

Study of the mechanical behavior of slag-limestone filler-cement blended binders

Etude du comportement mécanique de liants binaires et ternaires à base de ciment Portland, de laitier de haut fourneau et de filler calcaire

N.E.H. Khalifa¹, M. Bouasker², P. Mounanga³ et N. Ben Kahla¹

¹Laboratoire de Systèmes et de Mécanique Appliquée – LASMAP, La Marsa 2078, Tunisie

²Centre de Recherche sur la Matière Divisée – CRMD, UMR CNRS 6619, Orléans, France

³LUNAM Université, Université de Nantes – IUT Saint-Nazaire, GeM, CNRS UMR 6183, Institut de Recherche en Génie Civil et Mécanique, France

Abstract. The main objective of this study is to detect the influence of the addition of limestone fillers in moderate percentages (0%, 10% and 20%) on the performance of binder formulations containing different dosages of blast furnace slag (ranging from 20% to 80%). The analysis parameters are mercury intrusion porosity and mechanical properties. The tests were performed on 12 blended pastes made with a water/cement ratio equal to 0.32. The mechanical properties of different pastes were investigated at several curing time (1 day, 7 days, 28 days and 90 days). The obtained results allowed estimating the possibility to benefit from the complementarity and synergy of the three components considered in the mechanical performance (compressive strength and dynamic Young's modulus) of ternary binders studied at both early age and mature age.

Résumé. Le principal objectif de cette étude est de déceler l'influence de l'addition de fillers calcaires en pourcentages modérés (0%, 10% et 20%) sur les performances de formulations de liants contenant différents dosages en laitier de haut fourneau (variant de 20% à 80%), en considérant, comme paramètres d'analyse, la porosité accessible au mercure et les propriétés mécaniques. Les essais ont été réalisés sur 12 pâtes de liants composées avec un rapport Eau/Liant égal à 0,32. Les propriétés mécaniques des différentes pâtes ont été étudiées à plusieurs échéances (1 jour, 7 jours, 28 jours et 90 jours). Les résultats obtenus nous ont permis d'estimer la possibilité de bénéficier de la complémentarité et de la synergie des trois composants considérés sur les performances mécaniques (résistance à la compression et module d'Young dynamique) des liants ternaires étudiés au jeune âge et à âge mature.

1 Introduction

Les ajouts minéraux sont souvent des coproduits industriels et leur incorporation dans des matrices cimentaires présente un avantage environnemental non négligeable, particulièrement sur la diminution des émissions de CO₂ dégagé. Cette solution consiste à substituer une partie importante du ciment par des additions minérales issues de coproduits industriels (laitier de haut fourneau – LHF, ou cendres volantes – CV). Ces constituants supplémentaires peuvent contribuer à améliorer les performances du béton à long terme [1] (T. K. Erdem et O. Kirca, 2008). Cependant, l'utilisation massive de ces additions minérales dans les bétons, en remplacement du ciment Portland, entraîne généralement une diminution importante de la cinétique de durcissement et des performances du matériau au jeune âge. Un moyen de contrebalancer ces phénomènes au jeune âge consiste à combiner le mélange «CP + LHF» ou «CP + CV» avec des fillers calcaires. Les matrices cimentaires confectionnées avec des liants ternaires peuvent en effet présenter des performances supérieures à celles des matrices à base de liants binaires, en termes de dégagement de chaleur, de résistance mécanique au jeune âge et de durabilité [2] (G. Menéndez et al., 2003).

Le principal objectif de ce travail de recherche a été de déceler l'influence de l'addition de fillers calcaires en pourcentages modérés (10% et 20%) sur les performances de formulations de liants contenant différents pourcentages de laitier de haut fourneau (variant de 20% à 80%), en prenant comme paramètres d'étude la porosité au mercure et les propriétés mécaniques. Les différents essais ont été réalisés sur 12 pâtes de liants composées avec un rapport Eau/Liant égal à 0,32. Les différentes pâtes ont été étudiées à plusieurs échéances (1 jour, 7 jours, 28 jours et 90 jours).

2 Programme Experimental

2.1 Matériaux et liants composés

Les pâtes étudiées dans ce travail de recherche sont composées de ciment Portland, de laitier de haut fourneau et de filler calcaire, mélangés avec des dosages variables. Dans la suite de l'article, le terme « liant » binaire ou ternaire désigne la combinaison de ces deux ou trois constituants, respectivement.

