

# L'INFLUENCE DE L'ACTIVATION DU LAITIER SUR LE COMPORTEMENT MECANIQUE DES BETONS

L. Zeghichi, B. Mezghiche<sup>1</sup>, A. Merzougui  
I.N.S.F.P., B.P. 1489, M'sila 28000, Algérie  
<sup>1</sup> Université de Biskra, Biskra 070000, Algérie  
zeghichi2004@yahoo.fr

(Received 20 June 2006 - Accepted 1 March 2007)

## RESUME

*L'utilisation des ajouts minéraux en remplacement du ciment est très importante, car en plus des économies d'énergie et de la diminution du CO<sub>2</sub>, les ajouts améliorent les propriétés du béton.*

*Le laitier du haut fourneau est l'ajout le plus connu et le plus fiable pour sa qualité. La présente étude traite l'activation du laitier (classique par la chaux ou la Ca(OH)<sub>2</sub> libérée lors de l'hydratation du ciment Portland) et l'activation alcaline par la soude (NaOH) et le carbonate de sodium Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> sur le comportement mécanique du béton.*

*Les caractéristiques chimiques et physiques des matériaux utilisés sont déterminées. Les essais effectués sont destructifs (compression et traction par fendage); les résultats obtenus montrent que la combinaison de l'activation alcaline du laitier et l'étuvage améliorent nettement les résistances mécaniques du béton à court et à long terme.*

**Mots clés :** laitier granulé, activation alcaline, résistance, étuvage

## ABSTRACT

*The use of mineral admixtures in replacement of cement is very important, because in addition to the economy in energy and diminution in CO<sub>2</sub>, admixtures improve concrete's characteristics.*

*The blast furnace slag is the most common addition, and the most effective for its quality.*

*The present study deals with the effect of activation of slag : Classical activation by lime or by Ca(OH)<sub>2</sub> freed during Portland cement hydration. Alkaline activation by sodium hydroxide (NaOH) or by sodium carbonate (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), over the concrete's mechanic behavior.*

*The combination of the alkaline activation and the steam curing improve mainly concrete's strength in the short and long terms.*

**Keywords :** granulated slag, alkaline activation, strength, steam curing

## INTRODUCTION

Le laitier est un sous produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Pour  $1\text{m}^3$  du métal en fusion environ 280 à 340kg de laitier est produit dans les hauts fourneaux modernes (Malhotra, 1987). En Algérie la production annuelle du laitier est estimée à 500.000 tonnes, ne trouvant que quelques rares applications. En cimenterie, seul le laitier granulé est utilisé comme ajout au ciment Portland, obtenu par un refroidissement rapide, afin de le conserver à l'état vitreux. La structure vitreuse métastable attribue au laitier la faculté de réagir, elle possède une énergie de cristallisation non dissipée de l'ordre de 200 kilo-joule/kg (Venuat, 1989). Le laitier ne possède par lui-même aucune vertu liante, mais sous la forme broyée et en présence d'eau, il réagit chimiquement avec la chaux et l'eau pour former des composés possédant des valeurs liantes (Zeghichi, 1998).

L'activation classique du laitier consiste à activer le laitier par l'ajout de chaux sous forme de poudre, où à partir du ciment Portland (activation calcique) ou par l'ajout du gypse (activation sulfatique). Ce type d'activation est connu depuis fort longtemps. A partir des années 70, l'activation alcaline du laitier a bénéficié de plusieurs études et publications, et a connu plusieurs applications en URSS et aux Pays Bas.

L'activation alcaline se réfère principalement à l'activation par :

- Les alcalis caustiques (NaOH, KOH, ...).
- Les sels non siliceux ( $\text{R}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{R}_2\text{SO}_3$ , ...).
- Les sels siliceux ( $\text{R}_2\text{O}$ , m)  $\text{SiO}_2$ . (où R représente Na, K et Li) (Zeghichi, 2004).

Le processus de l'activation est influencé par la composition chimique du laitier, l'activant utilisé et la phase vitreuse (teneur en verre). Les activateurs ne sont pas de simple catalyseurs permettant le déroulement des réactions, mais également des réactifs entrant dans les réactions de la formation des hydrates (Voinovitch et Dron, 1976). Ils ont comme rôle de :

- Accélérer la solubilité des composants du laitier.
- Favoriser la formation de quelques hydrates.
- Favoriser la formation du réseau de la structure des hydrates (Runzhang, 1988).

