

RÉSISTANCE ET DURABILITÉ DES BÉTONS AU LAITIER DE HAUT FOURNEAU POUR LES OUVRAGES HYDRAULIQUES.

STRENGTH AND DURABILITY OF BLAST FURNACE SLAG CONCRETE FOR HYDRAULIC STRUCTURES.

Ahmed HADJ SADOK, GEE, ENSH, Blida, hadjsadok.ahmed@yahoo.fr

Saïd KENAI, Dépt. Génie civil, Univ. Saad Dahleb, sdkenai@yahoo.com

Mohamed HASSANE, ENSH, Blida, hassanemed@yahoo.fr

Djamel TOUIL, Dépt chimie indust. Univ. Saad Dahleb, touil2002@hotmail.com

RÉSUMÉ : Le présent travail présente les résultats d'une étude expérimentale sur l'effet de l'addition du laitier granulé de haut fourneau au ciment sur les résistances mécaniques des mortiers et sur la perméabilité à l'eau et l'absorption d'eau par capillarité des bétons. Les mortiers à base de ciment au laitier présentent une résistance à la compression relativement faible à jeune âge mais reste relativement comparable, aux âges avancés, à celles du mortier sans ajout. Par ailleurs, la présence du laitier, notamment à un taux de 50% dans le béton conduit à une diminution de l'absorption d'eau par capillarité. Aussi, une amélioration de la perméabilité à l'eau des bétons contenant 50% de laitier a été observée par rapport à celle du béton sans ajout, pour un faible rapport Eau/liant (E/L).

Mots clés : Résistance, absorption d'eau, environnement, perméabilité, durabilité.

ABSTRACT: This work presents the results of an experimental study on the effect of addition of granulated blast furnace slag to cement on mechanical strength of mortars and water permeability and water absorption of concretes. Slag-based mortars have a low compressive strength at early age but are relatively comparable at the advanced ages to those of mortar without addition. Moreover, the presence of slag, in particular at a rate of 50% in concrete, leads to a reduction in water absorption by capillarity. Also, an improvement in the water permeability of the concretes containing 50% slag was observed compared to that of the concrete without addition, for a low ratio Water / binder (W/L).

Key words: Strength, water absorption, environment, permeability, durability.

INTRODUCTION

Le béton des ouvrages hydrauliques est en contact permanent avec l'eau. Cette eau est présente, soit en grande quantité et s'introduit sous pression dans le béton, ou en faible quantité et pénètre dans le béton par remontée capillaire. Dans les deux cas, sachant que tous les mécanismes de détérioration du béton requièrent la présence d'eau et/ou autres espèces nocives (oxygène, ions de chlore, ions de sulfate, acides, etc.), la présence d'eau dans le réseau capillaire conduit à une mauvaise durabilité du béton durci. En effet, les dommages de gel ne se produisent dans le béton que s'il atteint un niveau critique de saturation, la corrosion et la réaction d'alcalis silice exigent eux aussi de l'eau et de l'oxygène,...

En industrie métallurgique, dans le procédé de réduction et de fusion du minerai de fer dans les hauts fourneaux, la fonte rassemble tous les éléments qui sont réduits au cours de l'opération (fer, manganèse, silicium,...). Les oxydes non réduits, se retrouvent dans un produit complexe ; le laitier. Le laitier granulé, obtenu par refroidissement brusque du laitier liquide, compte parmi les ajouts cimentiers les plus utilisés dans le monde. Il présente un intérêt écologique et économique considérable. Lorsqu'il est mélangé au ciment, le laitier granulé réagit avec l'hydroxyde de calcium ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) issu de l'hydratation du ciment pour former dans la matrice cimentaire du gel de silicate de calcium hydraté (CSH) additionnel. La matrice cimentaire résultante présente une bonne résistance chimique et une structure de pore plus raffinée et plus imperméable [Malami et Kaloidas, 1994, Hadj Sadok et al, 2010]. Aussi, avec son activité hydraulique latente, le laitier granulé diminue la chaleur d'hydratation, réduisant ainsi les fissures d'origine thermique rencontrées souvent dans les bétons dite de masse, particulièrement, dans les barrages en béton. En Algérie, le laitier granulé, produit à environ 700 mille tonne par an par le complexe sidérurgique d'El Hadjar, est utilisé principalement par les cimenteries locales pour la fabrication du ciment. Toutefois, son impact sur la durabilité du béton reste jusqu'à présent peu connu [Hadj Sadok et al, 2008].