Le ciment Portland utilisé est un CEM I 52,5 N (Usine du Havre, Lafarge). Les fractions massiques de ses principales phases, fournies par le fabricant, sont : 67,50% de C₃S ; 12,21% de C₂S ; 8,81% de C₃A ; 7,97% de C₄AF et 3,30% de gypse. Il possède une densité absolue égale à 3,20. Le laitier granulé de haut fourneau moulu est fourni par l'entreprise ECOCEM (usine d'Aix en Provence). Sa composition chimique est principalement composée de : 34,49% de SiO₂ ; 41,03% de CaO ; 13,19% de Al₂O₃ et 8,21% de MgO, sa densité est de 2,89. Enfin, le filler calcaire utilisé (BETOCARB P2) a été produit à l'usine d'Erbray. Il contient 97,7% de CaCO₃ et sa densité est de 2,714.

Les pâtes sont préparées dans un malaxeur de capacité 20 L. Les constituants solides sont tout d'abord mélangés durant 30 s. Puis, l'eau de gâchage est introduite et le malaxage est poursuivi pendant 90 s à vitesse lente et 90 s à vitesse rapide. La composition des différentes pâtes de liant est donnée dans le Tableau 1. Le rapport massique eau/liant (E/L) est égal à 0,32 pour l'ensemble des formulations étudiées.

Tableau 1. Composition massique (%) des liants étudiés

Libellés	Ciment	Laitier de haut fourneau	Filler calcaire
PC0L0F	100	0	0
PC30L0F	70	30	0
PC50L0F	50	50	0
PC80L0F	20	80	0
PC0L10F	90	0	10
PC20L10F	70	20	10
PC40L10F	50	40	10
PC70L10F	20	70	10
PC0L20F	80	0	20
PC10L20F	70	10	20
PC30L20F	50	30	20
PC60L20F	20	60	20

2.2 Méthodes expérimentales

2.2.1 Propriétés mécaniques : Résistances mécaniques et module d'élasticité dynamique

Les essais de mesure de la résistance à la compression ainsi que du module d'élasticité dynamique ont été réalisés sur des éprouvettes 4×4×16 cm³. Pour chaque essai, trois éprouvettes sont testées. La méthode dynamique consiste à déterminer la fréquence propre de résonance d'une éprouvette soumise à un choc. Pour cela, on a utilisé un appareil de type Grindosonic®. Un programme par éléments finis permet de déterminer la fréquence obtenue, la célérité des ondes transversales et longitudinales et d'en déduire la valeur du module d'Young dynamique du matériau étudié.

2.2.2 Porosimétrie au mercure

Les essais de porosimétrie ont été menés avec un porosimètre à mercure type Autopore®9500. Ce dispositif permet de déterminer la distribution de taille des pores des solides poreux. Le mercure est utilisé comme fluide non mouillant d'intrusion. L'échantillon de pâte de ciment lyophilisé, d'environ 1cm³ de volume, est placé dans un pénétrömètre. L'ensemble est placé dans le porosimètre et la pression d'intrusion est augmentée de façon incrémentale selon deux phases : une phase de basse pression correspondant à la porosité de grande taille et une phase de haute pression correspondant à la porosité la plus fine. On suppose les pores de forme cylindrique et l'on calcule, grâce à l'équation de Washburn [3] (E. W. Washburn, 1921), le rayon moyen d'accès aux pores. Pour chaque formulation étudiée, un essai de porosité au mercure a été réalisé dans le but d'analyser la distribution porale des différentes pâtes étudiées à 28 jours.

3 Programme Expérimental

3.1 Evolution des propriétés mécaniques : résistance à la compression et module d'Young

Les Figures 1 et 2 présentent les évolutions de la résistance à la compression et du module d'Young dynamique des différentes pâtes en fonction du temps et du dosage massique en laitier de haut fourneau, respectivement.

