphérique (10⁵ N/m²), η est la viscosité dynamique du gaz [N.s/m²] à la température d'essai ($\eta = 2,02 \cdot 10^{-5}$ N.s/m² à 20°C dans le cas de l'oxygène).

■ Echantillons

- béton de type 1 : E/C de 0,45 et 340 kg/m³ de ciment – béton de type 2 : E/C de 0,55 et 300 kg/m³ de ciment

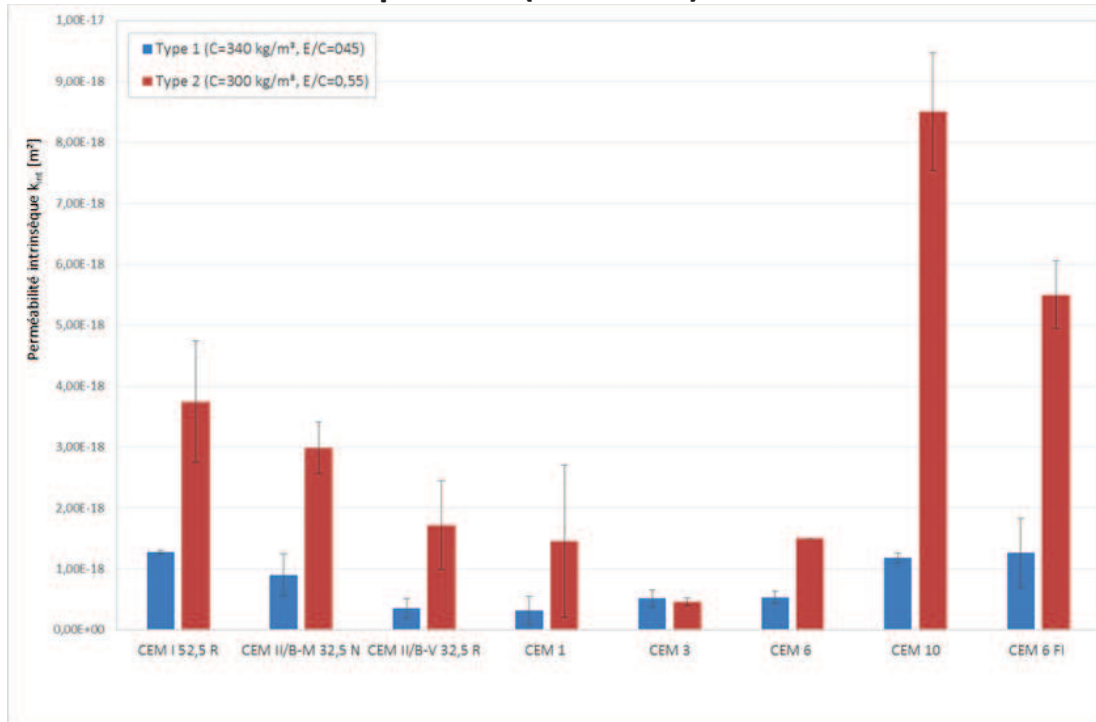
■ Conditions de cure

- Séchage à 105°C
- Bonne et mauvaise



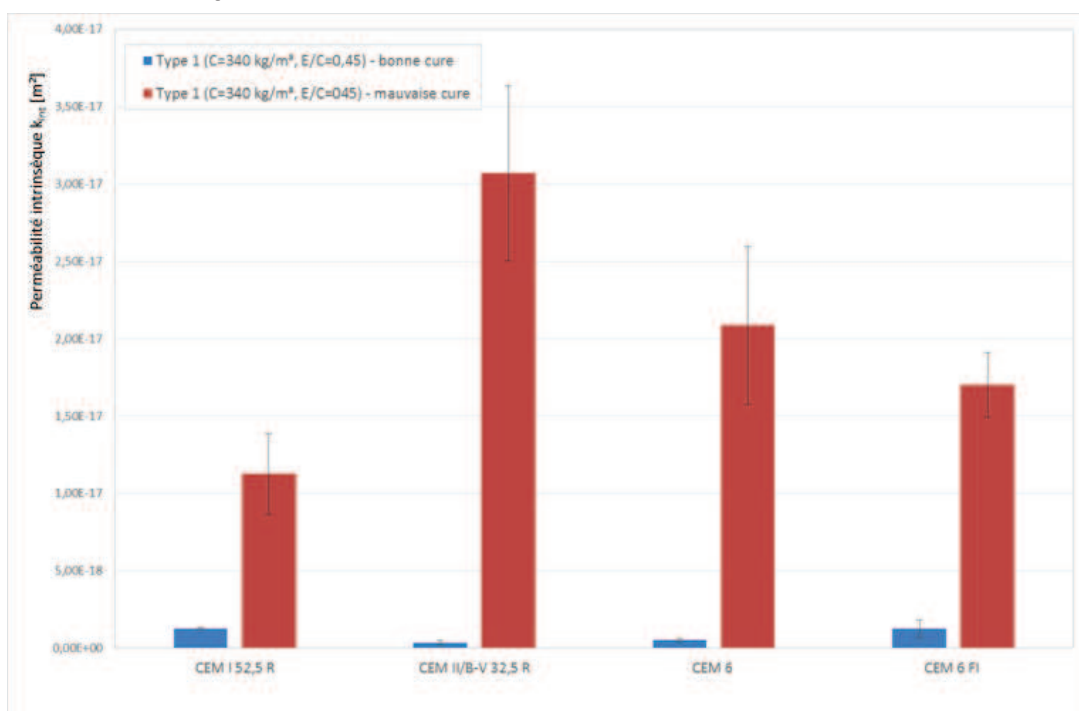
PERMÉABILITÉ O₂

- Coefficients de perméabilité intrinsèque k_{int} des bétons en fonction du type de ciment utilisé et de leur composition (H.R. = 0%)



PERMÉABILITÉ O₂

- Coefficients de perméabilité intrinsèque k_{int} des bétons en fonction du type de cure et de leur composition (H.R. = 0%)



PERMÉABILITÉ O₂

- Les coefficients de perméabilité intrinsèque et apparent sont de l'ordre de 10⁻¹⁸ à 10⁻¹⁹ pour les bétons de composition de type 1, ce qui les classe dans la catégorie de durabilité « très élevée » selon le document « Conception des bétons pour une durée de vie donnée de ouvrage » rédigé par l'AFGC-AFREM ;
- Les coefficients de perméabilité des bétons confectionnés avec les ciments ternaires CEM 1 [30V 65K 5L], CEM 3 [30V 45K 25L] et CEM 6 [20V 50K 30L] sont comparables à ceux des bétons constitués des ciments industriels ;
- L'utilisation du filler calcaire impur (FI) dans la production du CEM 6 [20V 50K 30L] ne modifie pas de manière significative la perméabilité des bétons ;
- A l'exception du CEM 3 [30V 45K 25L], la perméabilité des bétons de type 2 est supérieure à celle des bétons de type 1 ce qui peut s'expliquer par le rapport E/C plus important.