ETUDE EXPERIMENTALE

Matériaux utilisés

Le laitier de haut fourneau utilisé est un laitier granulé issu du complexe sidérurgique d'El Hadjar. D'une granulométrie 0/5 mm, sa structure est vitreuse à plus de 95%. Le laitier a été broyé au laboratoire à une finesse de $4150 \text{ cm}^2/\text{g}$ à l'aide d'un broyeur à boulets d'une capacité de 5 kg. Le ciment utilisé pour la confection du mortier et du béton est un ciment Portland de

type CEM I fabriqué par la cimenterie locale de Meftah. Les compositions chimiques du ciment et du laitier utilisés sont données dans le tableau 1. Le sable utilisé pour la confection des mortiers est un sable normalisé de granulométrie 0/2 mm. Le sable utilisé pour la confection des bétons est un sable alluvionnaire siliceux de granulométrie 0/5 mm, rectifié par un sable fin 0/2 mm. Le mélange obtenu est un sable de module de finesse de 2,75 et d'une densité de 2,58. Les granulats grossiers utilisés sont des granulats calcaires de concassage de granulométries 8/15 (G1) et de 0/25 mm (G2).

Tableau 1. Composition chimique du ciment et du laitier utilisés

	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	Perte au feu	SO ₃
Ciment	65,7	5,20	2,70	21,7	0,70	0,44	0,70	0,3	0,6
Laitier	42,84	9,19	3,44	41,20	2,12	-	-	0,2	-

Mélanges réalisés

Le mortier réalisé est un mortier normal composé de 3 sables et 1 ciment. Trois mortier M0, M30 et M50 ont été fabriqués en substituant, respectivement, 0, 30 et 50% du ciment par du laitier. Pour les bétons réalisés, le dosage en liant (ciment + laitier) est de 365 kg/m³. Les liants utilisés sont obtenus par remplacement massique partiel du ciment par différents taux de laitier granulé et broyé (0, 15, 30 et 50%). Dans cette étude, deux rapports Eau/liant (E/L) du béton sont étudiés (0,65 et 0,42). Les différentes compositions des bétons étudiés sont présentées dans le tableau 2.

Préparation des éprouvettes et essais

Les échantillons de mortier et de béton sont coulés dans des moules en acier et compactés en deux couches à l'aide d'une table vibrante. Après 24 heures du coulage, les éprouvettes sont démoulées et conservées dans un bac d'eau saturée en chaux à une température de 20°C ± 2 jusqu'à l'âge de l'essai.

La résistance à la compression des mortiers au laitier est déterminée sur des éprouvettes prismatiques de dimension 4x4x16 cm et l'essai est réalisé selon la norme EN 196-1 [EN 196-1, 1995], sur 3 éprouvettes après 2, 7, 28, 90 et 360 jours de cure humide. L'absorption d'eau par capillarité du béton est déterminée sur des éprouvettes cubiques de 70 mm. Ces

derniers ont été séchés à l'étuve à 60°C pendant 7 jours, ensuite à 105°C jusqu'à masse constante. Après séchage, les échantillons sont couverts de résine époxydique dans les quatre faces latérales pour permettre une absorption d'eau uniaxiale. Le schéma d'essai est présenté dans la figure 1. La masse des éprouvettes est mesurée après 1, 4, 9, 16, 36, 49, 64 et 81 minutes d'absorption. Le coefficient d'absorption (S) est obtenu alors par l'équation (1).