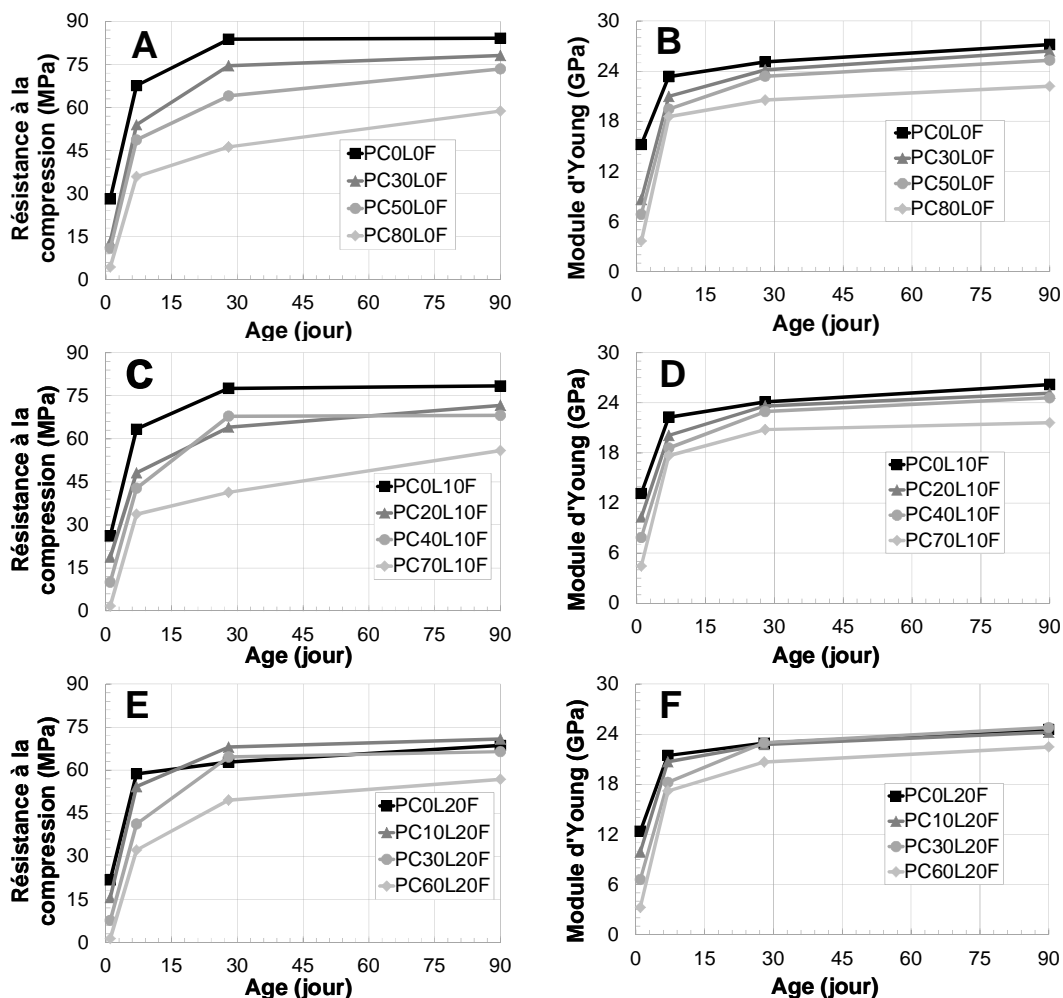


Fig. 1. Evolution de la résistance à la compression et du module d'Young des liants étudiés en fonction du temps. A et B : liants sans filler calcaire ; C et D : liants avec 10% de filler calcaire ; E et F : liants avec 20% de filler calcaire.

L'effet du laitier est directement observable sur les Figures 1.A et 1.B pour 4 taux de substitution du laitier (0%, 30%, 50% et 80%). On observe que l'augmentation du dosage en laitier entraîne une diminution de la résistance à la compression toute au long de la période d'investigation (1 à 90 jours). Sur la figure 1.A, on remarque que la résistance à la compression des pâtes avec un dosage en laitier de 0 et 30% devient quasi constante au-delà de 28 jours de maturation. Pour les deux autres liants, la résistance mécanique continue d'augmenter significativement entre 28 jours et 90 jours. Cette augmentation atteint 30% pour la pâte de ciment à 80% de laitier. Cet effet est expliqué par la participation tardive du laitier dans les réactions d'hydratation. Le laitier réagit en effet plus lentement que le ciment et nécessite un seuil minimal de Portlandite pour réagir [4] (B. Lothenbach et al., 2008). Concernant le module d'Young, on remarque que l'ajout du laitier réduit sensiblement le module d'Young au jeune âge (7 premiers jours). Au-delà de 7 jours, les courbes de module d'Young des différentes pâtes de ciment convergent à l'exception de la pâte à 80% de laitier.

