

Suivi et modélisation du fluage propre à long terme de liants à base de laitier activé par des alcalis

Ali Naqi¹, Brice Delsaute^{1,2}, Stéphanie Staquet¹

¹ Service BATir, Université libre de Bruxelles (ULB), Avenue A. Buyl 87, 1050 Bruxelles, Belgium

² CRIC-OCCN, Avenue A. Buyl 87, 1050 Bruxelles, Belgium

RESUME Cette étude fournit des informations précieuses sur le comportement du fluage propre de diverses compositions dans des systèmes avec du laitier activé par des alcalis pour plusieurs âges de chargement, en particulier au tout jeune âge, inférieur à 24 h, et aux âges ultérieurs, supérieurs à 672 h. Il est démontré que l'utilisation d'une expression logarithmique contenant deux paramètres, à savoir le paramètre d'amplitude C et le paramètre de cinétique de réaction τ décrivant le matériau, permet de prédire avec précision l'évolution du fluage propre dès le tout jeune âge. L'étude actuelle porte spécifiquement sur le fluage en compression sous des niveaux de contrainte modérés (rapport contrainte/résistance de 30 %) et à une température de durcissement de 20 °C.

Mots-clefs fluage propre, laitier active par des alcalins, compression.

I. INTRODUCTION

Ces dernières décennies, les matériaux activés par des alcalins (MAA) sont apparus comme une alternative prometteuse aux systèmes traditionnels avec du ciment Portland (PC). Ils réduisent non seulement les émissions de CO₂, mais offrent également des propriétés techniques supérieures. La littérature traitant des déformations dans les systèmes activés par des alcalins par rapport aux matériaux à base de ciment est limitée [Caron, 2023]. Dans les liants à base de ciment Portland (PC), le mécanisme de fluage est influencé par des facteurs tels que la teneur en eau, les conditions de cure qui affectent la réponse viscoélastique du liant. En revanche, les systèmes MAA utilisent des liants créés avec différentes combinaisons de précurseurs et d'activateurs et des conditions de cure variables. Les caractéristiques de fluage diffèrent non seulement de celles des liants à base de PC, mais aussi entre eux en raison des disparités de microstructure de leurs produits de réaction. Afin de faciliter leur application à plus grande échelle et de garantir des pratiques de conception durable, une compréhension approfondie du comportement à long terme de ces matériaux est essentielle, notamment l'amplitude de fluage plus élevée que celle des mélanges à base de PC.

II. PROGRAMME EXPERIMENTAL

A. Matières premières

Le laitier granulé de haut fourneau est le précurseur utilisé dans cette étude. La composition en oxydes est résumée dans le tableau 1. La finesse Blaine du laitier est de 516 m²/kg. Sa masse volumique est de 2,92. De l'hydroxyde de sodium (NaOH) pur à 97 % sous forme de poudre est

utilisé comme activateur alcalin. Du sable siliceux séché au four (0/4 mm) a été utilisé comme granulats fin.

TABLEAU 1. Composition en oxydes du laitier (%)

| | |
|--------------------------------|-------|
| CaO | 40.80 |
| SiO ₂ | 33.30 |
| Al ₂ O ₃ | 12.30 |
| MgO | 7.84 |
| SO ₃ | 2.30 |
| TiO ₂ | 1.29 |
| K ₂ O | 0.67 |
| Na ₂ O | 0.44 |
| Fe ₂ O ₃ | 0.39 |
| MnO | 0.36 |
| BaO | 0.11 |

B. Proportions des mélanges, procédure de malaxage et préparation des échantillons

Des perles d'hydroxyde de sodium anhydre ont été mélangées à de l'eau distillée pour obtenir deux concentrations molaires : 2 et 8 M. Les solutions alcalines ont été préparées 24 heures avant la préparation du mélange. Deux groupes de mélanges de mortier activé par les alcalis (MAA) ont été préparés afin d'étudier l'impact de différentes concentrations molaires et de différents rapports solution/liant ou eau/liant (S/L ou E/L). Dans le premier groupe, le rapport S/L est resté constant à 0,5 ; dans le second groupe, il a été fixé à 0,8 pour les deux concentrations molaires. Les détails des mélanges utilisés dans cette étude sont présentés dans le tableau 2. Les mélanges de MAA ont été étiquetés avec leur concentration molaire respective, suivie du rapport S/L. Par exemple, le premier mélange a été étiqueté comme suit : 8 M – 0,5 SB, ce qui correspond à une molarité de 8 M et un rapport S/L de 0,5.