$$\frac{Q}{A} = S \times \sqrt{t} \quad (1)$$

Avec :

Q : quantité d'eau absorbée ;

A : section de l'éprouvette en contact d'eau ;

t : temps

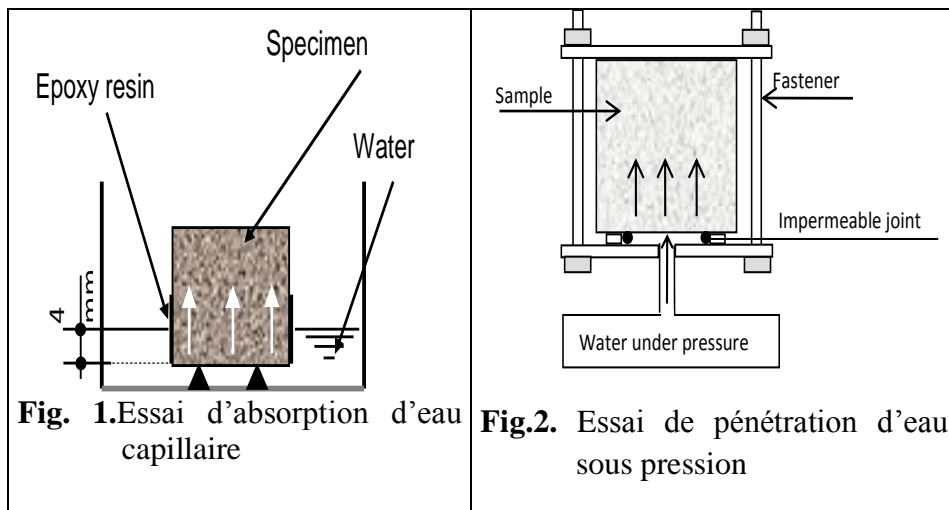
S : coefficient d'absorption en $\text{mm/h}^{1/2}$.

La pénétration d'eau sous pression du béton est déterminée selon la norme DIN 1048 [DIN 1048, 2000], après 90 jours de cure humide. Avant l'essai, les échantillons sont séchés à 105°C jusqu'à masse constante. Dans cet essai, une pression de 3 bar a été appliquée pendant 24 heures sur des échantillons cubique de dimension 15 cm (Figure 2). À la fin de l'essai, l'éprouvette du béton est coupée en deux parties à l'aide d'un « split test » et la profondeur de pénétration d'eau est ainsi mesurée.

Tableau 2. Composition des bétons étudiés.

Béton	E/L	Liant (kg/m^3)		Aggrégats (kg/m^3)			SP* (%)
		Ciment	Laitier	Sable 0/5	G1 8/15	G2 15/25	
A0	0,65	365	0	734	468	655	-
A15		310	55	734	468	655	-
A30		205	110	734	468	655	-
A50		182,5	182,5	734	468	655	-
B0	0,42	365	0	734	468	655	1,8
B15		310	55	734	468	655	1,8
B30		205	110	734	468	655	1,8
B50		182,5	182,5	734	468	655	1,8

* SP : superplastifiant dosé en poids du liant.



RESULTATS ET DISCUSSION

Résistance à la compression des mortiers au laitier

La figure 3 présente les résultats de la résistance à la compression des mortiers avec et sans laitier.

