

## ÉTUDE DE L'INFLUENCE DES GRANULATS SUR LE COMPORTEMENT MÉCANIQUE DU BÉTON BASIQUE

L. ZEGHICHI<sup>1</sup>, B. MEZGHICHE<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Université de M'sila, Algérie, Email : Zeghichi2004@yahoo.fr

<sup>2</sup> Université de Biskra.

### RÉSUMÉ

*Le béton est un matériau très demandé et son utilisation ne cessera de croître au cours des années à venir. Afin d'assurer sa croissance, l'approche du développement durable doit être intégrée à la production du ciment et du béton.*

*L'objectif principal de cette étude rentre dans ce contexte. Il traite de la valorisation des produits du laitier d'El-Hadjjar (granulé et cristallisé) pour la confection d'un béton basique (béton au laitier activé par le carbonate de sodium) à base des granulats de laitier cristallisé.*

*L'étude a montré une amélioration des propriétés mécaniques et rhéologiques de ce matériau en comparaison avec un béton ordinaire, ce qui traduit le rôle actif des granulats du laitier dans le durcissement du béton basique.*

**MOTS-CLÉS :** Valorisation, Laitier granulé, Béton basique, Laitier cristallisé, Résistance.

### ABSTRACT

*The concrete is a material very requires and its use will not cease growing during years to come.*

*In order to ensure its growth, the approach of the durable development must be integrated into the production of cement and the concrete. The objective of this study returns in this context, it treats the valorization of the slag products (granulated and crystallized) on the production of a basic concrete (concrete with activated slag by the sodium carbonate).*

*The study showed an improvement of the mechanical and elastic properties of this material on comparison with ordinary concrete. Which translated the active role of the slag aggregates in the hardening of the basic concrete.*

**KEYWORDS:** Valorization, Granulated slag, Basic concrete, Crystallized slag, Strength.

## 1. Introduction

Le béton basique est un béton à base d'un liant de laitier activé. Il représente un mélange de deux composantes : la composante silico-alumineuse qui est représentée par le laitier finement broyé, et la composante alcaline qui est représentée par un composé alcalin des métaux basiques donnant la réaction dans l'eau ( $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , ...  $\text{Na}_2(\text{m})\text{SiO}_3$ ) Refs. [1 & 2].

Le laitier de haut fourneau est un sous produit de la fabrication de la fonte dans les hauts fourneaux des usines sidérurgiques. Il est composé essentiellement par quatre oxydes :  $\text{CaO}$ ,  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  et  $\text{MgO}$ . Pour un m<sup>3</sup> de métal en fusion, environ 280 à 380kg du laitier sont produits dans les fourneaux modernes Ref. [3].

Le laitier granulé est largement utilisé en cimenterie comme constituant principal pour confectionner des ciments portlands composés qui se distinguent par un durcissement ralenti à leur période initiale en comparaison avec un ciment ordinaire sans ajout. Cette propriété latente du ciment avec ajout minéral nécessite l'emploi d'un bon activateur (effet chimique) qui modifie la prise et le durcissement, d'un broyage poussé (effet mécanique) ou d'un étuvage (effet thermique). Ref [4]

Le laitier granulé ne possède par lui-même aucune vertu liante mais sous la forme broyée et en présence d'eau, il réagit chimiquement avec la chaux  $\text{CaOH}$ , libérée pendant l'hydratation du clinker pour former des composés possédant des propriétés liantes. Ce type d'activation est connu depuis longtemps : c'est l'activation calcique.

Après le gâchage du ciment au laitier, la réaction du clinker avec l'eau développe un pH avoisinant 12 ; l'alcalinité de la solution de chaux saturée ; ceci est suffisant pour la dissolution de la partie vitreuse du laitier, l'absence du réseau  $\text{SiO}_2$  dans le laitier explique la facilité de son activation. Ref [5]

La réaction du laitier est lente en comparaison avec celle d'un ciment portland ayant la même classe de résistance. Ref [6].

L'activation alcaline du laitier à partir des composants alcalins tels que la soude et les sels siliceux a permis d'obtenir des liants au laitier (sans clinker) présentant des caractéristiques importantes (durabilité supérieure, chaleur d'hydratation moindre) et de réaliser des bétons basiques dont la résistance mécanique en compression peut atteindre 140MPa avec une carbonatation réduite et une meilleure résistance aux sulfates. Refs: [2, 6, 7].

L'activation du laitier a une grande influence sur son hydratation, l'activateur accélère la solubilité des constituants du laitier et favorise la formation des hydrates stables (C-S-H) qui assurent le développement

des résistances. Ref [8].

Le processus de l'activation est influencé par la composition chimique du laitier, sa teneur en partie vitreuse, le type d'activateur utilisé et sa concentration et les conditions du durcissement (la cure). Refs. [2, 9, 10].

