

# Comportement différé de liants hydrauliques à hautes teneurs en additions minérales

Darquennes Aveline, Benboudjema Farid

LMT (ENS Cachan, CNRS, Université Paris Saclay), 94235 Cachan, France

[aveline.darquennes@ens-cachan.fr](mailto:aveline.darquennes@ens-cachan.fr), [farid.benboudjema@ens-cachan.fr](mailto:farid.benboudjema@ens-cachan.fr)

---

*RÉSUMÉ. Afin de réduire l'impact carbone de la fabrication du ciment Portland, l'utilisation d'additions minérales en substitution au clinker est largement répandue. En plus de limiter les rejets de gaz à effets de serre, les liants hydrauliques à hautes teneurs en additions minérales présentent, pour une cure adéquate, des propriétés intéressantes vis-à-vis de la durabilité. Cependant, certains ouvrages réalisés avec des matrices cimentaires à teneur élevée en additions minérales ont présenté de la fissuration au jeune âge suite à la restriction de leurs déformations différées. L'objectif principal de cette étude expérimentale est de déterminer l'impact de l'ajout de bi-additions (laitier de haut-fourneau et cendres volantes) à des taux de substitution élevés et de leur activation chimique sur les déformations différées et leur sensibilité à la fissuration. Il apparaît que les matériaux à teneurs élevées en additions minérales sont assez sensibles au retrait de dessiccation. L'activation chimique permet d'accroître la résistance en traction au jeune âge et de diminuer le module de Young, mais génère un accroissement du retrait endogène. Un couplage fort entre hydratation et séchage est observé, affectant le développement des déformations.*

*ABSTRACT. To reduce the carbon footprint of the Portland cement manufacture, the substitution of clinker by mineral additions is widely used. In addition to limiting the emissions of greenhouse gas effects, hydraulic binders with a high content of mineral additions have, under an adequate curing, interesting properties for the sustainability. However, some civil engineering structures made with concretes containing a high content of mineral additions presented cracking at early age due to the restriction of their delayed deformations. The main objective of this experimental study is to determine the effect of using bi-additions (blast furnace slag and fly ash) at high content and of the chemical activation on delayed deformations and on cracking sensibility. It appears that the drying shrinkage of these hydraulic binders is more important. The chemical activation allows increasing the tensile strength at early age and decreasing the Young modulus, but generates an increase in the autogenous shrinkage. Moreover, a strong coupling between hydration and drying is observed, affecting the deformation development.*

*MOTS-CLÉS : activation chimique, carbonate de sodium, cendre volante, laitier de haut-fourneau, propriétés mécaniques, retrait.*

*KEY WORDS: blast-furnace slag, chemical activation, fly ash, mechanical properties, shrinkage, sodium carbonate.*

---

## 1. Introduction

Afin de réduire l'impact carbone de la fabrication du ciment Portland, l'utilisation d'additions minérales, telles que le laitier de haut-fourneau et les cendres volantes, en substitution au clinker est largement répandue. Ces taux de substitution peuvent être conséquents. Par exemple, les ciments industriels, tels que le CEM III/C et le CEM II/B-V, peuvent contenir respectivement jusqu'à 95% de laitier de haut-fourneau et 35% de cendres volantes [NF EN 197-1]. Ces additions minérales peuvent également être utilisées ensemble dans le ciment CEM V (20 à 64% de clinker, 18 à 50% de cendres volantes et 18 à 50% de laitier de haut-fourneau). En plus de limiter les rejets de gaz à effets de serre liés à la production de clinker, ces matériaux cimentaires présentent, pour une cure adéquate, des propriétés intéressantes vis-à-vis de la durabilité [BIJ 98], par exemple une faible perméabilité, un faible dégagement de chaleur au jeune âge, une bonne résistance aux réactions sulfatiques, etc. Cependant, certains ouvrages, tels que les stations d'épuration, réalisés avec des matrices cimentaires à teneur élevée en additions minérales ont présenté de la fissuration au jeune âge suite à la restriction de leurs déformations différées [DAR 16]. En effet, ces structures sont soumises à plusieurs types de déformations liées à l'hydratation du ciment. Suite à la consommation de l'eau par le ciment, des dépressions capillaires apparaissent au sein du matériau générant une contraction globale du matériau (retrait endogène). Cette réaction chimique étant exothermique, le matériau subira également une dilatation thermique suivi d'une contraction (retrait thermique). Lorsque ces déformations volumiques sont empêchées par la partie de la structure existante (par exemple : radier), des contraintes de traction apparaissent pouvant générer de la fissuration [BEN 15].

