

Influence de la substitution du ciment Portland par du laitier de haut fourneau sur des éprouvettes de mortier portées à hautes températures

Delhomme F.*, Ambroise J., Limam A.

LGCIE, INSA Lyon, Villeurbanne, France

Résumé

Lors d'un incendie le béton est soumis à des températures extrêmes pouvant engendrer une instabilité de la structure. Cette étude se propose d'étudier le comportement d'éprouvettes de mortier composées de ciment Portland et de laitier de hauts fourneaux chauffées jusqu'à 900 °C. Le matériau est caractérisé par des essais mécaniques de résistances en compression et traction. Les paramètres étudiés sont le taux de substitution du ciment Portland par du laitier, l'âge des éprouvettes et le mode de conservation, soit en sac étanche, soit immergé dans l'eau. Les résultats indiquent qu'un pourcentage de substitution supérieur à 50 % permet d'atteindre des résistances résiduelles en compressions après chauffage à 300 °C supérieures de 13 à 33 % par rapport à la résistance initiale et à 600°C des résistances équivalentes à celles obtenues à température ambiante. A 900°C, la forte détérioration de la microstructure entraîne des résistances inférieures à 20 % de la résistance initiale pour les compositions avec ou sans laitier. L'âge des éprouvettes et le mode de conservation ne semble pas avoir d'incidence sur les gains de résistance observés pour les compositions contenant du laitier.

Mot Clé : béton, laitier, hautes températures, incendie

1. INTRODUCTION

Lorsque le béton est soumis à des températures élevées comme lors d'un incendie, plusieurs transformations chimiques et physiques ont lieu engendrant une dégradation de ses propriétés mécaniques [1, 2]. Les principaux mécanismes sont, une augmentation de la pression de vapeur d'eau dans les pores [3], un comportement non identique de la pâte de ciment et des granulats dû à des coefficients thermiques d'expansion différents [4] et une transformation des hydrates de la pâte de ciment [5].

La pâte de ciment subit différentes transformations avec l'élévation de la température [6]. L'ettringite se déshydrate complètement entre 130 et 170°C. Les gels de CSH commencent à subir une première transformation à partir de 80 °C. Une partie de la décomposition des CSH contribue à une augmentation de la calcite (CaCO_3) et de la larnite (C_2S). La décomposition de la portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) intervient entre 450 et 550 °C en se transformant en de la chaux vive (CaO) et de l'eau. Après refroidissement, la réhydratation de la chaux entraîne une augmentation de volume d'environ 40 % pouvant entraîner un éclatement du béton [7]. Pour les granulats siliceux, à 573°C, le quartz α se transforme en quartz β , transformation s'accompagnant d'un gonflement des granulats [8]. A partir de 700°C, le carbonate de calcium présent notamment dans les granulats calcaires se décompose en chaux vive en libérant du CO_2 .

Dans ces recherches, nous nous intéresserons à la phase liante afin d'étudier l'impact des transformations de la microstructure sur l'évolution des propriétés mécaniques. Nous regarderons plus particulièrement l'influence de la composition minéralogique du liant en testant 2 ciments : un ciment Portland et un mélange ciment Portland + laitier de haut fourneau.

* Auteur correspondant: fabien.delhomme@insa-lyon.fr

Le laitier est un sous produit de l'industrie métallurgique ayant des propriétés pouzzolaniques et hydrauliques latentes [9]. Le laitier étant activé par la chaux, l'intérêt est donc de diminuer la quantité de chaux présente dans le liant hydraté. Ces travaux complètent plusieurs études [10-15] montrant le rôle bénéfique du laitier à hautes températures. L'incidence de la température sur les propriétés mécaniques est étudiée pour différents pourcentages de substitution, modes de conservation et âges des éprouvettes.

2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Trois formulations à base de ciment Portland CEM 52.5 R, avec des proportions différentes de laitier (0, 50 80 %), ont été étudiées (tableau 1). Les analyses chimiques du laitier et du ciment Portland sont données dans le tableau 2. Le sable utilisé pour la fabrication des mortiers est un sable siliceux afin d'éliminer le phénomène de décarbonatation des sables contenant du calcaire.