Les bénéfices qui pouvaient être tirés en utilisant les ciments de laitier sont multiples :

- Ecologiques et environnementaux (utilisation d'un sous produit et la diminution de l'émission de  $\text{CO}_2$ ).
- Economiques (le coût du laitier est le coût de son transport ; l'économie du coût du combustible pour la production de la même quantité de ciment).
- Techniques (amélioration des propriétés mécaniques des bétons, durabilité largement améliorée) (Malhotra, 1987).

## CARACTERISTIQUES DES MATERIAUX UTILISES

- Le ciment : c'est un ciment Portland artificiel, provenant de Ain touta. (Batna – Algérie).
- Le laitier granulé du haut fourneau : provient du combinat métallurgique (El-hadjar) de Annaba, obtenu par un refroidissement rapide dans les bassins d'eau présentant un module de basicité de 1.07, broyé jusqu'à une surface spécifique de  $3200\text{g}/\text{cm}^2$ .
- Le sable : c'est un sable fin provenant de Boussaâda (Msila).

- Pierres concassées : ce sont des roches silico calcaires concassées provenant de la région de Msila présentant les fractions suivantes : 3/8, 8/16 et 16/25.
- L'eau : l'eau de gâchage est de l'eau potable.

Les compositions chimiques des différents composants sont représentées au Tableau 1.

**TABLEAU 1**

**Composition Chimique des Composants du Béton**

Teneur %								
Composants	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O
CPA	21.14	5.46	3.57	64.20	1.53	-	-	-
Laitier	40.8	5.2	0.53	43.01	6.40	0.8	0.58	-
Sable	89.67	0.90	0.91	5.96	0.20	0.05	0.3	0.01
Pierre concassée	40.65	8.87	3.25	40.56	3.65	0.79	0.65	0.01

Les caractéristiques physiques des composants du béton sont représentées au Tableau 2.

**TABLEAU 2**

**Caractéristiques des Composants du Béton**

Granulats	CPA	Laitier	Sable	Pierre concassée		
Classe granulaire	-	-	0/3	3/8	8/16	16/25
Masse volumique absolue kg/m <sup>3</sup>	3100	2940	2540	2540	2560	2600
Masse volumique Apparente kg/m <sup>3</sup>	1125	1215	1540	1340	1370	1390
Porosité	-	-	39.37	46.96	46.48	46.50
Coefficient d'absorption	-	-	2.30	0.20	0.50	0.50
Equivalent de sable	-	-	75	-	-	-
Los Angeles	-	-	-	-	-	22.87

Les courbes granulométriques des granulats (sable – pierre concassée) sont présentées à la Figure 1.

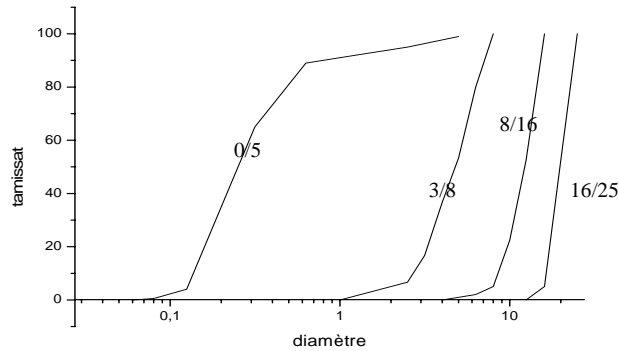


Figure 1. Courbe granulométrique du sable et pierres concassées.

### FORMULATION DU BETON

La méthode utilisée pour la formulation du béton est celle de Dreux Gorisse modifiée (Dupain & Lanchon, 2000).

Béton ordinaire : ciment :  $350 \text{ kg/m}^3$ , gros granulats :  $1163 \text{ kg/m}^3$ , sable :  $590 \text{ kg/m}^3$ , eau : 188L.

Béton au laitier activé : ciment :  $390 \text{ kg/m}^3$ , gros granulats :  $1115 \text{ kg/m}^3$ , sable :  $565 \text{ kg/m}^3$ , solution basique : 196L.