- L'utilisation d'une mauvaise cure augmente la perméabilité des bétons d'un facteur 10

CONCLUSIONS SUR BASE DES CHOIX RÉALISÉS DANS CETTE ÉTUDE

- La **carbonatation** dépend principalement de la teneur en clinker [K], tout comme la **résistance en compression**. Ainsi, une résistance en compression élevée permet d'obtenir une résistance à la carbonatation élevée.
- Une **teneur élevée en filler calcaire** [L] a un effet défavorable sur la carbonatation, le gel avec sels et l'absorption d'eau.
- Une **teneur élevée en cendres volantes** [V] semble avoir un effet positif sur le gel interne, la diffusion des chlorures et l'attaque sulfatique à 20°C. A 5°C, la présence de cendres volantes ne permet pas de limiter la décohesion due à la thaumasite.
- De manière générale, la **mauvaise cure** a un effet négatif sur la durabilité des bétons (carbonatation, gel avec sels, chlorures, perméabilité).
- La présence du **filler impur testé** ne semble pas influencer la durabilité des bétons. Une influence néfaste a été observée pour la diffusion des chlorures.
- Les bétons à base des ciments ternaires ont des meilleures performances que le ciment de référence CEM I 52,5 R HES, vis-à-vis du **gel interne**, contrairement au **gel avec sels de déverglaçage**.
- La **perméabilité** semble être meilleure lorsque la teneur en cendres volantes [V] augmente.
- Le **laitier** (CemCalc I) semble mieux contribuer à la durabilité par rapport aux cendres volantes (CemCalc II).

