
Étude de l'influence de la chaux sur le comportement des mortiers cimentaires au jeune âge

R. JAAFRI^{1,2}, A. ABOULAYT¹, S.Y. ALAM¹, E. ROZIERE¹, A. LOUKILI¹

¹Ecole Centrale de Nantes, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique (GeM), UMR-CNRS 6183, 1 rue de la Noë, BP 92101, F-44321 Nantes, France.

²Edycem, Rue du Fléchet, 85600 Boufféré, France.

RÉSUMÉ. La formulation de mortiers autonivelants vise un compromis entre la fluidité et la stabilité requise pour éviter les problèmes de ségrégation. L'utilisation d'additions minérales appropriées avec des propriétés de rétention d'eau s'avère nécessaire pour améliorer l'homogénéité. L'objectif de l'approche expérimentale décrite ici est d'étudier l'influence de la chaux naturelle hydraulique (NHL) et de la chaux aérienne (AL) sur les propriétés à l'état frais des mortiers à base de ciment. Un mortier de référence a été formulé avec un rapport E/C de 0,6. A volume de pâte constant, le ciment a été substitué à des proportions massiques croissantes de 12,5%, 25% et 50% par NHL ou par AL. L'approche utilisée montre que la présence de la chaux confère une bonne stabilité aux mélanges, accélère leur prise et hydratation, mais affecte leur comportement rhéologique. Ces résultats permettront l'optimisation des formulations des mortiers en termes d'homogénéité, d'ouvrabilité et de temps de prise.

ABSTRACT. The mix-design of a self-levelling mortar constitutes a compromise between the fluidity and the stability required to avoid phase separation problems. The use of suitable mineral additions with water retention properties is then necessary to improve homogeneity. The objective of the experimental approach undertaken in this paper is to study the influence of natural hydraulic lime (NHL) and aerial lime (AL) on the fresh properties of cement-based mortars. A reference mortar was designed with a water-to-cement ratio of 0.6. At constant paste volume, the cement was substituted with increasing mass proportions of 12.5%, 25% and 50% by NHL or AL. The approach used shows that the presence of lime confers good stability to the mixtures, accelerates their setting and hydration, but negatively affects their rheological behavior. These results will have implications for the optimization of mortars' mix-design in terms of homogeneity, workability and setting time.

MOTS-CLÉS : Chaux naturelle hydraulique, Chaux aérienne, Rhéologie, Hydratation, Nucléation.

KEY WORDS: Natural hydraulic lime, Aerial lime, Rheology, Hydration, Nucleation.

1. Introduction

La formulation des mortiers autonivelants constitue un compromis entre la fluidité et la stabilité requise pour éviter les problèmes de ségrégation. Plusieurs additions minérales permettent actuellement, outre une économie globale, une bonne stabilité des mélanges cimentaires. Nous nous intéressons ici à la chaux, du fait de son grand pouvoir stabilisant et de sa disponibilité locale.

Deux types de chaux existent : aérienne et hydraulique. Les chaux aériennes (AL) durcissent suite à la carbonatation du $\text{Ca}(\text{OH})_2$ par le CO_2 atmosphérique. Il a été montré qu'elles accélèrent l'hydratation du ciment, et qu'elles causent une baisse de rigidité [POZ 15] et une augmentation de la porosité [POZ 15], d'où une chute de la résistance [ARA 07, CIZ 10].

Les chaux naturelles hydrauliques (NHL) durcissent dans l'eau suite à une réaction chimique entre les particules de silicate bicalcique, chaux et eau (ensemble hydraulique) [ÇIZ 09]. Elles présentent de meilleures résistances, de plus faibles perméabilités et déformabilité, et une meilleure résistance à l'humidité, au gel et à l'attaque saline [PAV 07]. Cependant, il existe à ce jour très peu de publications relatives aux mortiers formulés à base de ciment et de NHL.