TABLEAU 2. Conception des mélanges de mortier à base de laitier activé (kg/m³)

| Mortier ID | NaOH (mol/L) | Laitier (kg) | Sol. (kg) | Eau (kg) | Sable (kg) | S/L (S/B) | E/L (W/B) | Na ₂ O* (%) |
|------------|--------------|--------------|-----------|----------|------------|-----------|-----------|------------------------|
| 8M – 0.5SB | 8 | 750 | 375 | 281 | 1125 | 0.5 | 0.37 | 9.76 |
| 2M – 0.5SB | 2 | 710 | 355 | 329 | 1065 | 0.5 | 0.46 | 2.88 |
| 8M – 0.8SB | 8 | 595 | 476 | 357 | 1071 | 0.8 | 0.60 | 15.61 |
| 2M – 0.8SB | 2 | 554 | 443 | 410 | 997 | 0.8 | 0.74 | 4.61 |

*Pourcentage en masse de GGBFS

Le rapport sable/pâte a été fixé à 1 pour tous les échantillons étudiés afin de maintenir l'homogénéité des mélanges. Il est important de noter que la teneur en eau absorbée par le sable, avec un coefficient d'absorption de 1,99 %, n'est pas prise en compte dans ces proportions.

Des mélanges de mortier frais ont été préparés à l'aide d'un malaxeur d'une capacité de 20 litres conformément à la norme européenne EN 480-1 :2023, de la manière suivante : la solution d'activateur a été versée dans le bol de malaxage, puis le laitier a été ajouté. Le malaxage a été effectué à basse vitesse (300 ± 10 tr/min) pendant 60 secondes, puis la vitesse a été augmentée à grande vitesse (500 ± 10 tr/min) pendant 30 secondes supplémentaires. Le sable a ensuite été ajouté au mélange pâteux dans les 30 secondes, le malaxeur étant toujours à basse vitesse, puis la vitesse de malaxage a été augmentée à grande vitesse pendant 30 secondes supplémentaires. Le

malaxeur a ensuite été laissé au repos pendant 90 secondes, le bol a été raclé et le malaxage s'est terminé par un malaxage à grande vitesse pendant 60 secondes.

Des cylindres et des cubes ont été produits à chaque coulage. Des cubes de 50 mm de côté ont été utilisés pour évaluer la résistance à la compression et vérifier la contrainte lors de l'application de la charge sur les échantillons cylindriques (la résistance à la compression des cylindres est supposée être 20 % inférieure à celle obtenue sur les cubes). Chaque ensemble de 4 compositions a subi deux coulages. Lors du 1^{er} coulage, des échantillons cylindriques destinés aux essais au jeune âge ont été produits, ce qui a donné un total de 8 cylindres, avec deux échantillons pour chaque âge de chargement et deux échantillons jumeaux. Lors du 2^{ème} coulage, 4 cylindres ont été produits, avec deux échantillons pour un âge de chargement plus tardif et deux échantillons jumeaux. Des échantillons présentant initialement une concentration molaire de 2 M ont été coulés, suivis de ceux présentant une concentration de 8 M. Après la coulée, les échantillons ont été stockés dans une enceinte à température contrôlée à 20 °C. Démoulés après 24 heures, les échantillons ont été emballés dans des films plastiques et replacés dans l'enceinte climatique jusqu'aux essais. Pour chaque âge d'essai, une moyenne de trois échantillons a été prélevée afin d'obtenir la valeur de résistance.

C. Dispositif d'essai pour le fluage en compression

Des essais de fluage en compression ont été réalisés sur des échantillons cylindriques de 97 mm de diamètre et 350 mm de hauteur. Un échantillon jumeau sans charge de dimensions identiques a été préparé pour le suivi des déformations libres (thermiques et endogènes). L'essai a été réalisé sur deux échantillons identiques provenant du même lot afin de garantir une bonne répétabilité des résultats. Un thermocouple a été intégré à l'échantillon jumeau, tandis qu'un autre a été placé afin de suivre les variations de température de l'échantillon et de l'environnement ambiant. Après le coulage, le mélange de mortier a été coulé dans un moule en PVC et stocké dans une enceinte thermo-régulée à 20 °C. Après quelques heures, les échantillons ont été démoulés et les deux faces ont été rectifiées pour garantir une surface plane. Ils ont ensuite été enveloppés dans deux feuilles d'aluminium autocollantes afin de garantir un environnement étanche et éviter toute perte de masse par séchage parasite.

Le banc de compression était composé d'une cellule de charge, de trois capteurs de déplacement Solartron, d'une pièce de transition et d'un vérin plat (voir figure 1). La cellule de charge était placée au sommet de l'échantillon et la pression était appliquée à l'échantillon via le vérin plat. Les niveaux de pression étaient contrôlés par un système de pompe hydraulique. Afin d'assurer une répartition uniforme de la charge et de minimiser l'excentricité, des vérins plats de différentes dimensions ont été utilisés pour différents niveaux de charge. Les déformations des échantillons ont été enregistrées à l'aide de trois capteurs de déplacement fixés à l'extensomètre, constitué de deux anneaux en aluminium espacés de 200 mm. Ces capteurs de déplacement étaient soutenus par trois tiges en Invar®, espacées de 120° autour de l'échantillon. Les essais ont été réalisés dans une salle climatisée à une température de 20 °C et une humidité relative de 50 %.