L'étude suivante traite à la fois :

- L'effet du carbonate de sodium  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  comme activateur du laitier;
- L'effet des granulats (naturels, ou artificiels) sur le comportement mécanique du béton basique.

## 2. Expérimentation

### 2.1. Matériaux utilisés

- ciment portland composé CEM III/A 42,5 provenant de la cimenterie de M'sila présentant une masse volumique absolue de 3110 kg/m<sup>3</sup> et une surface spécifique de 3500 cm<sup>2</sup>/g (l'addition utilisée : calcaire).
- laitier granulé finement broyé provenant de l'usine d'El Hadjar, présentant une masse volumique absolue de 2930 kg/m<sup>3</sup>, et une surface spécifique de 3200 cm<sup>2</sup>/g.
- sable très fin provenant de la région de Boussaïda présentant une masse volumique de 2540 kg/m<sup>3</sup> et un module de finesse de 1,60.
- pierres concassées naturelles de différentes fractions 3/8, 8/16 et 16/25, présentant une masse volumique absolue de 2550 kg/m<sup>3</sup>.
- laitier cristallisé présentant les mêmes fractions que les pierres concassées et une masse volumique absolue est de 2500 kg/m<sup>3</sup>.
- composant alcalin utilisé pour activer le laitier :  $\text{Na}_2\text{CO}_3$  avec une densité 1,25 g/cm<sup>3</sup> dont la composition chimique est représentée au tableau 2.

Le tableau 1 présente la composition chimique des composants du béton.

Type	Tableau 1								
	SiO <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	Cl <sup>-</sup>
Laitier granulé	49,8	11,91	5,2	0,51	6,1	0,5	0,02	0,08	0,02
CV	20,76	42,42	4,27	2,21	1,21	1,96	0,29	0,09	-
Laitier cristallisé*	49,18	11,59	5,29	0,58	6,08	0,59	0,02	0,04	0,04

\* la composition chimique de ce laitier cristallisé est celle du laitier granulé, pourvu qu'il ait été traité de manière soignée.

Tableau 1 : Composition chimique des composants du béton

Teneur %			
Na <sub>2</sub> O	K <sub>2</sub> O	Ca	SiO <sub>2</sub>
46.6	8.02	36.7	17.73

Tableau 2 : Composition chimique du carbonat de sodium

Le diffractogramme du laitier granulé d'El-hadjar est représenté sur la figure 1

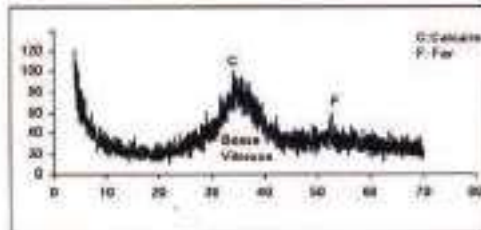


Figure 1 : Diffractogramme du laitier granulé Ref. [11].

### 2. 2. Formulation des bétons

La méthode utilisée pour la formulation du béton est celle de Dreux-Gorisie modifiée Ref. [12].

Données :

Dmax = 25mm

Mélange des granulats :

0/3 (sable) = 34%; 16/25 = 37%; 8/16 = 19%; 3/8 = 10%

résistance souhaitée = 27MPa.

classe vraie du CPJ = 42.5MPa

classe vraie du ciment au laitier activé = 35MPa.

Les quantités des matériaux utilisés sont représentées au tableau 3

Mélange	Composants Kg/m <sup>3</sup>				
	CPJ	Classe de laitier	Sable	Pierre concassée	Laitier cristallisé
Béton ordinaire (granulats naturels)	318	-	590	1162	-
Béton ordinaire (laitier cristallisé)	255	-	590	-	1132
Béton basique (granulats naturels)	-	590	545	1136	-
Béton basique (laitier cristallisé)	-	590	515	-	1083

(\*) Cette quantité correspond à la classe basique (N° 177) avec une densité de 1,13 g/cm<sup>3</sup>.

Tableau 3 : Les quantités des matériaux utilisés

L'activant sélectionné pour effectuer les essais est un sel de base alcaline Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>, choisi pour sa disponibilité et son coût raisonnable. Selon Zeghichi et al., Ref [9], l'utilisation d'un tel activant favorise le développement des résistances à long terme ; l'augmentation de sa densité contribue à l'amélioration de ces dernières.

Collins, Ref [13] a trouvé que l'activation du laitier par un mélange de (NaOH + Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) donne des résistances identiques à celle d'un ciment portland à l'âge précoce.

### 2. 3. Confection des éprouvettes et conservation

Les éprouvettes ont été confectionnées conformément aux normes en vigueur (malaxage, serrage, ...); elles sont de différentes géométries selon le test à effectuer (10x10x10cm, 16x32cm et 10x10x40cm), elles sont conservées après démoulage dans l'eau à 20°C.