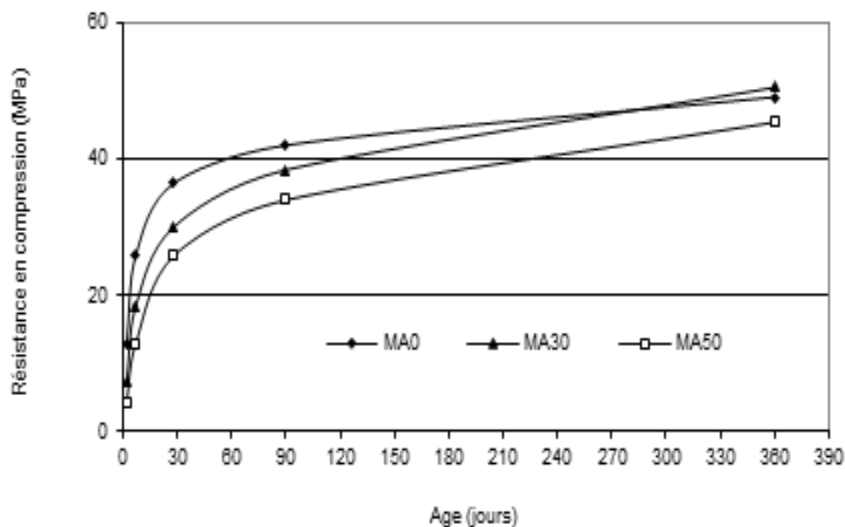


Fig.3. Evolution de la résistance en compression des mortiers au laitier

La substitution du ciment par du laitier a donné de faibles résistances à la compression à jeune âge (2 à 7 jours). Cependant, la résistance des mortiers au laitier se rapproche à celle du mortier M0 à 90 jours, particulièrement pour le mortier M30 (8% de différence). Après 360 jours de cure humide, les résistances sont comparables pour les trois mortiers étudiés, avec toutefois, une légère diminution pour le M50 (d'environ 7%), qui reste relativement faible. Ceci est expliqué par la faible activité hydraulique du laitier granulé d'EL Hadjar (HadjSadok et al, 2008). Des résultats similaires sur le laitier d'El Hadjar ont été cités dans la littérature (Behim et al, 2003).

Absorption d'eau capillaire des bétons au laitier

Les figures 4 et 5 présentent la quantité d'eau absorbée par unité de surface en fonction du temps, pour les bétons au laitier avec des rapports E/L de 0,65 et de 0,42 respectivement. Le tableau 3 présente le coefficient d'absorption capillaire S , calculé selon l'équation (1).

Tableau 3. Coefficient d'absorption capillaire des bétons au laitier.

Coefficient d'absorption « S » ($\text{kg}/\text{mm}^2/\text{h}^{1/2}$)								
E/L	0,65				0,42			
Béton	A0	A15	A30	A50	B0	B15	B30	B50
Laitier (%)	0	15	30	50	0	15	30	50
28 jours	10,73	11,32	11,46	11,60	3,24	3,53	3,38	3,22
90 jours	7,45	6,95	9,23	9,26	3,23	2,97	3,38	3,08

D'après ces résultats, on observe une diminution de l'absorption d'eau avec l'âge et avec le rapport E/L. Néanmoins, la présence du laitier a engendré une augmentation de l'absorption d'eau pour les bétons avec E/L = 0,65 (Fig.4), à 28 comme à 90 jours; le béton A15 constitue une exception puisque, après 90 jours, il présente une absorption moins importante que celle des autres bétons. Lorsque le rapport E/L diminue à 0,42 (Figure 5), l'absorption d'eau à 28 jours est comparable pour tous les bétons étudiés. A 90 jours, une légère diminution de l'absorption d'eau pour les bétons au laitier est enregistrée, notamment pour le B50 qui présente une valeur du coefficient d'absorption de $3,05 \text{ kg}/\text{mm}^2/\text{h}^{1/2}$ comparée à $3,23 \text{ kg}/\text{mm}^2/\text{h}^{1/2}$ pour le béton B0 (Tableau 3). Alexander et al [1999] ont trouvé que l'incorporation de 50% de laitier du béton diminue le coefficient d'absorption de 9%. Ce résultat est confirmé par d'autres recherches montrant une diminution de l'absorption d'eau par capillarité pour les bétons au laitier, particulièrement pour des taux de laitier supérieurs à 50%

(Jiang et Grandet, 1989). Cette diminution reflète une structure de pores plus raffiné et une diminution de la porosité capillaire due à la formation de CSH secondaire issu de l'hydratation du laitier (Popovics, 1992).