Tableau 1 : formulations des mortiers testés

	M0	M50	M80
% de laitier	0	50	80
CEM I 52,5 (g)	350	175	70
Laitier (g)	0	175	280
Eau (g)	225	225	225
Sable (g)	1350	1350	1350

Tableau 2 : compositions chimiques et propriétés du ciment et du laitier utilisés

Constituant (%)/Propriété	Laitier	CEM 52.5R
SiO ₂	35.9	
Al ₂ O ₃	11.2	4.22
Fe ₂ O ₃	0.3	
CaO	42.3	
MgO	8.0	1.9
MnO	0.4	
TiO ₂	0.7	
SO ₃	0.2	2.7
CL	0.01	0.04
S ₂ ⁻	1	0
Na ₂ O équ.	0.7	
Finesse Blaine (cm ² .g ⁻¹)	4500	3700
Masse volumique (g.cm ⁻³).	2.91	3.15

Les essais de résistances mécaniques sur mortier sont effectués sur des éprouvettes prismatiques 4x4x16 cm³. Les éprouvettes sont démoulées 24 h après coulage. Deux modes de conservation sont utilisés, soit en sac étanche (aucun échange avec le milieu ambiant) soit dans l'eau à 20 °C. Les échantillons sont testés à un âge de 28 jours pour les deux modes de conservation et à 90 jours uniquement pour les échantillons conservés en sac étanche. Avant de chauffer les échantillons, ceux-ci sont séchés dans une étuve pendant 1 semaine à 40 °C jusqu'à que leurs masses restent constantes afin d'éliminer l'eau libre.

Les éprouvettes sont ensuite portées à différentes températures durant un temps permettant d'atteindre une température uniforme dans l'échantillon :

- 150 °C durant 24 h
- 300 °C durant 8h
- 600 °C durant 6 h
- 900 ° C durant 4h

La vitesse de montée en température, volontairement lente afin d'éviter tout choc thermique, est de 3°C.min⁻¹. Après le palier de température, les éprouvettes sont refroidies naturellement à une vitesse d'environ 1°C.min⁻¹.

Des essais de traction par flexion et de compression résiduelles sont effectués après refroidissement à 20 °C. L'évolution de la masse des éprouvettes est suivie par pesée avant et après chauffage.

3. RESULTATS ET DISCUSSION

3.1 Influence du taux de laitier et de l'âge – Conservation en sac étanche

L'étude visuelle des éprouvettes à 28 jours ou 90 jours à la sortie du four montre une très légère fissuration pour les trois formulations à 900 °C. Par contre, jusqu'à une température de 600°C, aucune fissuration n'est perceptible à l'œil nu.

Pour les éprouvettes testées à 28 jours, la perte de masse due au séchage pour les trois formulations est comprise entre 3.2 % et 3.9%. La figure 1 donne les pertes de masse, après séchage, en fonction de la température de chauffe et de l'âge des éprouvettes. Jusqu'à 150°C, la perte de masse est essentiellement due à l'évaporation de l'eau libre, entre 150°C et 300°C à la déshydratation de CSH, entre 300 et 600 °C essentiellement à la décomposition de la portlandite et entre 600 et 900°C à la décomposition des CSH et autres hydrates.

A 28 jours, l'ensemble des formulations présentes des pertes de masse totale équivalente, par contre les compositions avec du laitier (M50 et M80) ont des pertes de masse plus faibles entre 300 et 600° pouvant s'expliquant par une quantité de portlandite plus faible par rapport à la composition sans laitier (M0).

A 90 jours, les pertes de masse totale sont logiquement plus faibles qu'à 28 jours. La même tendance qu'à 28 jours est retrouvée concernant les pertes de masse entre 300 et 600 °C. Les pertes de masse sur les compositions avec du laitier (M50 et M80) jusqu'à 300 °C est d'environ 4,5 % contre seulement 3,1 % pour M0.

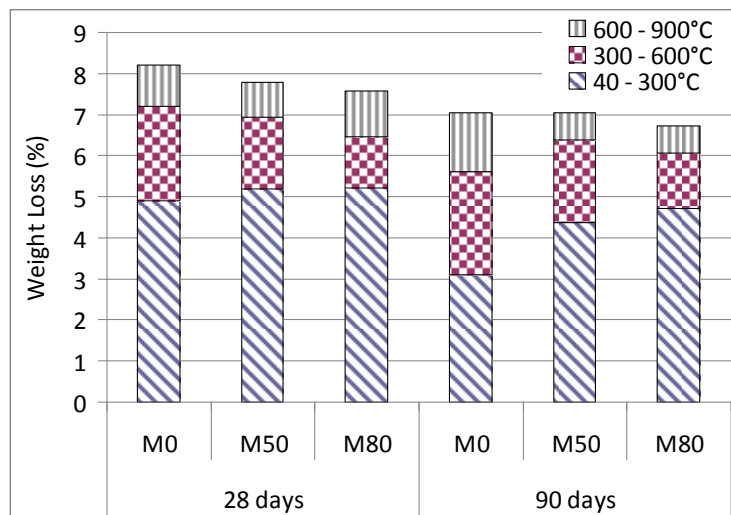


Figure 1 : perte de masse à 28 jours et 90 jours après différentes températures de chauffe