Cet article présente les résultats d'une étude réalisée afin de comprendre l'influence de la présence d'une chaux naturelle hydraulique (NHL) ou d'une chaux aérienne (AL), en mélange binaire avec le ciment, sur le comportement à l'état frais des mortiers.

2. Procédures expérimentales

L'objectif de cette étude est de déterminer les mécanismes d'action et l'influence de la chaux hydraulique (NHL) et de la chaux éteinte (AL) sur le comportement des mortiers cimentaires à l'état frais. Des essais préliminaires ont permis de formuler un mortier de référence avec un rapport E/C de 0,6. Il est composé de ciment Portland (CEM I 52,5 N), de sable siliceux 0/4 et d'eau. La quantité de ciment dans le mortier de référence est par la suite substituée en masse, mais à volume de pâte constant, par 12,5%, 25% et 50% de chaux (NHL ou AL).

Le comportement rhéologique des mélanges testés a été caractérisé par des essais rhéologiques. Un rhéomètre de type plan/plan est utilisé. Les échantillons ont été soumis à une première vitesse de cisaillement de 0 à 70 s^{-1} en 200 s afin d'atteindre une homogénéité suffisante. Un cycle de taux de cisaillement croissants de 0 à 50 s^{-1} puis revenant à 0 s^{-1} a été par la suite imposé aux échantillons. Les montées et les descentes ont été réalisées en 10 pas. A chaque pas, la contrainte est mesurée et le système enregistre la moyenne des cinq dernières valeurs. L'évolution de la contrainte (τ) en fonction du taux de cisaillement ($\dot{\gamma}$) a pu être décrite par un modèle de Bingham.

La mesure du temps de début et de fin de prise des mélanges testés a été effectuée selon la norme EN196-3 en utilisant le test de Vicat.

Le suivi du dégagement de chaleur pendant l'hydratation se fait à température constante (20°C) à l'aide d'un calorimètre isotherme. Les données ont été extrapolées pour évaluer la cinétique et le degré d'hydratation des mortiers étudiés.

3. Résultats et discussion

3.1. Rhéologie

La Figure 1 représente le seuil de cisaillement en fonction de l'affaissement, obtenus pour chacun des mélanges. Il apparaît que l'incorporation de la chaux a un impact négatif, plus prononcé dans le cas de AL, sur l'ouvrabilité du mortier. Cet effet peut être dû aux faibles compacités et à la finesse des deux types de chaux [ESP 08]. AL étant encore plus fin que NHL, son effet sur la maniabilité est d'autant plus marqué. En effet, NHL et AL représentent une surface spécifique élevée engendrée par le grand volume de fines. Une quantité d'eau plus importante est requise pour couvrir toute la surface et remplir les vides entre les grains, avant de permettre

l'écoulement. Avec des taux de substitution croissants en chaux, la surface spécifique totale augmente, et à quantité d'eau constante, l'affaissement diminue.

Les résultats des mesures rhéologiques (Figure 1 et Figure 2) montrent que NHL affecte peu le seuil de cisaillement et la viscosité plastique, alors que l'incorporation de AL génère une augmentation significative des deux paramètres rhéologiques.

Le seuil de cisaillement est inversement corrélé avec l'affaissement (Figure 1). Un faible affaissement signifie en effet que la contrainte de cisaillement capable de générer l'écoulement est plus élevée. Ceci s'explique par les frottements intergranulaires lors du cisaillement du mortier. En effet, pour une teneur en eau donnée, le frottement intergranulaire augmente lorsque la compacité du mélange diminue.

La viscosité plastique est étroitement liée à la fraction solide relative du mélange, définie comme étant le rapport entre la proportion volumique en solides Φ et la compacité du mélange Φ_m [DEL 02]. La Figure 2 montre la corrélation entre la viscosité plastique et la fraction solide relative Φ/Φ_m . On constate que plus la fraction solide relative est faible, plus la viscosité plastique est faible. En effet, la viscosité plastique est liée à l'écoulement de l'eau dans la porosité du système granulaire [DEL 02]. Pour une fraction solide donnée, plus la compacité est élevée, plus le rapport Φ/Φ_m est bas, l'eau s'écoule alors plus facilement, ce qui conduit à une faible viscosité du mélange.