Les éprouvettes utilisées dans cette étude sont :

- Cubiques de  $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}$  confectionnées pour effectuer l'essai de compression.
- Cylindriques de  $16 \times 32 \text{ cm}$  confectionnées pour effectuer l'essai de traction par fendage.

- Les éprouvettes sont conservées dans un milieu humide (dans l'eau à  $20^\circ\text{C}$ ).
- D'autres éprouvettes ont subi une accélération de durcissement par étuvage à  $60^\circ\text{C}$  et à une humidité de 95%.

### PRESENTATION ET ANALYSE DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

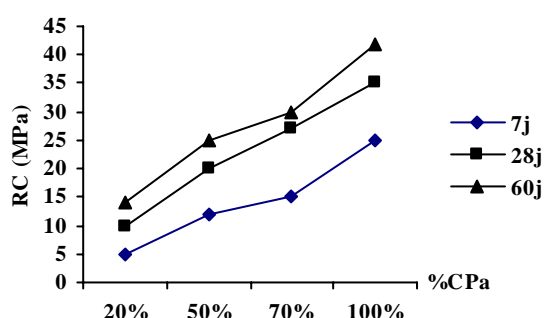
#### Activation du laitier par le ciment Portland

L'hydratation du ciment au laitier activé par le ciment Portland (ciment Portland au laitier) est très complexe parce que les deux composés (clinker et laitier) vont réagir avec l'eau.

On considère que le ciment Portland s'hydrate de la même manière qu'un ciment Portland ordinaire pour donner naissance aux composés hydratés suivants : CHS, l'étringite et  $\text{Ca}(\text{OH})_2$ . Le laitier granulé, finement broyé et mélangé avec l'eau, ne s'hydrate pas, à cause de la formation d'une couche acide autour du grain de laitier empêchant ce dernier de s'hydrater (Lea, 1971).

La portlandite ( $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ) libérée pendant l'hydratation du ciment Portland va dissoudre cette couche acide et entre en réaction avec les composants du laitier, pour former les produits d'hydratation suivants : CHS, l'aluminat tétracalcique hydraté, l'étringite, et le  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  qui va disparaître pour les teneurs élevées en laitier.

L'évolution de la résistance mécanique en compression du béton au laitier, activé par le ciment Portland suivant des proportions variantes de CPA : (20% - 50% - 70% et 100%), est représentée à la Figure 2.



**Figure 2. L'évolution de la résistance du béton (activé par le clinker).**

On remarque l'augmentation de la résistance mécanique aux différents âges de durcissement avec l'augmentation du pourcentage du CPA ajouté au laitier.

Pour les pourcentages de 20% la résistance du béton est médiocre, améliorée nettement pour les pourcentages de 50% et 70%. A l'âge de 60 jours une légère augmentation de la résistance est remarquée. A long terme la résistance des bétons à base des ciments au laitier rattrape et dépasse celle des bétons à base des CPA (Bijen, 1996).

L'évolution de la résistance est liée au phénomène de l'hydratation : plus la quantité de  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  libérée par le CPA est grande, plus les produits d'hydratation du laitier formés sont denses.

#### **L'activation alcaline du laitier**

Dans cette partie le composant alcalin utilisé est le carbonate de sodium ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ) et la soude ( $\text{NaOH}$ ) en tant qu'activants du laitier avec une densité de  $1,25\text{g}/\text{cm}^3$ . La Figure 3 représente l'évolution de la résistance en compression du béton activé par  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  aux différents âges de durcissement naturel.

D'après la Figure 3, l'activation alcaline du laitier améliore nettement la résistance à long terme. Les résistances obtenues par activation alcaline sont équivalentes à celles obtenues à partir d'une activation par le CPA de 70%.

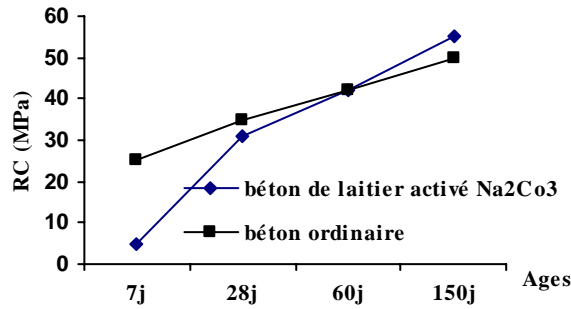


Figure 3. L'évolution de la résistance en compression du béton.