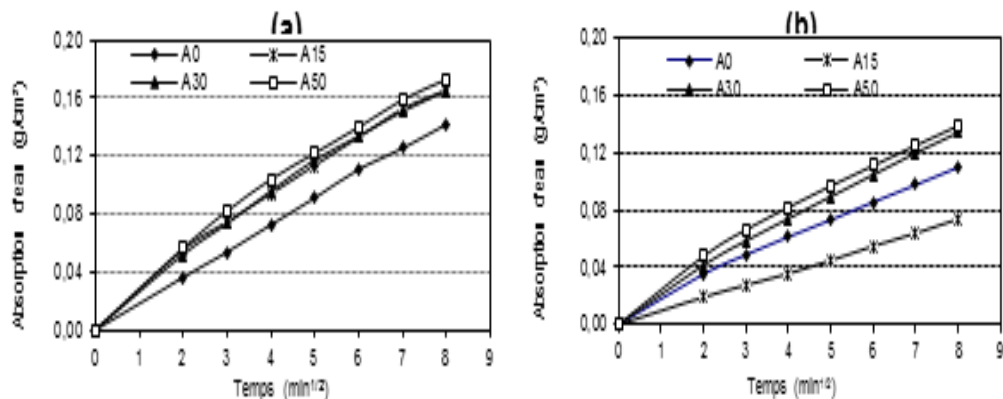


Fig. 4. Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons au laitier (E/L=0,65), après 28 jours (a) et 90 jours (b).

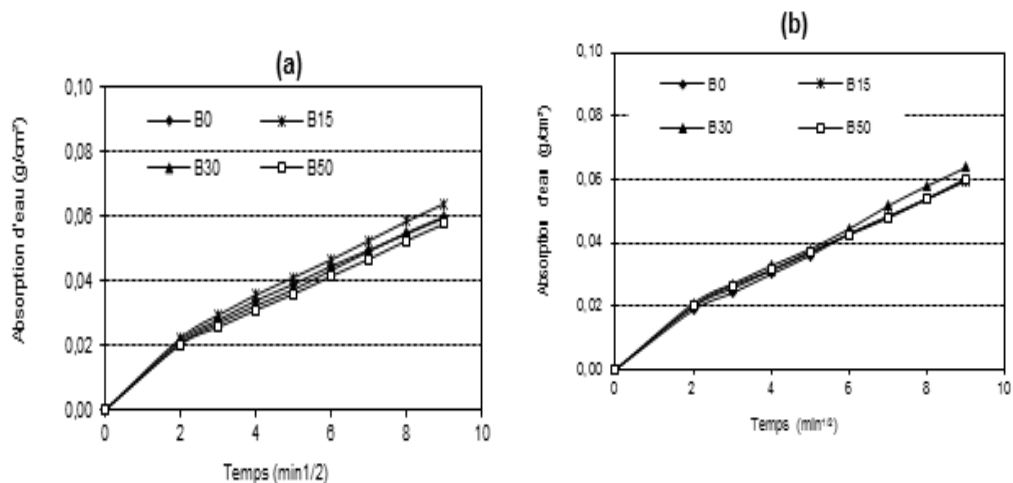


Fig.5. Absorption d'eau capillaire par unité de surface des bétons au laitier (E/L=0,42), après 28 jours (a) et 90 jours (b).

Pénétration d'eau sous pression

Les résultats de la profondeur de pénétration d'eau sous pression des bétons au laitier sont regroupés dans le tableau 4.