L'objectif principal de ces travaux expérimentaux consiste en l'étude de l'impact sur les déformations différées de l'ajout de bi-additions à des taux de substitution élevés. Dans un premier temps, une étude expérimentale sur des pâtes de liants hydrauliques avec différentes teneurs en laitier de haut-fourneau et en cendres volantes a été réalisée afin de caractériser l'impact de taux élevés en additions minérales (mono-ou bi-additions) sur leur comportement mécanique (résistance à la traction, module de Young dynamique), et leurs déformations différées (retrait endogène et de dessiccation). Dans un second temps, une étude visant à accélérer la cinétique d'hydratation de ces liants hydrauliques et à améliorer leurs performances au jeune âge a été mise en œuvre. A cette fin, différentes solutions existent: (I) une approche mécanique par un broyage supplémentaire des additions minérales [KUM 08], (II) une approche thermique par le biais d'une cure thermique [ESC 98], (III) une approche chimique par la création de centres de germination [MOU 11] et/ou l'utilisation d'activateurs chimiques [FER 97]. Cette dernière approche a été choisie dans la seconde partie de cette étude. Le laitier de haut-fourneau peut être activé par une activation calcique (ajout de chaux, par exemple) [SHI 93], sulfatique (gypse, par exemple) [RAS 13] et alcaline (soude, par exemple) [SHI 96]. Présentant un faible coût, existant à l'état naturel et n'étant pas toxique pour l'environnement, le carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$  – activation alcaline) a été ajouté à différents pourcentages afin de déterminer son impact sur les propriétés mécaniques et les déformations différées.

## 2. Matériaux

Les matériaux utilisés pour les pâtes de ciment sont du ciment Portland CEM I 52,5 N CP2 (nommé CEMI), du laitier de haut-fourneau (nommé L) et des cendres volantes de classe F (nommées CV). Six compositions sont étudiées et nommées en fonction du pourcentage volumique de leurs constituants : une composition sans addition minérale  $100\%CEMI$ , deux compositions avec une mono-substitution par du laitier de haut-fourneau  $50\%CEMI+50\%L$  et  $10\%CEMI+90\%L$ , et trois compositions avec une bi-substitution par du laitier de haut-fourneau et des cendres volantes  $10\%CEMI+70\%L+20\%CV$ ,  $5\%CEMI+70\%L+25\%CV$  et  $5\%CEMI+75\%L+20\%CV$ . Le rapport Eau/Liant (0,45) est maintenu constant.

Afin d'améliorer la résistance mécanique au jeune âge, une activation chimique alcaline au moyen de carbonate de calcium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  a été réalisée sur la composition  $5\%CEMI+75\%L+20\%CV$ . Ce type d'activateur présente l'avantage d'être à faible coût et d'exister à l'état naturel. Quatre dosages ont été testés : 1, 2, 3 et 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . Il s'agit d'un pourcentage massique par rapport à la quantité de laitier de haut-fourneau. L'activateur est dissous dans l'eau de gâchage au préalable afin d'assurer une répartition homogène dans la matrice cimentaire. Ainsi les teneurs en activateur ont été choisies afin d'être inférieures à la teneur en solubilité du  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  et de limiter les efflorescences à long terme [PAC 12].

Après fabrication, les éprouvettes sont conservées dans une salle régulée en température ( $24\pm 1^\circ\text{C}$ ) et démoulé après 1 jour. Les éprouvettes pour les mesures de résistance et de module de Young sont protégées de la dessiccation par une feuille de PVC et une double couche d'aluminium adhésif.

### 3. Procédure expérimentale

La résistance en traction et le module de Young dynamique sont mesurés à 3, 7 et 28 jours sur 3 éprouvettes (4 x 4 x 16 cm). La quantification du module se fait à l'aide de mesures ultrasons avec des capteurs d'ondes longitudinales et des essais de flexion sont réalisés pour déterminer la résistance en traction. Les éprouvettes sont pesées avant chaque essai afin de s'assurer qu'elles n'ont pas subi de séchage parasite.

Le retrait endogène et de dessiccation est mesuré sur 3 éprouvettes prismatiques (4 x 4 x 16 cm) à l'aide de plots insérés à chaque extrémité. Les conditions endogènes sont obtenues à l'aide d'une double couche d'aluminium adhésif, tandis que le séchage se fait uniquement par les faces latérales pour la mesure du retrait total, les extrémités étant protégées par une double couche d'aluminium adhésif. Les mesures débutent dès le décoffrage (à 1 jour) et les éprouvettes sont conservées dans une salle régulée en température ( $24\pm 1^\circ\text{C}$ ) et en humidité relative ( $35\pm 5\%$ ). Leur perte en masse est également mesurée.

En parallèle, le pH de la solution est mesuré 30 minutes après la mise en contact du ciment avec l'eau. Trois échantillons de solution aqueuse obtenue par centrifugation sont caractérisés. La mesure de la prise se fait à l'aide de l'essai vicat dans une salle régulée en température ( $24\pm 1^\circ\text{C}$ ) et la porosité à l'eau est mesurée à 28 jours sur trois éprouvettes après une saturation à l'eau de 24h et un séchage au four à  $50^\circ\text{C}$  jusqu'à l'obtention d'une perte de masse en 24h inférieure à 0,05%.