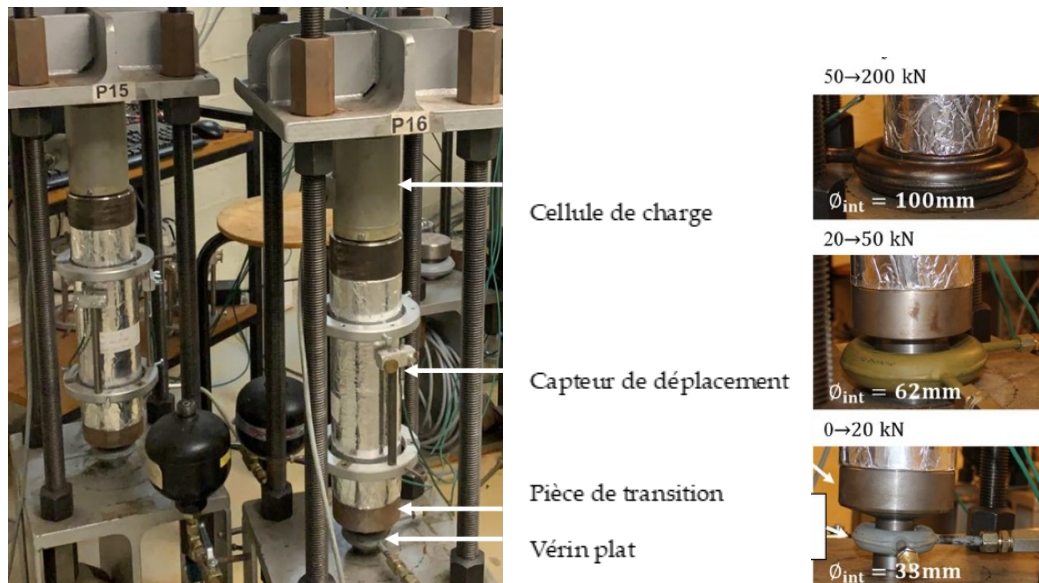


FIGURE 1. Dispositif d'essai pour le fluage en compression et vérins plats avec différentes dimensions.

II. RESULTATS EXPERIMENTAUX POUR LE FLUAGE PROPRE EN COMPRESSION

Pour chaque composition, quatre essais de fluage en compression ont été réalisés sur une période de quelques semaines. Les résultats présentés sont la moyenne de deux échantillons afin de garantir la répétabilité des résultats. La contrainte appliquée représentait 30 % de la résistance à la compression, les âges de chargement étant sélectionnés en fonction des résultats de calorimétrie isotherme. À partir des observations faites sur les courbes de dégagement de chaleur, il a été décidé de tester chaque composition au jeune âge (trois âges) puis à un âge plus tardif afin de suivre l'évolution des propriétés viscoélastiques. Cette approche a permis de garantir que chaque composition était chargée à un degré de réaction ADoR comparable. Chaque composition a été testée à des valeurs ADoR de 0,40, 0,50, 0,70 et 0,85 (voir figure 2). Le module d'élasticité a été estimé par régression linéaire sur les mesures de contrainte et de déformation obtenues pendant le chargement au moyen de la cellule de charge et de l'extensomètre illustrés à la figure 1.

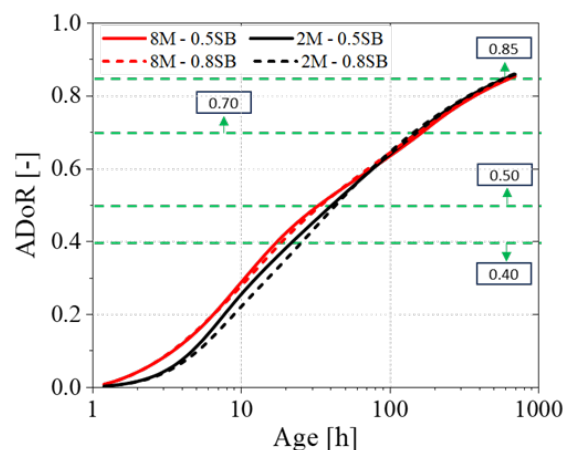


FIGURE 2. Degrés d'avancement de la réaction (ADoR) au chargement : lignes interrompues.

Les âges choisis au chargement, l'ADoR correspondant à l'âge de chargement ainsi que les valeurs de résistance à la compression et le module d'élasticité aux âges de chargement sont répertoriés dans le tableau 3.