Les résistances en compression en fonction de l'âge des éprouvettes et des températures de chauffe sont données dans le tableau 3. La figure 2 permet de comparer l'évolution de la résistance en compression par rapport à la résistance initiale à 20 °C. A 28 jours, pour une température de 900°C, les résistances sont faibles avec entre 2,9 et 6,5 % de la résistance initiale. Cependant, les formulations M50 et M80 garde des résistances supérieures. La résistance de la formulation avec uniquement du ciment Portland (M0) se maintien jusqu'à 300°C (98 % de la résistance initiale) puis chute avec à 600°C une valeur de 52,1 %. La substitution d'une partie du ciment Portland par du laitier entraine une augmentation de la résistance à 300°C avec 112,8 % pour M50 et 133,1 % pour M80 de la résistance initiale. Cette augmentation permet de maintenir des résistances à 600 °C proches des résistances à 20°C malgré une baisse des résistances à partir de 300 °C. Ces résultats confirment les études de Swamy [16] et Wang [10] selon lesquelles le chauffage entraine des mouvements d'eau qui entraine une hydratation des grains de ciment et de laitier non hydratés.

A 90 jours, les mêmes tendances sont observées sur les compositions avec et sans laitier indiquant que les gains de résistances à 300°C pour les compositions M50 et M80 sont peu influencés par l'âge des éprouvettes.

Tableau 3 : résistances en compression (MPa) à 28 jours et 90 jours

Age (jours)	Composition	Température (°C)			
		40°	300°	600°	900°
28	M0	58.7	57.3	30.6	2.9
	M50	49.6	56.0	35.1	6.5
	M80	40.3	53.6	35.1	5.5
90	M0	55.7	54.5	29.9	3.3
	M50	53.3	60.2	37.7	6.8
	M80	39.9	48.6	37.4	6.1

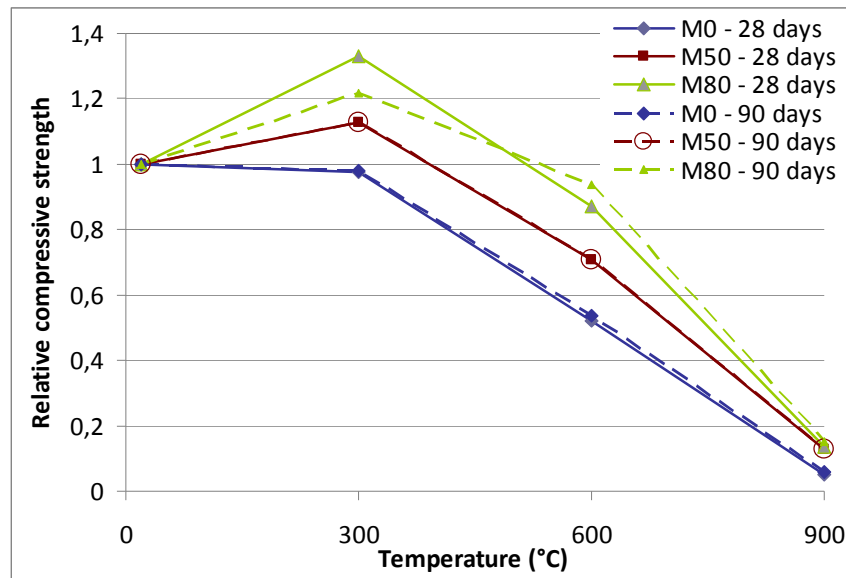


Figure 2 : rapport des résistances en compression par rapport à la résistance à 40 °C à 28 et 90 jours

Le tableau 4 fournit les résistances résiduelles en traction par flexion pour différentes températures de chauffe et âges des éprouvettes. A 28 et 90 jours, les trois formulations suivent la même tendance avec un maintien ou une légère diminution des résistances jusqu'à 300°C puis une diminution jusqu'à 900°C pour atteindre des résistances inférieures à 0,5 MPa. L'influence de l'ajout du laitier n'est pas significative pour la résistance en traction contrairement aux effets sur la résistance en compression.