### 4. Résultats et discussion

L'étude expérimentale présentée par la suite porte sur l'effet de l'ajout de mono- et bi-additions minérales (laitier de haut-fourneau et cendres volantes) sur la résistance en traction, le module de Young dynamique et le retrait, paramètres affectant la sensibilité à la fissuration de ces matériaux lors de la restriction de leurs déformations différées. Dans un premier temps, l'effet d'une substitution partielle du laitier de haut-fourneau par des cendres volantes est analysé et les résultats sont comparés à ceux de matériaux cimentaires classiques et autorisés par la NF EN 206, telles que les compositions  $100\%CEMI$  et  $50\%CEMI+50\%L$ . Dans un second temps, l'effet de l'ajout d'une activation chimique alcaline (carbonate de sodium) est analysé pour ces matériaux avec bi-additions.

#### 4.1. Effet de l'ajout de cendres volantes

La Figure 1 présente la résistance en traction et le module de Young dynamique à 3, 7 et 28 jours pour la composition sans addition ( $100\%CEMI$ ), avec mono-addition ( $50\%CEMI+50\%L$ ,  $10\%CEMI+90\%L$ ) et bi-additions ( $10\%CEMI+70\%L+20\%CV$ ,  $5\%CEMI+70\%L+25\%CV$ ,  $5\%CEMI+75\%L+20\%CV$ ). La composition  $50\%CEMI+50\%L$  présente les meilleures performances en résistance en traction, supérieures à celles du  $100\%CEMI$  dès 3 jours. Ce comportement peut s'expliquer par sa cinétique d'hydratation plus rapide comme le montre sa durée de prise plus courte qui s'initie également plus rapidement (Tableau 1). Le passage à une teneur en laitier de haut-fourneau égale à 90% génère un ralentissement de l'évolution de la résistance en traction durant les premiers jours ( $< 7$  jours), au-delà les performances sont similaires. La substitution de 20% du laitier de haut-fourneau par des cendres volantes réduit fortement la résistance en traction à 3 et 7 jours ( $f_{t,moyen,3jours} = 1,1$  MPa;  $f_{t,moyen,7jours} = 2,2$  MPa). Ce comportement est en lien avec la cinétique d'hydratation vu le décalage observé pour la fin de prise (environ 2 h par rapport à la composition  $100\%CEMI$ ) (Tableau 1). Par contre, sa résistance en traction à 28 jours ( $f_{t,moyen,28jours} = 3,6$  MPa) est similaire aux autres compositions sans addition et avec mono-addition.

Plusieurs études [NAT 15] ont montré l'existence d'une substitution optimale entre 1 et 10% de ciment Portland pour des matériaux cimentaires à fortes teneurs en additions minérales. Dans cette étude, le pourcentage de ciment Portland a été réduit à 5%. Deux compositions ( $5\%CEMI+70\%L+25\%CV$ ,  $5\%CEMI+75\%L+20\%CV$ ) différant par leur teneur en laitier de haut-fourneau (70 et 75%) et en cendres volantes (25 et 20%) ont été étudiées (Figure 1). Il en résulte un accroissement de la résistance en traction dès 3 jours ( $f_{t,moyen,3jours} = 2,3$  MPa). A partir de 7 jours, la composition  $5\%CEMI+75\%L+20\%CV$  présente la résistance en traction la plus élevée qui est quasi-similaire à celle des compositions de référence ( $100\%CEMI$  et  $50\%CEMI+50\%L$ ). Cette différence entre ces deux compositions avec 5% de ciment Portland est probablement liée à leur cinétique d'hydratation, comme le suggère l'accroissement de la fin de prise (environ 2 h) pour la composition  $5\%CEMI+70\%L+25\%CV$ .

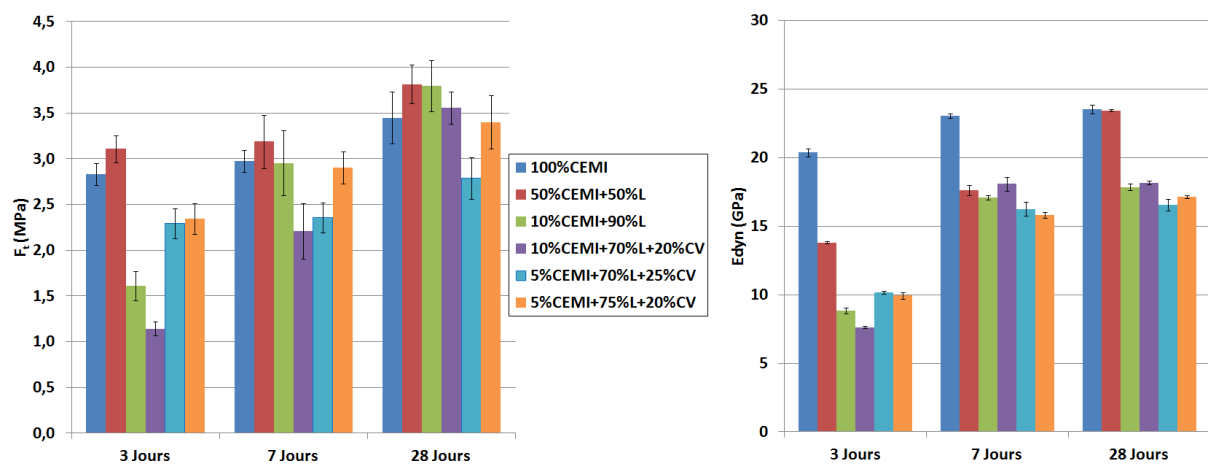


Figure 1. Résistance en traction par essai de flexion et module de Young dynamique.