TABLEAU 3. Programme d'essais de fluage en compression à long terme. Les âges sous charge sont définis en fonction du degré d'avancement de la réaction (ADoR).

| Mortier ID | ADoR | Temps [h] | Module élastique E [GPa] |
|------------|------|-----------|--------------------------|
| 8M – 0.5SB | 0.37 | 15 | 20.50 |
| | 0.52 | 38 | 22.90 |
| | 0.68 | 136 | 24.15 |
| | 0.85 | 696 | 32.40 |
| 2M – 0.5SB | 0.42 | 24 | 14.30 |
| | 0.54 | 51 | 14.70 |
| | 0.71 | 162 | 24.00 |
| | 0.86 | 696 | 26.50 |
| 8M – 0.8SB | 0.44 | 24 | 11.80 |
| | 0.53 | 43 | 13.75 |
| | 0.70 | 165 | 17.70 |
| | 0.85 | 696 | 19.65 |
| 2M – 0.8SB | 0.40 | 26.5 | 8.00 |
| | 0.55 | 56.5 | 9.25 |
| | 0.74 | 196 | 11.55 |
| | 0.86 | 696 | 16.60 |

A. Contrainte appliquée

La contrainte appliquée, représentant 30 % de la résistance maximale à la compression, a été étroitement surveillée pour chaque échantillon. La figure 3 illustre les niveaux de contrainte de compression appliqués à différents âges de chargement, corrélés à l'avancement de la réaction (voir tableau 3) pour toutes les compositions. Ces résultats représentent la moyenne de deux échantillons du même coulage, garantissant la répétabilité de l'essai. Toutes les courbes présentent une augmentation quasi instantanée (moins de 30s) de l'amplitude de la charge à chaque âge de chargement, qui s'est ensuite maintenue de manière constante jusqu'à la fin de l'essai. Les fluctuations observées des niveaux de contrainte à des intervalles spécifiques ont été attribuées à la déformation par fluage, entraînant une légère diminution de la contrainte qui a été ajustée en réappliquant la charge aux niveaux initiaux de contrainte. Un autre facteur à prendre en compte est le type de vérin plat utilisé pour charger l'échantillon, où des vérins plats de diamètres variables ont été utilisés en fonction des niveaux de contrainte (voir figure 1). Au cours de l'essai, il a été systématiquement observé que la décroissance de la contrainte était plus prononcée immédiatement après le chargement, puis se stabilisait au fil du temps. Trois phases de chargement ont été appliquées au jeune âge, suivies d'une charge supplémentaire aux stades ultérieurs. Les schémas de couleurs utilisés pour différencier les différentes phases de chargement sont les suivants :

- La ligne verte indique le premier âge à la mise en charge, selon un degré de réaction spécifié, comme indiqué dans le tableau 3
- La ligne violette indique le deuxième âge à la mise en charge
- La ligne bleue indique le troisième âge à la mise en charge
- La ligne rouge indique le quatrième âge à la mise en charge.