Béton	Ciment	Carbonatation $d_k \leq 1.2 d_{k,ref}$	Gel avec sels $S \leq 1.2 S_{ref}$	Gel interne $\Delta f_{ct} \leq 1.2 \Delta f_{ct,ref}$	Chlorures $D_{nss} \leq 1.4 D_{nss,ref}$	Sulfates 20°C $L \leq 1.2 L_{ref}$ ou $L \leq 0.05\%$
TYPE 1 (E/C de 0.45)	CEM I 52.5 R HES	réf	réf		réf	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	-	-		-	
	CEM II/B-V 32.5 R	-	-		-	
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X	X		✓	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X	X		✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X / X	X / X		✓ / X	
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X	X		X	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X / X	X / X		X / X	
TYPE 2 (E/C de 0.55)	CEM I 52.5 R HES	réf				
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	-				
	CEM II/B-V 32.5 R	-				
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X				
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X				
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X				
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X				
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X				
TYPE 3	CEM I 52.5 R HES	réf		réf		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X		✓		
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X		✓		
MORTIERS	CEM I 52.5 R HES					X
	CEM I 52.5 R HSR LA					X
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N					X
	CEM II/B-V 32.5 R					En cours
	CEM 1 [30V 65K 5L]					En cours
	CEM 3 [30V 45K 25L]					En cours
	CEM 6 [20V 50K 30L]					X
	CEM 10 [10V 55K 35L]					X
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI					En cours

Critères d'évaluation NBN B 15-100

(Bonne cure / mauvaise cure)

✓ : critère respecté

X : critère non respecté

réf : ciment utilisé comme référence pour le critère (CEM I)

Béton	Ciment	Carbonatation $d_k \leq 1.2 d_{k,ref}$	Gel avec sels $S \leq 1.2 S_{ref}$	Gel interne $\Delta f_{ct} \leq 1.2 \Delta f_{ct,ref}$	Chlorures $D_{nss} \leq 1.4 D_{nss,ref}$	Sulfates 20°C $L \leq 1.2 L_{ref}$ ou $L \leq 0.05\%$
TYPE 1 (E/C de 0.45)	CEM I 52.5 R HES	-	-		réf	
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	réf	réf		-	
	CEM II/B-V 32.5 R	- / réf	-		-	
	CEM 1 [30V 65K 5L]	✓	✓		✓	
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X	X		✓	
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X / X	X / X		✓ / X	
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X	X		X	
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X / ✓	X / X		X / X	
TYPE 2 (E/C de 0.55)	CEM I 52.5 R HES	-				
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	réf				
	CEM II/B-V 32.5 R	-				
	CEM 1 [30V 65K 5L]	✓				
	CEM 3 [30V 45K 25L]	X				
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X				
	CEM 10 [10V 55K 35L]	X				
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI	X				
TYPE 3	CEM I 52.5 R HES	réf		réf		
	CEM 1 [30V 65K 5L]	X		✓		
	CEM 6 [20V 50K 30L]	X		✓		
MORTIERS	CEM I 52.5 R HES					X
	CEM I 52.5 R HSR LA					X
	CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N					X
	CEM II/B-V 32.5 R					En cours
	CEM 1 [30V 65K 5L]					En cours
	CEM 3 [30V 45K 25L]					En cours
	CEM 6 [20V 50K 30L]					X
	CEM 10 [10V 55K 35L]					X
	CEM 6 [20V 50K 30L] - FI					En cours

Critères d'évaluation NBN B 15-100

(Bonne cure / mauvaise cure)

✓ : critère respecté

X : critère non respecté

réf : ciment utilisé comme référence pour le critère (autre ciment)

- INTRODUCTION (CRIC)
- EVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENT/SUPERPLASTIFIANT (ULG)
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
 - Formulation et confection des bétons et mortiers
 - Etude comparative des performances physico-mécaniques
 - Etude comparative des performances de durabilité
 - Etablissement des règles technologiques
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