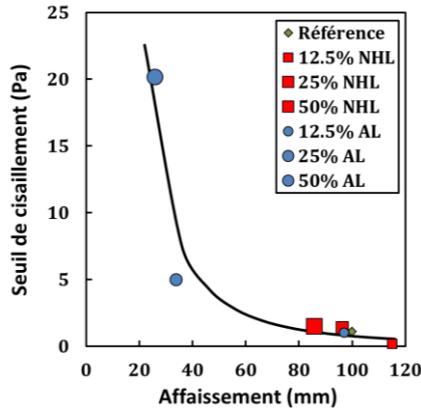


Figure 1. *Seuil de cisaillement en fonction de l'affaissement*

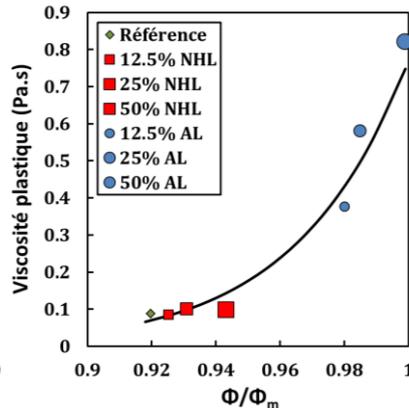


Figure 2. *Viscosité plastique en fonction de la fraction solide relative*

3.2. Hydratation et prise

Le suivi du flux thermique pendant l'hydratation montre l'effet de la chaux sur la cinétique d'hydratation des mélanges. Comme le premier pic exothermique dans les mortiers 100% NHL et 100% AL prend fin en même temps que le premier pic d'hydratation dans le mortier de ciment (Figure 3), on peut conclure qu'à partir de 1h, les réactions de NHL et AL n'ont pas d'influence significative sur les mesures calorimétriques. Par conséquent, le flux thermique a été normalisé par rapport à la quantité de ciment dans l'échantillon. La Figure 3 montre que l'hydratation des mélanges est accélérée en présence de chaux ; en effet, plus la proportion en chaux augmente, plus le pic correspondant à l'hydratation du ciment apparaît tôt, et donc plus la période dormante est courte. Cette accélération de l'hydratation s'est accompagnée d'une prise plus rapide (Figure 4).

L'accélération de la prise et de l'hydratation dans le cas des mélanges à base de ciment et de chaux aérienne, a déjà été mise en évidence dans la littérature [ARA 07]. Cet effet accélérateur de la chaux peut être attribué à une nucléation sur les grains de chaux ou à une augmentation de la probabilité de nucléation homogène dans les pores. Dans le cas de NHL, riche en C_2S [ÇIZ 09], on pourrait avancer que son effet accélérateur est dû à une modification des concentrations ioniques en solution, cependant, en dehors du premier pic thermique observé, aucune réaction de NHL n'est visible pendant les premières heures. Son mécanisme d'accélération est donc similaire à celui de AL.

Notons qu'après le premier pic de dissolution, la concentration de la solution interstitielle dans les pores est censée être la même pour tous les échantillons [FOU 15]. Ainsi, un effet de sursaturation dû à la présence de chaux est à exclure.