Tableau 4. Profondeur de pénétration d'eau sous pression des bétons au laitier

Profondeur de pénétration (mm)				
Taux de laitier (%)	0	15	30	50
Béton avec E/L=0,65	67,30	69,55	69,00	74,75
Béton avec E/L=0,42	57,40	58,70	57,00	56,50

Après 90 jours de maturation, pour un rapport E/L de 0,65, la perméabilité à l'eau des bétons au laitier est supérieure à celle du béton témoin, particulièrement celle du béton avec 50% de laitier, qui présente une augmentation de 11%. D'autre part, une diminution de la profondeur de pénétration d'eau est observée en fonction de la diminution du rapport E/L, pour tous les bétons étudiés. Cela est dû principalement à la diminution de la porosité du béton. On peut aussi constater un comportement différent entre les bétons au laitier avec un faible rapport E/L (0,42), par rapport à ceux avec E/L de 0,65. En effet, la profondeur de pénétration est assez comparable pour les bétons avec E/L de 0,42. On observe même une légère diminution pour les bétons avec 30% et 50% de laitier. Cet effet peut être expliqué par une meilleure activation du laitier et, par conséquent, un meilleur remplissage des grands pores capillaires. S'ajoute à cela le faible dégagement de la chaleur d'hydratation des bétons au laitier, qui peut réduire les fissures d'origine thermique et ainsi, améliorer la perméabilité du béton (Popovics, 1992, Cheng, 2005).

CONCLUSION

La résistance à la compression des mortiers à base de ciments au laitier d'El Hadjar reste faible à jeune âge, mais comparable à long terme par rapport à celle d'un mortier à base de CEM I. Pour les bétons avec un rapport E/L de 0,65, l'augmentation du taux du laitier conduit à une augmentation de l'absorption d'eau par capillarité et de la perméabilité à l'eau du béton. Avec un faible rapport E/L (de 0,42), l'absorption capillaire à 28 jours est semblable pour tous les bétons étudiés. À 90 jours, l'absorption ainsi que la perméabilité à l'eau sont moindres pour les bétons au laitier, particulièrement pour un taux de substitution de 50%. Enfin, une utilisation rationnelle du laitier granulé d'El Hadjar semble être une bonne

alternative pour améliorer les propriétés de perméabilité du béton d'ouvrages hydrotechniques et pour une meilleure préservation de l'environnement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alexander MG.& Magee BJ.,(1999). *Durability performance of concrete containing condensed silica fume*, Cement and Concrete Research, vol.29, pp 917-922
- Behim, M., CYR, M., Habita, MF. & Clastres, P. (2003). *Hauts-Fourneaux d'El Hadjar (Algérie): Réactivité du laitier granulé*, Ciments, Bétons, Plâtres et Chaux, N° 860, Avril - Mai.
- Cheng A., Huang R., Jiann-Kuo W. and Cheng-Hsin C. (2005). *Influence of GGBS on durability and corrosion behavior of reinforced concrete*, Materials Chemistry and Physics, vol. 93, pp 404-411.
- DIN 1048. (2000). *Testing method for concrete: determination of the depth of penetration of water under pressure*
- EN 196-1.(1995). European Committee for Standardisation. Methods of testing cement. Part 1: determination of strength. Brussels.
- Guneyisi E.& Gesoglu M. (2008). *A study on durability properties of high-performance concretes incorporating high replacement levels of slag*, Materials and Structure, vol.12, pp225-230
- Hadj Sadok A., Kenai S.& Menadi B. (2008). *Résistance aux sulfates des mortiers à base de ciment au laitier*, Colloque International sur la caractérisation et la modélisation des matériaux et structures, 16-18 novembre, Tizi-ouzou, Algérie. www.ummtto.dz
- Hadj Sadok A., Kenai S., Courard L. & Darimont A. (2011). *Microstructure and durability of mortars modified with medium active blast furnace slag*, Construction & Building Materials. vol 25, pp1018-1025.
- Jiang SP. & Grandet J. (1989). *Evolution comparée des porosités des mortiers de ciment au laitier et des mortiers de ciment portland*, Cement and Concrete Research, vol.19, pp 487-495.
- Malami CH .& Kaloidas V. (1994). *Carbonation and porosity of mortar specimens with pozzolanic and hydraulic cement admixtures*, Cement and Concrete Research, vol. 24, pp 1444-1454,
- Popovics S., (1992). *Concrete materials; Properties, specifications and testing*, Second Edition, NOYES, USA.

&&&&&