La Figure 2 met en évidence l'effet du filler calcaire sur l'évolution de la résistance à la compression et du module d'Young des liants. Pour les liants sans laitier, l'introduction de filler, « addition » peu réactive, entraîne une diminution de la résistance à la compression. Comme pour le laitier, ce résultat est en accord avec de précédentes études [5] (Carrasco et al., 2005), [6] (P.Mounanga et al., 2011). Plus le dosage en filler est élevé, plus la résistance à la compression diminue. L'intensité de cet effet n'est pas constante au cours du temps. Elle est plus importante à 1, 28 et 90 jours qu'à 7 jours. On observe qu'à 28 et 90 jours, la relation entre la résistance à la compression et le dosage en laitier pour le liant à 20% de laitier est de type parabolique. La résistance à la compression atteint son maximum à 10% de laitier. Ceci montre qu'à long terme (au-delà de 28 jours), la résistance à la compression de la pâte à 20% de filler et 10% de laitier devient plus élevée que celle de référence (0% laitier et 0% de filler). Quant à l'évolution du module d'Young dynamique, elle est similaire à celle de la résistance à la compression.

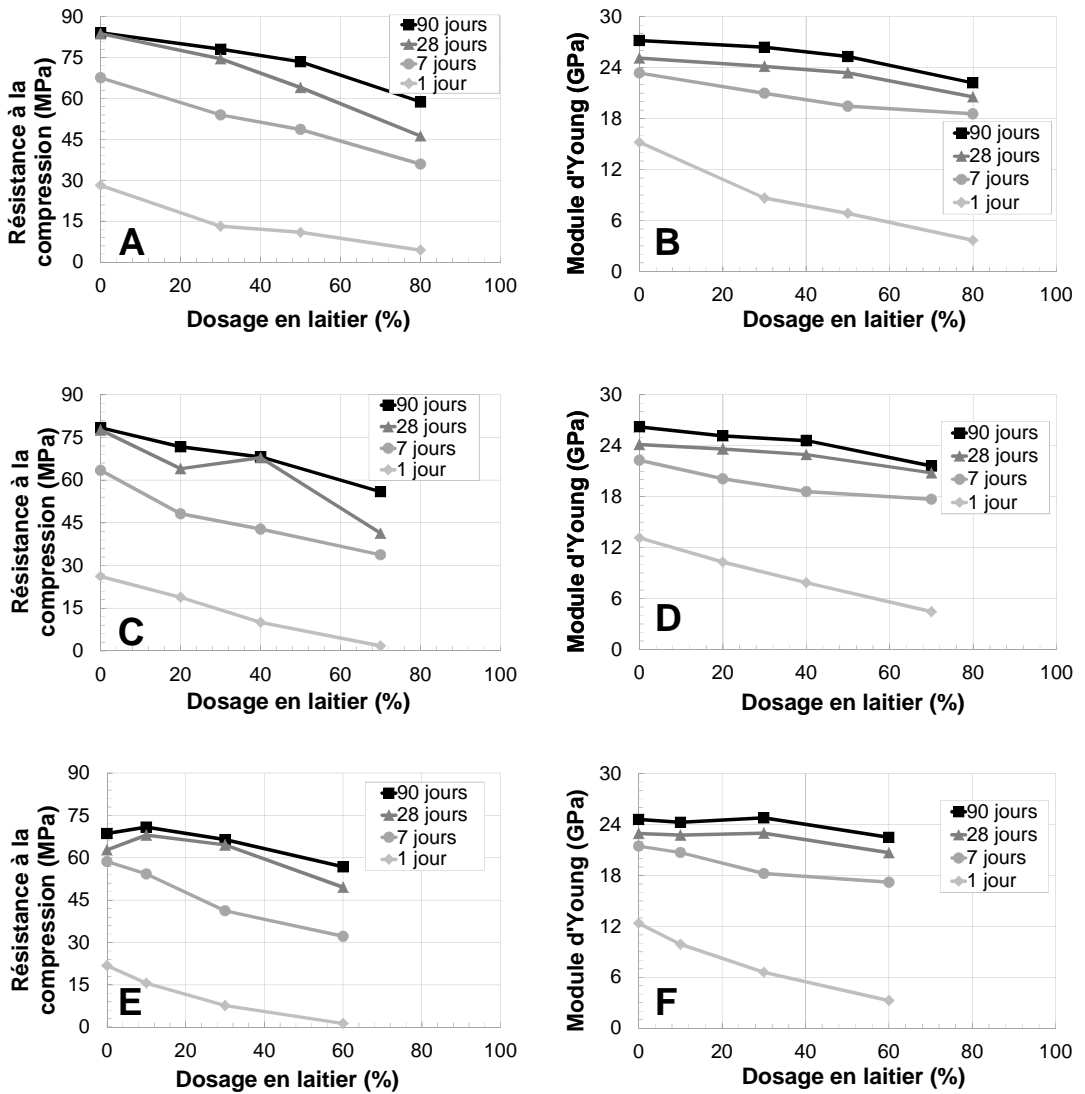


Fig. 2. Résistance à la compression et module d'Young des liants étudiés. A et B : liants sans filler calcaire ; C et D : liants avec 10% de filler calcaire ; E et F : liants avec 20% de filler calcaire.

3.2 Effet des ajouts sur la porosité de la pâte