	100%CEMI	50%CEMI +50%L	10%CEMI +90%L	10%CEMI +70%L +20%CV	5%CEMI +70%L +25%CV	5%CEMI +75%L +20%CV
<b>pH</b>	13,4	13,0	13,0	12,9	12,9	13,0
<b>Prise (h)</b>						
Début	5,0	4,5	4,6	4,8	6,9	7,2
Fin	8,1	6,1	8,3	10,1	15,2	12,6
<b>Porosité à l'eau (%)</b>	31	33	43	42	43	44
<b>CSF</b>						
3 Jours	3,1	2,6	2,1	3,1	0,7	1,2
7 Jours	8,4	9,7	9,0	15,6	10,3	8,7
28 Jours	17,1	17,3	18,9	16,8	19,8	16,9

Tableau 1. Valeur du pH après 30 minutes, début et fin de prise, porosité à l'eau à 28 jours et coefficient de sensibilité à la fissuration (CSF) à 3, 7 et 28 jours.

A 3 jours, le module de Young dynamique est inférieur à celui de la composition pour l'ensemble des compositions avec additions minérales, un élément positif par rapport à leur résistance à la fissuration au jeune âge. La valeur la plus faible est pour la composition 10%CEMI+70%L+20%CV ( $E_{dyn,moyen,3jours} = 7,6$  GPa). A 7 et 28 jours, les compositions avec 5% de ciment Portland présentent le plus faible module de Young dynamique ( $E_{dyn,moyen,7jours} = 15,8$  GPa ;  $E_{dyn,moyen,28jours} = 17,1$  GPa pour 5%CEMI+70%L+25%CV). Ces valeurs sont nettement inférieures à celles des compositions de référence (100%CEMI et 50%CEMI+50%L).

La Figure 2 présente les valeurs de retrait endogène et de dessiccation à 3, 7, 14 et 28 jours. Au cours des premiers jours, les compositions avec cendres volantes présentent un léger gonflement. Dès 7 jours, les compositions avec laitier de haut-fourneau présentent un accroissement conséquent du retrait endogène et de dessiccation. Elles se caractérisent également au cours des premiers jours par une perte en masse rapide liée à l'évaporation de l'eau contenue dans les pores de plus grandes dimensions ni induisant pas de dépressions capillaires significatives (Figure 3). Il en résulte un développement plus tardif du retrait de dessiccation pour ces matériaux. Par exemple, le retrait de dessiccation de la composition 5%CEMI+70%L+25%CV démarre lorsque la perte de masse atteint une valeur d'environ 14%. A 14 jours, les compositions avec 90% d'additions minérales présentent la plus grande valeur de retrait totale. A cet âge, le retrait endogène est plus faible pour les compositions incorporant des cendres volantes, ce qui est toujours le cas à 28 jours. Finalement, la composition présentant le plus grand retrait total à 28 jours est la composition avec bi-additions 10%CEMI+90%L, suivi par la composition avec tri-additions 5%CEMI+75%L+20%CV. Notons que ces compositions se caractérisent également par des valeurs de porosité à l'eau supérieure à celles 100%CEMI et 50%CEMI+50%L (Tableau 1). Ces résultats de retrait de dessiccation montrent clairement la grande sensibilité à la dessiccation des matériaux avec tri-additions, d'où l'importance de la cure et l'intérêt d'accélérer la réaction d'hydratation afin de limiter la teneur en eau évaporable lors du décoffrage.