Tableau 4 : résistances (MPa) en traction par flexion à 28 jours et 90 jours

Age (jours)	Composition	Température (°C)			
		20°	300°	600°	900°
28	M0	6.8	7.7	2.2	0.4
	M50	7.1	6.5	2.4	0.5
	M80	4.5	5.4	1.6	0.3
90	M0	9.2	7.6	2.4	0.4
	M50	9.2	7.0	2.4	0.5
	M80	5.1	5.9	2.3	0.4

3.2 Influence du mode de conservation à 28 jours

La figure 3 donne les pertes de masse en fonction de la température de chauffe et du mode de conservation des éprouvettes soit en sac étanche soit dans l'eau. Les pertes de masse totale restent équivalentes quelque soit le mode de conservation avec entre 7,3 et 8,2 % suivant la composition.

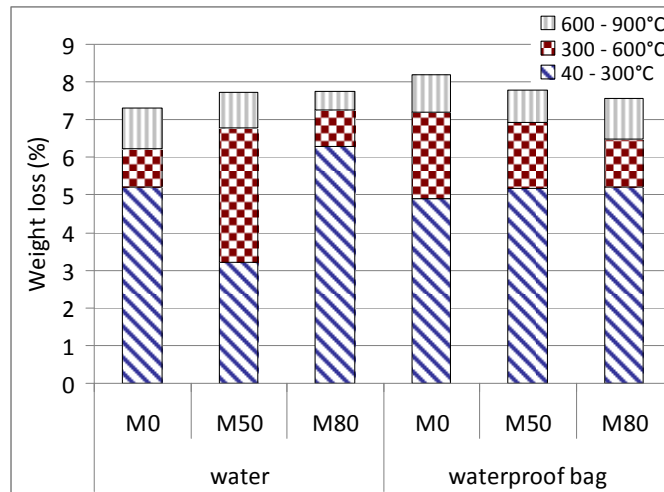


Figure 3 : perte de masse à 28 jours suivant le mode de conservation après différentes températures de chauffe

Les résistances en compression résiduelles à 28 jours en fonction des modes de conservation et des températures de chauffe sont données dans le tableau 5. La figure 4 permet de comparer l'évolution de la résistance en compression par rapport à la résistance initiale à 20 °C. Le mode de conservation n'a pas d'influence significative sur les l'évolution des résistances en fonction de la température de chauffe. En effet, que ce soit pour la conservation en sac étanche ou dans l'eau, les résistances augmentent jusqu'à 300°C pour les compositions avec du laitier (M50 et M80) puis diminuent dans les mêmes proportions par rapport à la résistance initiale.

Tableau 5 : résistances (MPa) en compression à 28 jours suivant le mode de conservation et la température de chauffe

Mode de conservation	Composition	Température (°C)			
		20°	300°	600°	900°
Sac étanche	M0	58.7	57.3	30.6	2.9
	M50	49.6	56.0	35.1	6.5
	M80	40.3	53.6	35.1	5.5
Eau	M0	58.3	56.9	35.4	3.8
	M50	55.9	62.4	40.4	8.6
	M80	41.7	54.0	39.1	5.5

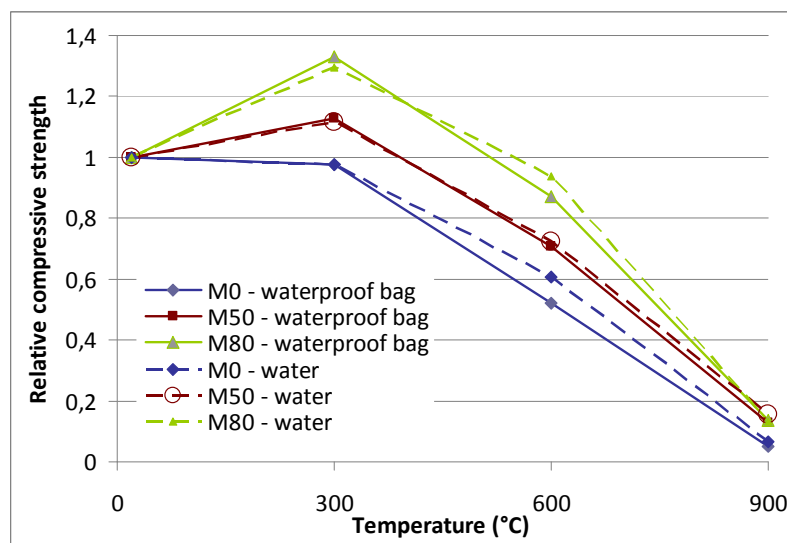


Figure 4 : rapport des résistances en compression par rapport à la résistance à 40 °C suivant le mode de conservation