L'augmentation de la résistance est due à la formation des silicates de calcium en grande quantité, ce qui conduit à la réduction de la taille des pores dans la pâte de ciment.

La Figure 4 exprime l'évolution de la résistance mécanique en compression à 28 jours de durcissement suivant la nature de l'activant utilisé.

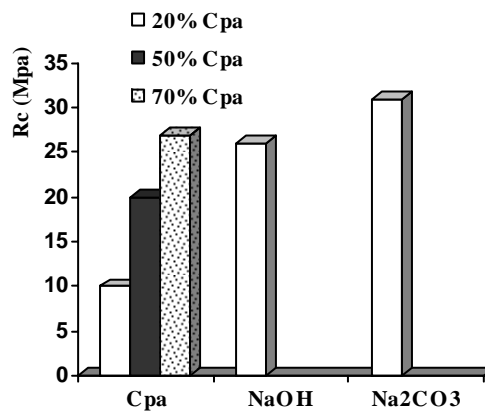


Figure 4. Résistance en compression du béton à 28J en fonction des activants utilisés.

De la même manière on a présenté la résistance mécanique en traction par fendage à la Figure 5, afin d'estimer la qualité du béton à base du laitier activé.

A partir de cette figure on remarque que les bétons à base de laitier activé présentent une résistance en traction meilleure par rapport à celle du béton ordinaire ; cela est dû à la bonne adhérence entre le granulats et la matrice du ciment.

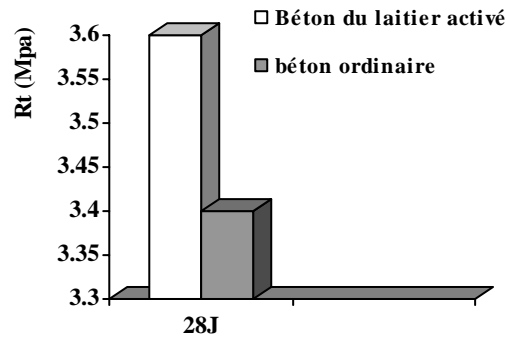


Figure 5. Résistance en traction par fendage du béton au laitier activé.

**L'influence de l'étuvage sur la résistance des bétons au laitier activé**

Pendant l'étuvage, le rôle de la vapeur d'eau est de conserver l'eau à l'intérieur du matériau, ce traitement thermique a pour but d'accélérer le durcissement sans provoquer des anomalies sur les propriétés du béton.

La Figure 6 représente l'évolution de la résistance d'un béton au laitier activé par  $Na_2CO_3$  après un jour de durcissement par étuvage (2h+12h+2h) et après 28 jours. (les éprouvettes sont décoffrées après 1 jour d'étuvage puis gardées dans un milieu humide).

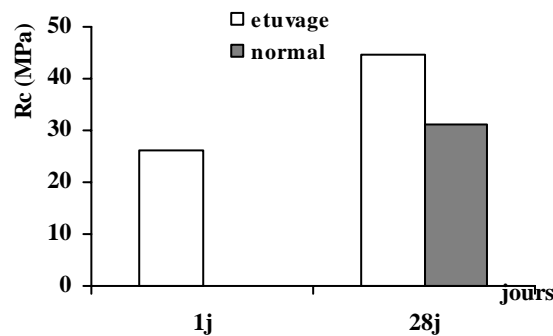


Figure 6. L'effet de l'étuvage sur l'évolution de la résistance du béton au laitier activé.

Les ciments au laitier supportent bien l'étuvage, dans le cas du béton au laitier activé (béton basique), l'étuvage constitue une double activation du laitier, il permet d'avoir des résistances intéressantes au bout d'un jour de durcissement (Venuat, 1984), ce qui permet de réaliser des éléments structuraux préfabriqués par ce procédé.

Au bout de 28 jours la résistance acquise est plus grande que celle obtenue à partir d'un durcissement naturel.