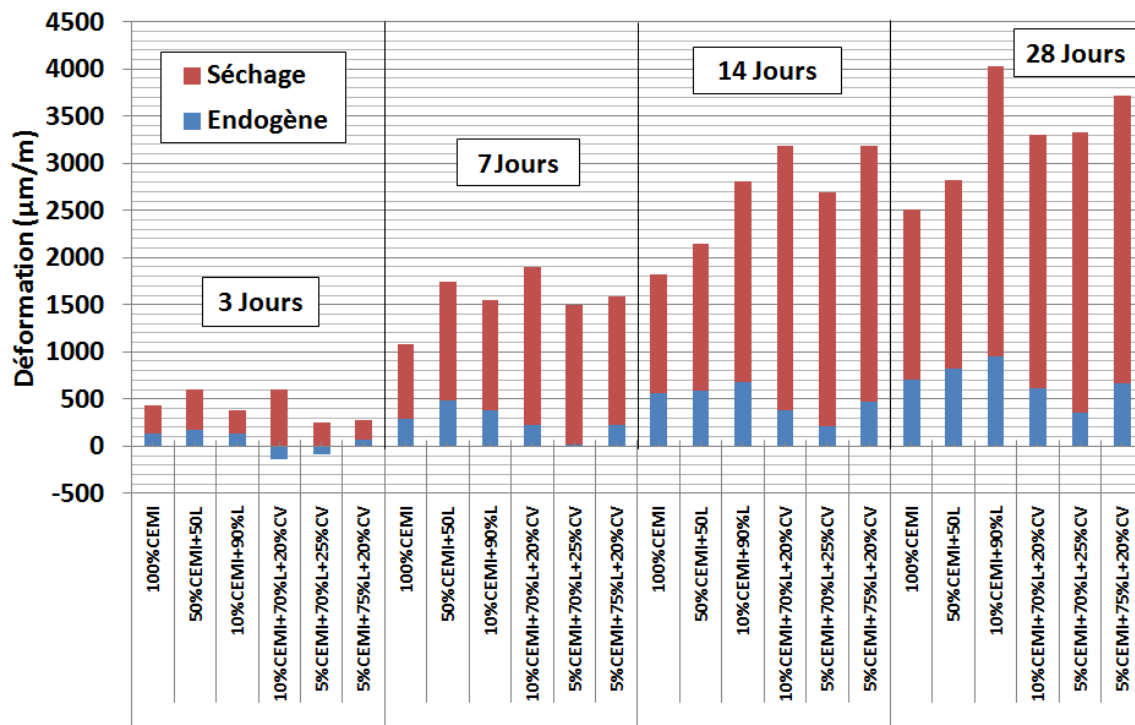


Figure 2. Retrait endogène et de dessiccation à 3, 7, 14 et 28 jours.

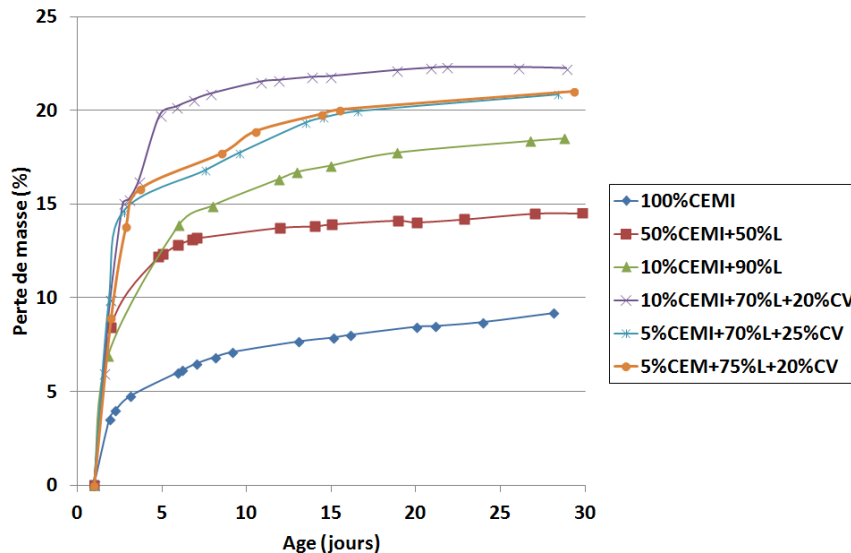


Figure 3. Evolution de la perte de masse.

Afin d'estimer la sensibilité à la fissuration de ces matériaux lorsque leurs retraits sont restreints, un coefficient de sensibilité à la fissuration est proposé (Equation 1) :

$$CSF = (\epsilon_{total, Xjours} * E_{dyn, Xjours}) / f_{t, Xjours} \quad [1]$$

Il faut souligner que ce coefficient ne prend pas en compte l'effet bénéfique du fluage (réduction des contraintes internes), paramètres variant également en fonction de la composition et du pourcentage d'additions minérales. Les valeurs de CSF à 3, 7 et 28 jours sont données dans le Tableau 1. On observe que les compositions présentant le moins de sensibilité à la fissuration sont les compositions avec 5% de ciment Portland (faible valeur de retrait) à 3 jours, les compositions 100%CEMI (faible retrait total et résistance élevée en traction) et 5%CEMI+75%L+20%CV (faible module de Young et résistance élevée en traction) à 7 jours et les compositions 5%CEMI+75%L+20%CV et 10%CEMI+70%L+20%CV (faible module de Young et résistance

élevée en traction) à 28 jours. Au vu des ces premiers résultats, la composition 5%CEMI+75%L+20%CV semble intéressante pour limiter le risque à la fissuration. Cependant cette composition présente une faible résistance au jeune âge ( $\leq 3$  jours) et une grande sensibilité à la dessiccation. Afin d'améliorer ces performances, une activation chimique alcaline à l'aide de carbonate de sodium a été mise en œuvre et les principaux résultats sont présentés ci-dessous.