Pour chaque formulation étudiée, un essai de porosimétrie au mercure a été réalisé à 28 jours de maturation dans le but d'analyser l'effet des ajouts sur la distribution porale et la porosité totale des liants étudiés. La Figure 3 présente les différents résultats obtenus, en fonction du dosage en filler calcaire et en laitier de haut fourneau.

Les Figures 3.A, 3.B et 3.C, présentent le volume incrémental en fonction du diamètre du pore. On remarque que les pâtes à fort dosage en laitier (PC80L0F, PC70L10F, PC60L20F) présentent une distribution bimodale qui s'étale entre 0,003 et 0,050 μm , 0,005 et 0,050 μm , et 0,003 et 0,100 μm , respectivement, alors que toutes les autres pâtes présentent une distribution monomodale centrée sur un diamètre d'accès de pore variant entre 0,005 et 0,050 μm . L'amplitude du volume incrémental est toujours la plus réduite pour les trois formulations PC30L0F, PC20L10F, PC10L20F pour les trois familles de pâtes, ce qui explique leurs résistances à la compression plus élevées. Sur la figure 3.D, on remarque une évolution de porosité similaire des pâtes à 0% et 10% de filler quel que soit le dosage en laitier. La porosité reste quasiment inchangée jusqu'à un dosage de 30% en laitier. Entre 30 et 50% de laitier, la porosité diminue de plus de 15%. Au-delà de 50% de laitier, la porosité augmente de nouveau. Pour les liants à 20% de filler calcaire, on observe une évolution de la porosité différente des liants à 0% et 10% de filler. En effet, à 20% de filler, l'ajout de laitier diminue la porosité jusqu'à un dosage de 30% au-delà duquel, elle augmente de nouveau pour atteindre 32% à 60% de laitier.