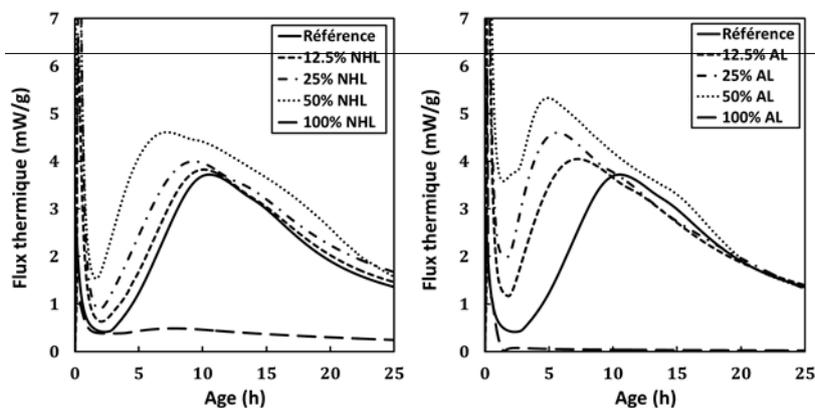


Figure 3. Flux thermique en fonction de l'âge pour les mélanges avec NHL ou AL

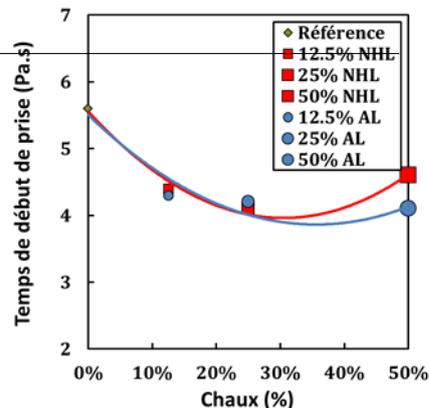


Figure 4. Temps de début de prise en fonction du dosage en chaux

4. Conclusions

Dans cet article, l'effet de la substitution du ciment par la chaux sur le comportement à l'état frais des mortiers à base de ciment a été étudié. Les essais de rhéologie, de prise et de calorimétrie ont permis de mettre en évidence les effets de la substitution du ciment par la chaux aérienne et la chaux hydraulique naturelle:

- La capacité de la chaux à fixer l'eau permet de garantir une meilleure stabilité des mortiers.
- Par sa grande surface spécifique, la chaux a un impact négatif, plus prononcé dans le cas de la chaux aérienne, sur les propriétés rhéologiques du mortier.
- La présence de la chaux engendre une accélération de la prise et de l'hydratation des mortiers. Cet effet accélérateur semble être dû à une nucléation sur les grains de chaux plutôt qu'à une sursaturation de la solution interstitielle.

5. Bibliographie

- [ARA 07] ARANDIGOYEN M., ALVAREZ J.I., "Pore structure and mechanical properties of cement-lime mortars", *Cement and Concrete Research*, 37(5), 2007, pp.767–775.
- [CIZ 09] ÇIZER O., *Competition between carbonation and hydration on the hardening of calcium hydroxide and calcium silicate binders*, 2009.
- [CIZ 10] CIZER O., VAN BALEN K., VAN GEMERT D., "Competition between Hydration and Carbonation in Hydraulic Lime and Lime-Pozzolana Mortars", *Advanced Materials Research*, 133–134, 2010, pp.241–246.
- [ESP 08] ESPING O., "Effect of limestone filler BET(H₂O)-area on the fresh and hardened properties of self-compacting concrete", *Cement and Concrete Research*, 38(7), 2008, pp.938–944.
- [FOU 15] FOURMENTIN M. et al., "Porous structure and mechanical strength of cement-lime pastes during setting", *Cement and Concrete Research*, 77, 2015, pp.1–8.
- [DEL 02] DE LARRARD F., SEDRAN T., "Mixture-proportioning of high-performance concrete", *Cement and Concrete Research*, 32, 2002, pp.1699–1704.
- [PAV 07] PAVIA S., TREACY E., "A comparative study of the durability and behaviour of fat lime and feebly-hydraulic lime mortars", *Materials and Structures*, 39(3), 2007, pp.391–398.
- [POZ 15] POZO-ANTONIO, J.S., "Evolution of mechanical properties and drying shrinkage in lime-based and lime cement-based mortars with pure limestone aggregate", *Construction and Building Materials*, 77, 2015, pp.472–478.