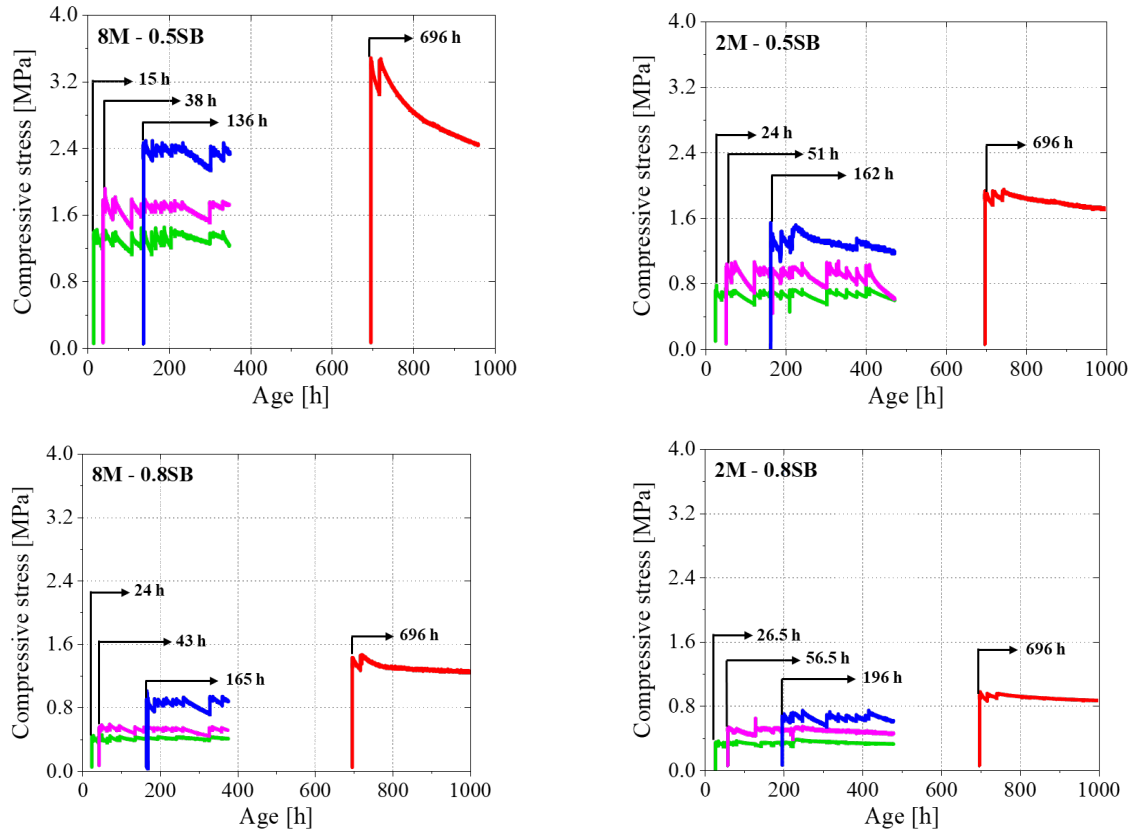


FIGURE 3. Evolution des contraintes en compression à différents âges au chargement.

B. Evolution de la déformation totale et de la déformation endogène

La déformation est notée par $\varepsilon = \frac{\Delta d}{l_0}$, où Δd représente la variation du déplacement et $l_0=200\text{mm}$ est la longueur initiale. La déformation totale ε_{tot} représente la somme de la déformation élastique ε_{el} , de la déformation de fluage ε_{cr} et de la déformation libre ε_{fl} . Les résultats présentés sont la moyenne de deux échantillons. On a supposé que la phase initiale de chargement rapide correspondait aux déformations élastiques instantanées, suivies des déformations de fluage. Une telle distinction n'est qu'une approximation, sachant que les déformations de fluage commencent à se développer pendant la phase de chargement. La figure 4 présente la déformation uni-axiale totale de l'échantillon chargé et la déformation libre de l'échantillon jumeau pour les quatre compositions à différents âges de chargement. L'échantillon 8M - 0,5SB, préparé avec une teneur en eau/liant de 0,37, a présenté la plus forte évolution de la déformation totale parmi toutes les compositions testées. Cette tendance peut être attribuée à l'auto-dessiccation, particulièrement importante dans les mélanges à rapport eau/liant plus faible en condition scellée [Bentz, 2009], entraînant par conséquent une augmentation du fluage [Hu, 2020].

Pour ce même mélange, les âges ultérieurs (38 h, 136 h, 696 h) de chargement ont montré une évolution encore plus élevée de la déformation totale par rapport à l'âge de chargement initial à 15 h. Ce phénomène pourrait être lié au développement de microfissurations car le potentiel d'un tel développement s'est avéré ne pas être aussi marqué avec l'essai plus précoce que le premier jour [Li, 2021]. De plus, à ces âges ultérieurs, la contrainte appliquée aux échantillons potentiellement microfissurés pourrait avoir dépassé le seuil de comportement linéaire en raison d'une surface effective réduite en contact avec le chargement entraînant une déformation totale plus élevée. En revanche, l'échantillon homologue, 2M - 0,5SB, a montré des déformations endogènes plus faibles en raison de sa teneur en eau/liant relativement plus élevée de 0,46. Il a également montré une diminution continue du développement de la déformation totale pour les âges ultérieurs de chargement. Cette tendance était prévisible car l'augmentation du degré de réaction conduit à une microstructure plus dense et à une réduction des propriétés visqueuses à mesure que la rigidité se développe [Delsaute, 2016]. Une tendance similaire a été observée pour l'échantillon 2M - 0,8SB.