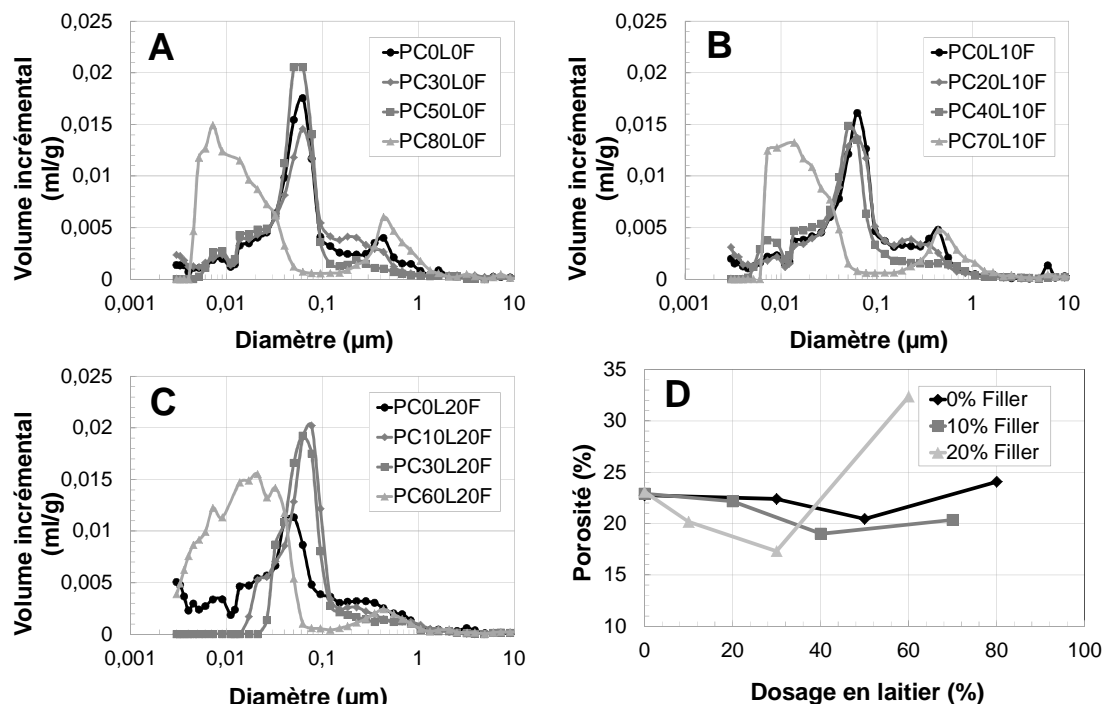


Fig. 2. Effets des ajouts sur la distribution porale. A : liants à 0% de filler calcaire ; B : liants à 10% de filler calcaire ; C : liants à 20% de filler calcaire ; D : porosité totale des pâtes de liants.

4 Conclusions

L'analyse des résultats de cette étude menée sur le comportement au jeune âge et à âge mature de liants binaires et ternaires, a mis en évidence les principaux points suivants :

- La substitution du ciment par du laitier de haut fourneau ou du filler calcaire engendre une diminution de la résistance mécanique et du module d'Young. L'effet combiné de ces « additions » sur l'évolution de la résistance mécanique dépend du dosage en filler calcaire. A 20% de filler calcaire, on remarque que l'addition jusqu'à 30% de laitier ne diminue pas la résistance mécanique et le module de rigidité, bien au contraire, on remarque qu'à 10% de dosage en laitier, la résistance à la compression à 28 jours et 90 jours est supérieure à celle de la pâte de référence (0% de laitier et 0% de filler calcaire).
- Les résultats de la porosité totale, montrent que les pâtes à 20% de filler calcaire avec des dosages en laitier allant jusqu'à 30% ont une porosité nettement inférieure à celle de la pâte de référence. La porosité totale atteint son minimum (-26% par rapport à la porosité de la pâte de référence) à 30% de dosage en laitier. Ces résultats de porosité sont en accord total avec les résultats de résistance mécanique.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier Dr. Mohamed KISMI pour l'aide apportée lors de la réalisation des essais de résistance mécanique.

Références

1. T.K. Erdem et O.A. Kirca, Use of binary and ternary blends in high strength concrete, *Construction and Building Materials*, p. 1477-1483, **22**, 7 (2008)
2. G. Menéndez, V. Bonavetti, et E. F. Irassar, Strength development of ternary blended cement with limestone filler and blast-furnace slag, *Cement and Concrete Research*, p. 61-67, **25**, 1 (2003)
3. E. W. Washburn, The dynamics of capillary flows, *Physical Review*, p. 273-283 (1921)
4. B. Lothenbach, G. Le Saout, E. Gallucci et K. Scrivener, Influence of limestone on the hydration of Portland cements, *Cement and Concrete Research*, p. 848-860, **38**, 6 (2008)
5. M.F. Carrasco, G. Menéndez, V. Bonavetti et E.F. Irassar, Strength optimization of "tailor-made cement" with limestone filler and blast furnace slag, *Cement and Concrete Research*, p. 1324-1331, **35**, 7 (2005)
6. P. Mounanga, M.I.A. Khokhar, R. El Hachem et A. Loukili, Improvement of the early-age reactivity of fly ash and blast furnace slag cementitious systems using limestone filler, *Materials and Structures*, p. 437-453, **44**, 2 (2011)