119

RÈGLES TECHNOLOGIQUES

Classe environnement	Béton	Ciment	Classe de résistance	Classe de consistance	Méthode d'essai (Tableau 5 de la NBN B 15-100)			
					Béton de référence : à base de CEM I*			
					Carbonatation	Gel interne	Gel avec sels	Diffusion des chlorures
EE4	TYPE 1 (E/C = 0.45 et C = 340 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	C50/60	S3	réf / -	réf	réf / -	réf
		CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	C30/37	S3	- / réf	-	- / réf	-
		CEM II/B-V 32.5 R	C35/45	S3	-	-	-	-
		CEM 1 [30V 65K 5L]	C40/50	S3	O* / X	ND	O* / X	X
		CEM 3 [30V 45K 25L]	C16/20	S3	O	ND	O	X
		CEM 6 [20V 50K 30L]	C20/25	S3	O	ND	O	X
		CEM 10 [10V 55K 35L]	C25/30	S3	O	ND	O	O
		CEM 6 FI [20V 50K 30L]	C20/25	S3	O	ND	O	O
EE2	TYPE 2 (E/C = 0.55 et C = 300 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	C45/55	S4	réf / -	réf		
		CEM II/B-M (LL-S-V) 32.5 N	C20/25	S4	- / réf	-		
		CEM II/B-V 32.5 R	C25/30	S4	-	-		
		CEM 1 [30V 65K 5L]	C20/25	S4	O* / X	ND		
		CEM 3 [30V 45K 25L]	-	S4	O	ND		
		CEM 6 [20V 50K 30L]	C12/15	S4	O	ND		
		CEM 10 [10V 55K 35L]	C12/15	S4	O	ND		
		CEM 6 FI [20V 50K 30L]	-	S4	O	ND		
EE3	TYPE 3 (E/C = 0.50 et C = 320 kg/m³)	CEM I 52.5 R HES	C50/60	S3 – S4	réf	réf		
		CEM 1 [30V 65K 5L]	C25/30	S3 – S4	O*	X		
		CEM 6 [20V 50K 30L]	C16/20	S3 – S4	O*	X		

Classe de résistance visée atteinte – Classe de résistance visée non atteinte

X : ciment pouvant être utilisé – O : critère de la NBN B 15-100 non respecté – ND : non déterminé

O* : critère non respecté à cause du choix du béton de référence (CEM I)

29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

120

CONCLUSIONS

- **Classes de consistance** visées obtenues (superplastifiant PCE)
 - Mais ciments K-V-L plus sensibles que ciments K-S-L
- **Classes de résistance** visées obtenues avec CEM 1 [30V 65K 5L] (béton type 1)
- **Corrosion par carbonatation :**
 - CEM 1 [30V 65K 5L] ok si CEM II/B-M comme référence
- **Attaque gel/dégel :**
 - Gel interne : CEM 1 [30V 65K 5L] et CEM 6 [20V 50K 30L] ok
 - Gel avec sels : CEM 1 [30V 65K 5L] ok si CEM II/B-M comme référence
- **Corrosion induite par les Cl⁻ :**
 - CEM 1 [30V 65K 5L], CEM 3 [30V 45K 25L] et CEM 6 [20V 50K 30L] ok
- **Résistance aux sulfates :**
 - Ciments K-V-L bons
- **Remarque générale :**
 - Essais de durabilité : cure idéale de 91 jours sous eau