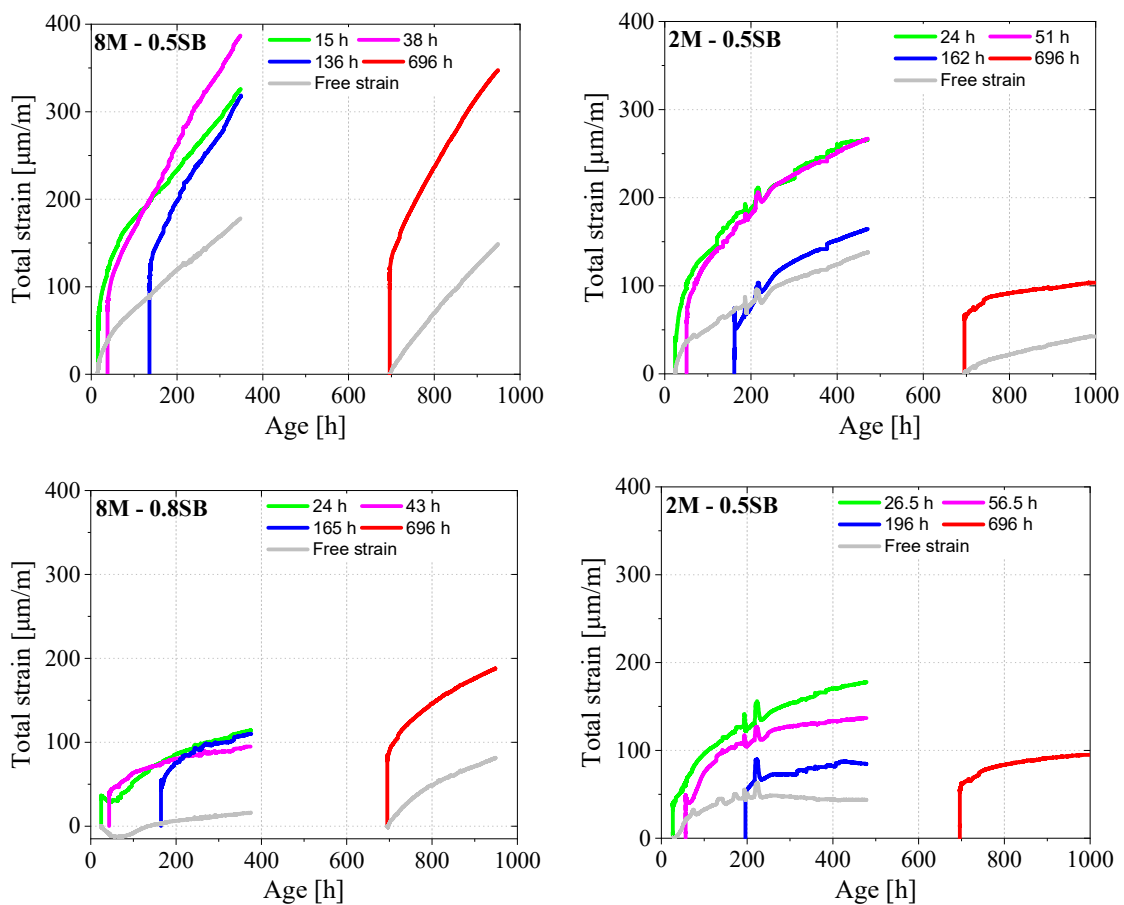


FIGURE 4. Evolution de la déformation totale et du retrait endogène à plusieurs âges au chargement. (retrait positif et gonflement négatif).

Dans le cas du mélange 8M - 0,8SB, un gonflement a été observé lors de la mise en charge initiale (voir figure 4). La déformation endogène peut entraîner un gonflement ou un retrait selon les proportions du mélange. Dans ce cas particulier, le mélange a été préparé avec un rapport S/L de

0,8, correspondant à un rapport E/L de 0,60 et une teneur en Na₂O de 15,61 %. Bien qu'aucun ressuage n'ait été observé lors du coulage, il est possible que la solution soit expulsée lors du retrait initial, ce qui est associé à des modifications chimiques du matériau. Après cette étape, le matériau commence à réabsorber la solution. Un autre facteur important est la pression capillaire. Un rapport S/L élevé entraîne des pores plus nombreux et plus grands. Des pores plus grands entraînent une pression capillaire moindre, ce qui réduit le retrait par auto-dessiccation et un gonflement plus marqué [Lee, 2014].

III. MODELISATION DU FLUAGE PROPRE

Les résultats du fluage propre en compression sont présentés sur la base de la fonction de fluage spécifique J définie dans l'équation ci-dessous:

$$J(t, t') = \frac{\varepsilon_{\text{tot}}(t, t') - \varepsilon_{\text{el}}(t') - \varepsilon_{\text{fr}}(t)}{\sigma} = \frac{\varepsilon_{\text{cr}}(t, t')}{\sigma} \quad (1)$$

où t est l'âge de l'échantillon, t' est l'âge au chargement, ε_{tot} est la déformation totale de l'échantillon chargé, ε_{el} est la déformation élastique de l'échantillon chargé, ε_{cr} est la déformation de fluage de l'échantillon chargé, ε_{fr} est la déformation libre de l'échantillon jumeau (déformation endogène et thermique) et σ est la contrainte appliquée sur l'échantillon chargé. Dans la figure 5, les marqueurs solides illustrent les résultats expérimentaux des quatre compositions testées à différents âges de chargement. Le développement du fluage spécifique était particulièrement influencé par l'âge de chargement, en particulier dans les mélanges à faible concentration molaire (2 M) et à rapport eau/liant (E/L) relativement élevé. Cet effet était plus prononcé lorsque le chargement était appliqué dans les 24 premières heures. Par exemple, l'amplitude du fluage spécifique de 2M – 0,5SB avec un rapport E/L de 0,46 était environ 65 % supérieure à celle de son homologue, 8M – 0,5SB avec un rapport E/L de 0,37. Cependant, à des âges de chargement ultérieurs, aucune différence significative d'amplitude n'a été observée entre ces deux mélanges. Au contraire, le mélange 2M – 0,8SB avec un rapport E/B de 0,74 a montré un développement plus élevé du fluage spécifique (à deux âges de chargement en 56,5 heures) - environ 48 % et 76 % plus élevé par rapport à son homologue, 8M – 0,8SB, qui avait une teneur E/B de 0,60. À des âges plus tardifs (âge de chargement de 696 heures), cette différence d'ampleur était encore plus prononcée, le fluage spécifique du mélange 2 M affichant une valeur environ 150 % plus élevée par rapport au mélange 8 M pour le même rapport E/B de 0,8.