### L'influence du dosage en ciment sur la résistance du béton au laitier activé

Les essais sont effectués après 28 jours de durcissement (les éprouvettes sont étuvées dès l'âge de 1 jour, elles sont décoffrées et gardées humides).

Le dosage en ciment varie de 200kg/m<sup>3</sup> à 500kg/m<sup>3</sup>. Les résultats obtenus sont représentés à la Figure 7.

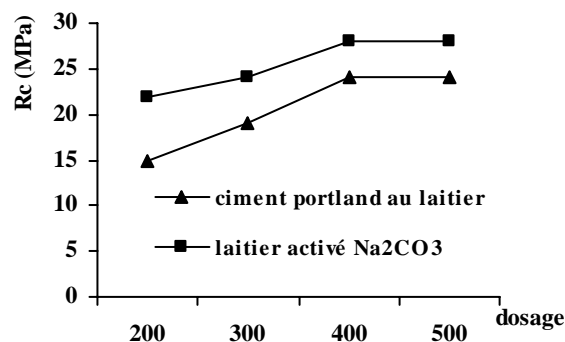


Figure 7. L'évolution de la résistance en fonction du dosage en ciment.

La résistance des bétons à la compression augmente intensément quand la dose de liant par 1m<sup>3</sup> de béton atteint 350kg. Toute augmentation au delà de cette dose ne conduit pas à une élévation significative de la résistance des bétons essayés (Mezghiche, 1989).

Il reste à noter la grande durabilité des bétons au laitier (bonne résistance aux milieux agressifs, forte compacité, faible perméabilité,...).

### CONCLUSION

Cette étude s'inscrit dans le cadre de la valorisation du laitier granulé du haut fourneau d'El-Hadjar (Annaba); elle a permis de mieux connaître l'effet positif de l'activation du laitier. Sur le plan économique, le coût du laitier est négligeable, seul le coût des activateurs est considéré. Sur le plan technologique, une amélioration des résistances mécaniques est constatée : en compression (à long terme) et en traction ce qui permet d'assurer une durabilité aux structures réalisées à partir du laitier activé.

La combinaison de l'étuvage et l'activation du laitier permet d'obtenir des résistances notables aux âges précoces, d'où la possibilité de la préfabrication des éléments à base du laitier activé.

L'augmentation du dosage en ciment (>350kg) n'améliore pas la résistance du béton d'une façon considérable.

## REFERENCES

- Bijen, J. 1996. *Blast furnace slag*. Beton prisma, The Netherlands, 62 p.
- Dupain, R. et Lanchon, R. 2000. *Granulats, sols, ciments et bétons*. Casteilla, Paris, 234 p.
- Lea, F.M. 1971. *The chemistry of cement and concrete*. First American edition, New York, 727 p.
- Malhotra, V.M. 1987. *Matériaux complémentaires en cimentation pour le béton*. Publié par le centre canadien de la technologie et de l'énergie, Ottawa, Canada.
- Mezghiche, B. 1989. *Technologie des bétons à laitier basique pour les conditions de la république algérienne*. Thèse de doctorat, Université de Kiev, Kiev, URSS, 163 p.
- Runzhang, Y. 1988. Study on structure and latent hydraulic activity of slag and its activation mechanism. *Silicates industriels*, (4): 55-59.
- Venuat, M. 1984. *Adjuvants et traitements*. 1<sup>ère</sup> édition auteur, Eyrolles, Paris, 814 p.
- Venuat, M. 1989. *La pratique des ciments, mortiers et bétons*. Eyrolles, Paris.
- Voinovitch, I.A., Dron, R. 1976. Action des différents activants sur l'hydratation du laitier granulé. *Bulletin – liaison lobo*, Ponts et Chaussées, 83 mai-juin.
- Zeghichi, L. 1998. *Etude des liants et bétons à base des alcalis et ciments au laitier*. Thèse de magister, Université de Biskra, Biskra, Algérie, 120 p.
- Zeghichi, L. 2004. Etude de l'influence des composés alcalins sur les propriétés du ciment au laitier. *11<sup>th</sup> International Conference for Building and Construction*, Interbuild, Cairo, pp. 523-530.