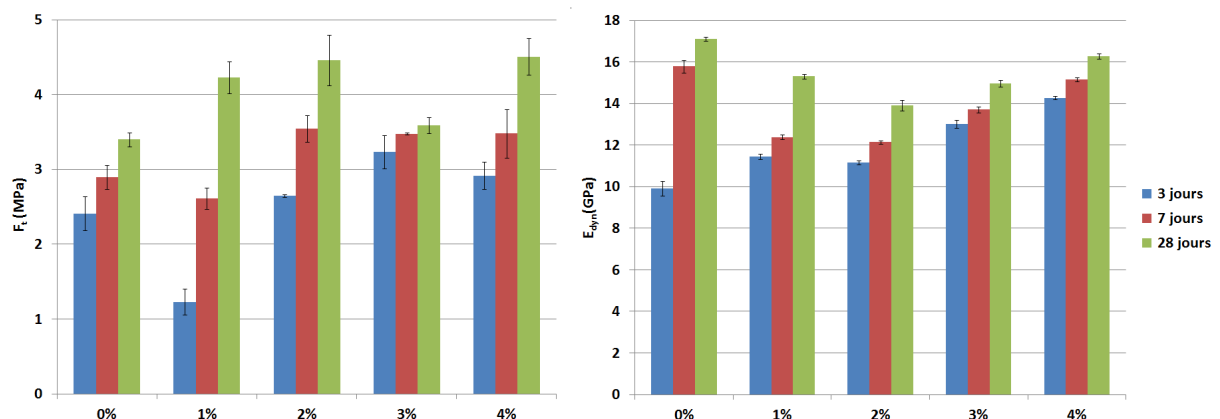
#### 4.2. Effet de l'activation au carbonate de sodium

L'effet du carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  comme activateur chimique a été testé à différents pourcentages (1, 2, 3 et 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$ ) sur la composition 5%CEMI+75%L+20%CV. Cet ajout permet premièrement d'accroître le pH de la solution (Tableau 2) qui devient quasi similaire à celui de la composition 100%CEMI (Tableau 1). Il en résulte une accélération de la dissolution du laitier se traduisant par une apparition plus rapide du début de la prise et par un raccourcissement de la durée de prise (Tableau 2). Cependant, l'effet sur la prise n'est pas proportionnel à la teneur en activateur. Ainsi, l'ajout de 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$  induit un léger retard de prise (Tableau 2).

Teneur en $\text{Na}_2\text{O}$	0%	1%	2%	3%	4%
pH	13,0	13,3	13,3	13,3	13,3
Prise (h)					
Début	7,2	1,9	1,9	1,9	3,3
Fin	12,6	3,3	4,2	4,4	5,5
CSF					
3 Jours	1,2	1,7	1,2	1,4	2,7
7 Jours	9,2	4,9	1,4	2,1	3,6
28 Jours	16,9	6,5	2,4	3,7	5,7

**Tableau 2.** Valeur du pH après 30 minutes, début et fin de prise, porosité à l'eau à 28 jours et coefficient de sensibilité à la fissuration (CSF) à 3, 7 et 28 jours pour des teneurs en  $\text{Na}_2\text{O}$  de 0 à 4%.

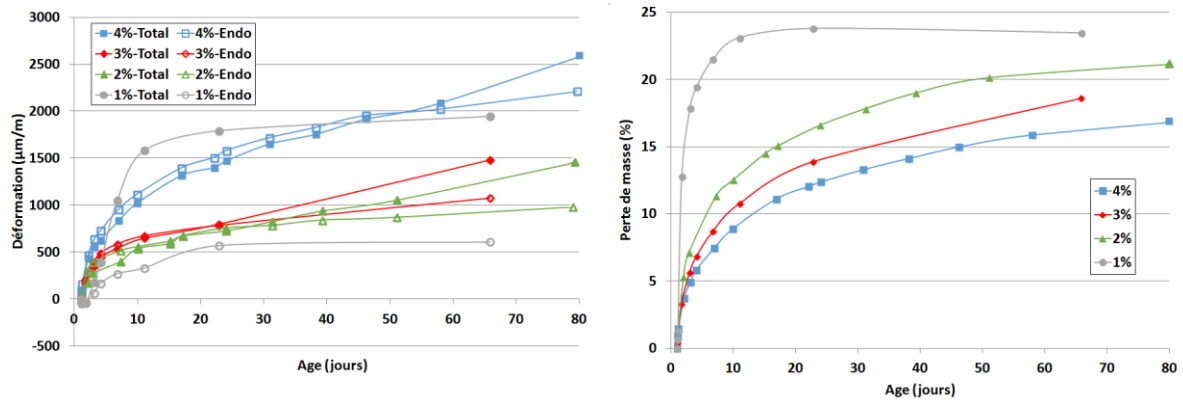
Malgré une accélération de la prise, l'ajout de 1% de  $\text{Na}_2\text{O}$  n'est pas bénéfique pour accroître la résistance en traction au jeune âge et permet d'atteindre une résistance supérieure à celle de la composition sans activateur uniquement à 28 jours (Figure 4). Avec 2% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , la résistance en traction est similaire à celle sans activateur à 3 jours et supérieure à 7 et 28 jours. Par contre, une teneur de 3 et 4% en  $\text{Na}_2\text{O}$  permet d'atteindre des valeurs de résistance en traction supérieure dès 3 jours ( $f_{t,\text{moyen},3\text{jours}} = 2,9$  MPa pour 4%,  $f_{t,\text{moyen},3\text{jours}} = 3,2$  MPa pour 3%). Malgré un accroissement plus rapide de sa résistance en traction, la composition avec 3% de  $\text{Na}_2\text{O}$  présente un faible taux d'accroissement au-delà de 7 jours. Par contre, celui-ci est quasi-similaire et plus important pour les compositions avec 2 et 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . A 28 jours, leur résistance en traction ( $f_{t,\text{moyen},28\text{jours}} = 4,5$  MPa) est nettement supérieure à celle de la composition sans activateur ( $f_{t,\text{moyen},28\text{jours}} = 3,4$  MPa).