Une version revisitée du Model Code 2010 (MC2010), telle que proposée par [Le Roy 2017], caractérise le fluage de base à l'aide d'une expression logarithmique:

$$J(t, t') = \frac{1}{C} \cdot \ln \left(1 + \frac{t - t'}{\tau(t')} \right) \quad (2)$$

Ici, le paramètre C [GPa] est une constante spécifique à la composition. Il indique l'amplitude globale du fluage à long terme, quel que soit l'âge de chargement. Le paramètre τ [h] est une constante cinétique influencée par l'âge de chargement et le type de composition. Pour calibrer le modèle, les valeurs des paramètres C et τ ont été ajustées aux données expérimentales en minimisant l'écart entre les résultats expérimentaux et l'ajustement du modèle.

La figure 5 présente une comparaison entre les données expérimentales et les prédictions du modèle (équation 2). On observe une bonne concordance entre les résultats expérimentaux et les valeurs ajustées du modèle pour différents âges de charge.

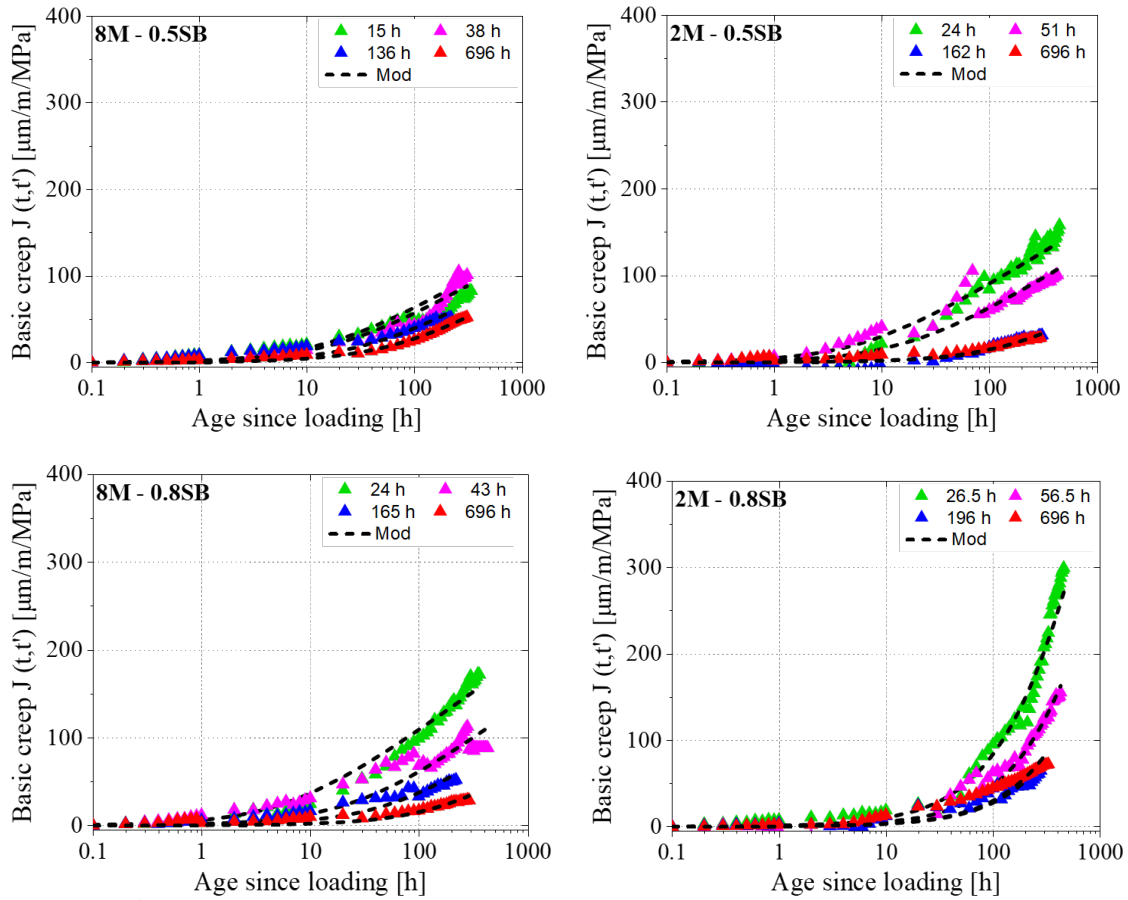


FIGURE 5. Évolution du fluage de base à différents âges de chargement. Les données expérimentales sont indiquées par des marqueurs pleins et les lignes pointillées correspondent aux prédictions du modèle.