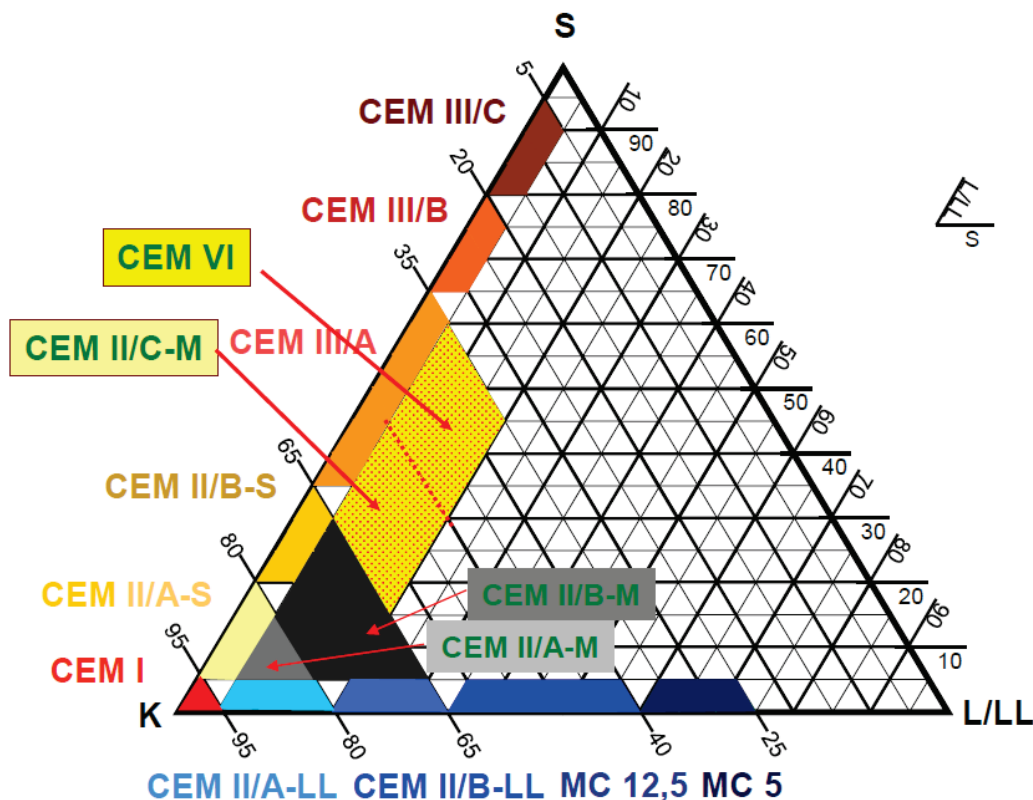
PLAN DE L'EXPOSÉ

- INTRODUCTION (CRIC)
- ÉVALUATION DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES SUR MORTIER (CRIC)
- ÉTUDE DE L'ACTIVATION CHIMIQUE DES CIMENTS (ULG)
- ÉTUDE DE LA COMPATIBILITÉ CIMENTS/SP (ULG)
- ÉTUDE COMPARATIVE DES PERFORMANCES MÉCANIQUES ET DE DURABILITÉ DES BÉTONS À BASE DES NOUVEAUX CIMENTS TERNAIRES (CSTC)
- CONCLUSIONS GÉNÉRALES (CRIC)

- La **cendre de co-combustion** testée a des performances sur mortier similaires voire meilleures que les cendres de combustion classiques.
- Les cendres n'ont pas pu être activées de façon efficace avec les **activateurs** testés (NaOH, CaSO₄ et Na₂SO₄).
- La plupart des nouveaux ciments ternaires K-V-L n'ont pas présenté de problème au niveau de leur **compatibilité avec les superplastifiants** testés (PCE et NAF).
- Les **performances mécaniques** sur mortier et sur béton des nouveaux ciments ternaires décroissent avec une diminution de la teneur en clinker. Les bétons à base des nouveaux ciments ternaires présentent un bon comportement en retrait et en fluage (NBN B15-100).
- Les nouveaux ciments ternaires répondant à des critères de **classe de résistance** sur mortier (NBN EN 197-1) ne répondent pas tous aux critères de classe de résistance sur béton (NBN EN 206).
- Les **performances de durabilité** des bétons à base des nouveaux ciments ternaires dépendent des teneurs en clinker [K], filler calcaire [L] et cendres volantes [V]. Une teneur élevée en cendres volantes [V] est bénéfique pour la résistance au gel/dégel interne, à la diffusion des chlorures et aux attaques sulfatiques à 20°C (NBN B 15-100).

- La présence du **filler impur** étudié a une influence négative sur les propriétés du béton frais mais généralement pas sur les propriétés mécaniques et de durabilité.
- Les **ciments ternaires à base de laitier** [S] sont plus performants que ceux à base de cendres volantes [V] au niveau des propriétés mécaniques et de durabilité.
- Les nouveaux ciments ternaires [S/V K L] seraient indiqués pour des éléments/structures requérant une faible chaleur d'hydratation, des bétons non armés et pour résister à des environnements suflatés à 20°C à condition que la **cure la plus lente** soit appliquée.
- Les ciments qui répondent aux critères de la **NBN EN 197-1** ne répondent pas forcément à ceux sur béton de la **NBN B 15-100**. En fonction des applications, l'utilisation de ces ciments ternaires requiert des dispositions particulières.

- Nouveaux ciments introduits dans la norme EN 197-1.



29/10/2015

Comité d'accompagnement CemCalc II

125

COMITÉ D'ACCOMPAGNEMENT – 29 OCTOBRE 2015



Wallonie

MERCI POUR VOTRE ATTENTION