**Figure 4.** Résistance en traction par essai de flexion et module de Young dynamique pour des teneurs en carbonate de sodium de 0 à 4%.

L'utilisation d'activateur génère un accroissement du module de Young dynamique dès 3 jours quel que soit le dosage en activateur (Figure 4). Il est cependant plus important pour les compositions avec 3 et 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . A 7 et 28 jours, la valeur de ce paramètre est inférieure à celle de la composition sans activateur quel que soit le

dosage en activateur. Il est à noter que l'accroissement du module de Young dynamique n'est pas proportionnel à la quantité en activateur, bien que ce soit la composition avec 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$  qui présente la valeur la plus élevée à tout âge ( $E_{\text{dyn,moyen,3jours}} = 14,3 \text{ GPa}$ ,  $E_{\text{dyn,moyen,7jours}} = 15,2 \text{ GPa}$ ,  $E_{\text{dyn,moyen,28jours}} = 16,3 \text{ GPa}$ ).



**Figure 5.** Evolution du retrait endogène, total et de la perte de masse pour des teneurs en  $\text{Na}_2\text{O}$  de 1 à 4%.

La Figure 5 présente l'évolution du retrait endogène et total pour les compositions activées au carbonate de sodium. Leur retrait total est nettement inférieur à celui de la composition sans activateur – 2 fois plus faible pour la composition avec 1% de  $\text{Na}_2\text{O}$  à 28 jours. L'évolution du retrait total est quasi-similaire pour les compositions avec 2% et 3% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . A long terme (> 2 mois), cette déformation devient plus importante pour la composition avec 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . Par contre, le retrait endogène est proche pour les compositions avec 0, 1, 2 et 3%. Tandis qu'il est nettement supérieur pour la composition avec 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$  par rapport à celui des compositions avec différents dosages en additions minérales étudiées précédemment (Figure 2). Cependant, la Figure 5 montre que le retrait total et le retrait endogène sont quasi similaires durant le 1<sup>er</sup> mois pour les compositions avec un dosage en activateur supérieur à 1% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . Cela montre clairement l'existence d'un couplage fort entre l'hydratation et le séchage. Ce dernier réduit la teneur en eau disponible pour l'hydratation du matériau affectant ainsi l'évolution des déformations endogènes. Notons que la zone de pénétration de l'air, présentant une microstructure légèrement différente, peut facilement être détectée dans les matériaux à forte teneur en laitier de haut-fourneau suite à la réaction d'oxydation des sulfures. Il apparait que ce front de pénétration est significatif à 28 jours et est équivalent à 1,2 cm pour les compositions avec 2% et 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

La Figure 5 montre que la cinétique d'évolution de la perte de masse décroît avec le pourcentage en activateur, ainsi que son amplitude. A la différence de la composition avec 1% de  $\text{Na}_2\text{O}$ , les courbes « retrait/perte en masse » des autres compositions se caractérisent rapidement par une relation linéaire entre le retrait total et la perte en masse. Cependant une prise de masse parasite peut affecter ces résultats au vue des potentielles réactions avec l'air. Par exemple, l'oxydation des sulfures peut générer une prise de masse de 0,5 à 2% du poids du laitier en fonction des réactions d'oxydations et de la teneur initiale en soufre dans le laitier. Les résultats de DSC réalisés sur la zone ayant été en contact avec l'air ne présentent pas de pics liés aux carbonates de calcium entre 660 et 760°C [PER 96]. Ainsi, la carbonatation ne semble pas avoir impactée ces mesures. Par contre, un épaulement est observé entre 500 et 680°C, confirmant la présence d'une phase hydratée supplémentaire par rapport aux échantillons protégés de la dessiccation.

Au sujet de la sensibilité à la fissuration, l'ajout d'un activateur n'améliore pas ce coefficient au jeune âge (3 jours) (Tableau 2). Ce comportement est lié à l'accroissement du retrait total à 3 jours pour les compositions avec 2, 3 et 4% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . A 7 et 28 jours, le coefficient de sensibilité à la fissuration est réduit pour les compositions avec une activation chimique grâce à un retrait total moindre, une résistance en traction plus élevée et un module de Young plus faible. La composition présentant le plus faible coefficient est celle avec 2% de  $\text{Na}_2\text{O}$ .