Les valeurs de C et τ à chaque âge de chargement sont fournies dans le tableau 4. Le paramètre C reste constant pour une composition de mortier spécifique, quel que soit l'âge au chargement.

TABLEAU 4. Valeurs des paramètres de calage de l'équation 2

| | | | | | |
|---------------------------------------|------------|-------|-------|------|-------|
| 8M - 0.5SB C [GPa] = 32.2 | t' [h] | 15 | 38 | 136 | 696 |
| | τ [h] | 15 | 19.2 | 39.3 | 70.9 |
| 2M - 0.5SB C [GPa] = 30.3 | t' [h] | 24 | 51 | 162 | 696 |
| | τ [h] | 6.9 | 17.6 | 209 | 182.2 |
| 8M - 0.8SB C [GPa] = 25.7 | t' [h] | 24 | 43 | 165 | 696 |
| | τ [h] | 6.5 | 26.2 | 62.7 | 212.4 |
| 2M - 0.8SB C [GPa] = 33.6 | t' [h] | 26.5 | 56.5 | 196 | 696 |
| | τ [h] | 309.9 | 590.6 | 1043 | 960.7 |

Le paramètre C présente une valeur particulièrement faible, comprise entre 25 et 34 GPa. En revanche, le paramètre τ varie selon le type de mélange et l'âge au chargement. On observe que le paramètre temporel augmente avec la diminution de la concentration molaire, et cet effet est particulièrement prononcé pour les rapports S/B élevés. Les systèmes de laitier activé par NaOH présentent une réaction initiale rapide, conduisant à un volume important de produits de réaction. Cet effet est plus prononcé pour les concentrations élevées de NaOH. On pense que cette réaction initiale rapide contribue à la porosité plus élevée qui en résulte, laquelle ne montre aucun développement significatif aux stades ultérieurs de l'hydratation. Ceci pourrait expliquer l'absence de différence significative d'amplitude de fluage observée dans le mélange 8M – 0,5SB après la période de chargement initiale de 15 heures.

IV. CONCLUSIONS

Cette étude fournit des informations précieuses sur le comportement du fluage propre de diverses compositions à base de laitier activé par les alcalis pour plusieurs âges de chargement, à un âge très précoce, inférieur à 24 h, et à des âges plus tardifs, supérieurs à 672 h. Il est démontré que l'utilisation d'une expression logarithmique contenant deux paramètres, à savoir le paramètre d'amplitude C , et le paramètre de cinétique de réaction τ décrivant le matériau, permet de prédire avec précision l'évolution du fluage propre dès le très jeune âge. Bien que la tendance logarithmique du fluage propre des matériaux à base de laitier activé par les alcalis (MAA) concorde avec l'applicabilité du modèle MC 2010 pour ce matériau, il est essentiel de noter que des données expérimentales supplémentaires englobant diverses combinaisons de précurseurs et d'activateurs sont nécessaires pour valider la pertinence du modèle sur du plus long terme.

REFERENCES

- R. Caron, R. Patel, F. Dehn. (2023). Experimental study on basic and drying creep for an alkali-activated slag concrete and comparison with existing creep models, *Structural Concrete* 24, 6405-6420.
- EN 480-1:2023 (2023). Admixtures for concrete, mortar and grout- Test methods - Part 1:Reference concrete and reference mortar for testing, Brussels, Belgium.
- D.P. Bentz, M.A. Peltz, J. Winpigler. (2009). Early-Age Properties of Cement-Based Materials . II: Influence of Water-to-Cement Ratio, *J. Mater. Civ. Eng.* 21, 512–518.
- Z. Hu, A. Hilaire, M. Wyrzykowski, P. Lura, K. Scrivener. (2020). Visco-elastic behavior of blended cement pastes at early ages, *Cem. Concr. Compos.* 107, 103497.
- Z. Li, T. Lu, Y. Chen, B. Wu, G. Ye. (2021). Prediction of the autogenous shrinkage and microcracking of alkali-activated slag and fly ash concrete, *Cem. Concr. Compos.* 117, 103913.
- B. Delsaute, C. Boulay, J. Granja, J. Carette, M. Azenha, C. Dumoulin, G. Karaiskos, A. Deraemaeker, S. Staquet. (2016) Testing Concrete E-modulus at Very Early Ages Through Several Techniques: An Inter-laboratory Comparison, *Strain.* 52, 91–109.
- N.K. Lee, J.G. Jang, H.K. Lee. (2014) Shrinkage characteristics of alkali-activated fly ash/slag paste and mortar at early ages, *Cem. Concr. Compos.* 53, 239–248.
- R. Le Roy, F. Le Maou, J.M. Torrenti. (2017) Long term basic creep behavior of high performance concrete: data and modelling, *Mater. Struct. Constr.* 50, 1–11.