4. CONCLUSIONS

La substitution du ciment Portland avec du laitier de haut fourneau dans des éprouvettes de mortier a pour effet d'améliorer les résistances mécaniques à hautes températures. Un pourcentage de laitier supérieur à 50 % permet d'obtenir des résistances résiduelles en compressions à 600°C équivalentes à celles obtenues à température ambiante. Cependant, une substitution supérieure à 80% engendre une montée en résistance relativement lente avec une baisse des résistances initiales à 28 jours. A 900°C, les résistances sont inférieures à 20 % de la résistance initiale quelque soit la composition due à des fortes modifications de la microstructure. L'âge des éprouvettes et le mode de conservation n'ont pas d'influence significative sur l'évolution des résistances mécaniques avec, dans tous les cas, une amélioration de celles-ci pour les compositions contenant du laitier.

La présence du laitier permet également de limiter le phénomène de réhydratation de la chaux, après refroidissement, dû à la décomposition de la portlandite entre 450 et 550 °C. Le laitier en réagissant avec la chaux entraîne une diminution de la quantité de portlandite recristallisée. Cette réaction s'entraînant d'une augmentation de volume, les risques d'éclatement du béton sont ainsi limités. Une étude est actuellement en cours sur ce phénomène. Le développement de béton contenant du laitier de haut fourneau en substitution au ciment Portland semble donc être une voie de développement permettant d'améliorer la durée de vie des structures soumis à un incendie ou à de hautes températures durant leur cycle de vie.

5. REFERENCES

- [1] Mendes A., Sanjayan J., Collins F. Phase transformations and mechanical strength of OPC/Salg pastes submitted to high temperature. *Material and Structures*, 41 : 345-350, 2007.
- [2] Khoury G.A. Compressive strength of concrete at high temperature: a reassessment. *Magazine of Concrete Research*. 44(161) : 291-309, 1992.
- [3] Noumowe A., Siddique R., Debicki G. Permeability of high-performance concrete subjected to elevated temperature (600 °C). *Construction and Building Materials*, 23(5): 1855-1861, 2009.
- [4] Metha P.K., Monterio P.J.M. *Concrete Microstructure. Properties and Materials*. Indian Concrete Institute, Chennai, 1997.
- [5] Alonso C., Fernandez L. Dehydration and rehydration processes of cement paste exposed to high temperature environments. 39:3015-3024, 2004.
- [6] Mindeguia J.C. Contribution expérimentale à la compression des risques d'instabilité thermique des bétons. Thesis of University of Pau and Des pays de l'Adour. 31-35, 2009.
- [7] Lin W.M. Lin T.D, Powers L.J. Powers, microstructures of fire-damaged concrete, *ACI Material Journal*. 93(3) : 199-205, 1996.
- [8] Bazant Z.P., Kaplan M.F. *Concrete at High Temperatures: Material Properties and Mathematical Models*, Pearson Education. 1996.
- [9] Michel M. Accélération au laitier par du ciment sulfoalumineux. Thesis of University of Lyon, 57-70, 2009.
- [10] Wang H.Y. The effects of elevated temperature on cement paste containing GGBFS. *Cement and Concrete Composites*. 30:992-999, 2008.
- [11] Aydin S. Development of a high-temperature-resistant mortar by using slag and pumice. *Fire safety journal*. 43:610-617, 2008.
- [12] Mendes A., Sanjayan J., Collins F. Long-term progressive deterioration following fire exposure of OPC versus slag blended cement pastes. *Material and Structures*, 42 : 95-101, 2009.
- [13] Sarshar R., Khoury G.A. Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures. *Magazine of concrete research*, 45(162): 51-61, 1993.
- [14] Poon C.S, Azhar S., Anson M., Wong Y.L. Comparison of the strength and durability performance of normal and high-strength pozzolanic concretes at elevated temperatures. *Cement and concrete research*. 31(9) : 1291-1300, 2001.
- [15] Sullivan P.J.E., Sarshar R. Performance of concrete at elevated temperatures. *Fire technology*, 28(3): 240-250, 1992.
- [16] Swamy R.N. Design for durability and strength through the use of fly ash in concrete. *ACI special publication*, 171:1-72, (1997).