## 5. Conclusions

Cette étude préliminaire sur l'utilisation de bi-additions (laitier de haut-fourneau et cendres volantes) a montré que ce type de substitution est intéressant pour réduire le module de Young et obtenir des résistances acceptables à long terme. Une valeur de 5% de ciment Portland permet ainsi d'améliorer les performances du matériau vis-à-vis de leur résistance à la fissuration suite à la restriction du retrait. Cependant, ces matériaux présentent un retrait total important à 28 jours lié à leur grande sensibilité à la dessiccation. Il est donc important

de limiter, pour ce type de liant hydraulique, la teneur en eau évaporable lors de la mise en contact du matériau avec son environnement à l'aide d'une cure adéquate ou en accélérant leur hydratation au jeune âge. Cette seconde solution permet également d'accroître la résistance du matériau au jeune âge.

L'utilisation d'une activation chimique avec du carbonate de sodium permet d'accroître la résistance en traction au jeune âge (à partir de 3% de  $\text{Na}_2\text{O}$ ) et de réduire le module de Young. La composition présentant le plus faible coefficient de sensibilité à la fissuration à partir de 7 jours est celle avec 2% de  $\text{Na}_2\text{O}$ . Par contre, le retrait endogène augmente lors de l'utilisation de ce type d'activateur et un couplage fort apparait entre l'hydratation et le séchage. Pour comprendre ces différentes observations des essais expérimentaux à l'échelle méso-et microscopique sont en cours afin de caractériser les produits d'hydratation et la porosité.

## 6. Bibliographie

- [BEN 15] Benboudjema F., Darquennes A., « Fissuration par retrait gêné dans les ouvrages en béton armé », Techniques de l'ingénieur, C2255, 2015.
- [BIJ 98] Bijen J., *Blast furnace slag cement for durable marine structures*, CIP Royal Library Den Haag, Stichting Betonprisma, 's-Hertogenbosch, The Netherlands, 1998.
- [DAR 16] Darquennes A., Olivier K., Benboudjema, F., Gagné, R., « Self-healing at early-age, a way to improve the chloride resistance of blast-furnace slag cementitious materials », *Construction and Building Materials*, vol. 113, 2016, p.1017-1028.
- [ESC 98] Escalante-Garcia J.I., Sharp J.H., « Effect of temperature on the hydration of the main clinker phases in Portland cements: Part II, Blended cements », *Cement and Concrete Research*, vol. 28, n°9, 1998, p. 1259-1274.
- [FER 97] Fernandez-Jimenez A., Puertas, F., « Alkali-activated slag cements : kinetic studies », *Cement and Concrete Research*, vol.27, n°3, 1997, p. 359-368.
- [KUM 08] Kumar S., Kumar R., Bandopadhyay A., Alex T.C., Ravi Kumar B., Das S.K., Mehrotra S.P., « Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of Portland slag cement », *Cement and Concrete Composites*, vol.30, 2008, p. 679-685.
- [MOU 11] Mounanga P., Khokhar M.I.A., El Hachem R., Loukili A., « Improvement of the early-age reactivity of fly ash and blast-furnace slag cementitious systems using limestone filler », *Materials and Structures*, vol. 44, 2011, p. 437-453.
- [NAT 15] Nath P., Sarker P. K., « Use of OPC to improve setting and early strength properties of low calcium fly ash geopolymer concrete cured at room temperature », *Cement and Concrete Composites*, vol. 55, 2015, p. 205-214.
- [NF EN 197-1] Ciment, Partie 1 : Composition, spécifications et critères de conformité des ciments courants, 2012.
- [NF EN 206] Béton – Spécification, performances, production et conformité, 2014.
- [PAC 12] Pacheco-Torgal F., Abdollahnejad Z., Camoes A.F., Jamshidi M., Ding Y., « Durability of alkali-activated binders: a clear advantage over Portland cement or an unproven issue? », *Construction and Building Materials*, vol.30, 2012, p. 400-405.
- [PER 96] Perić J., Vučak M., Krstulović R., Brečević Lj., Kralj, D., « Phase transformation of calcium carbonate polymorphs », *Thermochimica Acta*, vol. 277, 1996, p. 175-186.
- [RAS 13] Rashad A.M., Bai Y., Basheer P.A.M., Milestone, N.B., Collier, N.C., « Hydration and properties of sodium sulfate activated slag », *Cement and Concrete Composites*, vol. 37, 2013, p. 20-29.
- [SHI 93] Shi C., Day R.L., « Chemical activation of blended cements made with lime and natural pozzolans », *Cement and Concrete Research*, vol.23, 1993, p. 1389-1396.
- [SHI 96] Shi C., Day R.L., « Some factors affecting early hydration of alkali-slag cements », vol. 26, n°3, 1996, p. 439-447.