Les abréviations suivantes sont utilisées :

B.O.G.N : béton ordinaire à base de granulats naturels.

B.O.G.L : béton ordinaire à base du laitier cristallisé.

B.B.G.N : béton basique à base de granulats naturels.

B.B.G.L : béton basique à base du laitier cristallisé.

### 3. 3. Résultats et discussion

#### 3. 1. Résistance mécanique à la compression

La résistance mécanique à la compression du béton est généralement considérée comme sa plus importante propriété.

La résistance en compression des différents mélanges de béton est estimée aux différents âges de durcissement (7 jours, 28 jours, 180 jours et 365 jours). Elle est représentée à la fig. 1

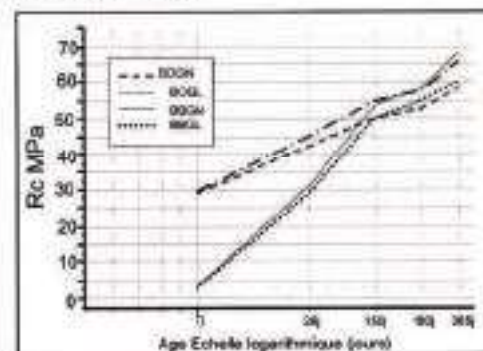


Figure 2 : Evolution des résistances en fonction du temps et du type de béton.

Les bétons basiques développent des résistances très faibles à court terme, ce qui est lié à l'hydratation lente du ciment au laitier, l'utilisation de l'activant Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> n'est pas efficace à l'âge précoce, l'augmentation de la température du béton favorise la dissolution de la partie réactive du laitier et par suite sa résistance Ref. [14].

D'autres activants tel que le verre soluble Na<sub>2</sub>SiO<sub>3</sub> améliorent nettement la résistance, Ref. [15].

La présence des ions de carbonates augmente le délai de prise, par contre les ions de silicates le réduisent. Le pH, induit par  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , diminue le taux de dissolution du laitier. Ref. [16].

Après 7 jours de durcissement, l'augmentation de la résistance des bétons basiques est rapide ; elle atteint celle des bétons ordinaires et la dépasse au bout d'une année de durcissement, ce qui est lié à la formation d'un gel dense de C-S-H.

La continuité des réactions d'hydratation dans les bétons basiques et la formation des silicates de calcium hydratés constituent une matière de remplissage augmentant ainsi la compacité du béton et par suite sa résistance.

La nature des granulats exerce peu d'influence à long terme.

### 3.2. Résistance mécanique à la traction

La résistance à la traction par fendage est estimée après 28 jours, et 365 jours de durcissement.

Les résultats obtenus sont représentés à la fig.3

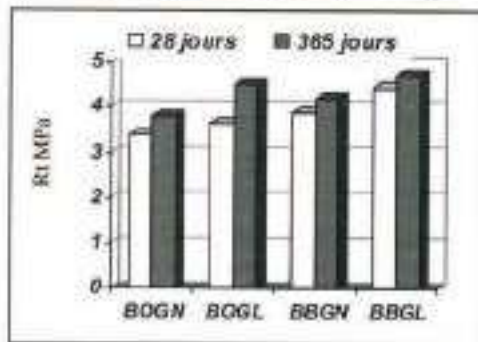


Figure 3 : Résistance à la traction par fendage en fonction du type de béton.

Le laitier cristallisé favorise l'adhérence pâte hydraté-granulat. Sa rugosité et son état de surface sont des facteurs contribuant à l'amélioration de la résistance.

L'utilisation du laitier cristallisé dans le béton ordinaire semble avoir plus d'influence que dans les bétons basiques.

### 3.3. La déformabilité

Pour étudier l'influence du laitier cristallisé sur la déformabilité du béton basique, on a confectionné une série de prismes de  $10 \times 10 \times 40$  cm pour les différents mélanges de béton. Les essais sont effectués après 6 mois de durcissement. La fig. 4 présente l'un des essais effectués.



Figure 4 : Déformations mesurées pendant l'essai de compression.

Les déformations élasto-instantanées longitudinales et transversales (relatives et totales) sont présentées aux figures suivantes (5, 6, 7 et 8).

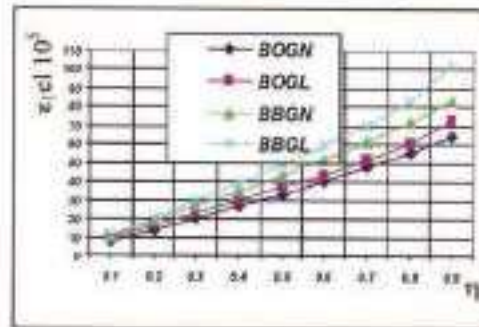


Figure 5 : Déformations élasto-instantanées longitudinales du béton à gel en fonction des contraintes relatives η pour les séries des prismes BOGN, BOGL, BBGN, BBGL.

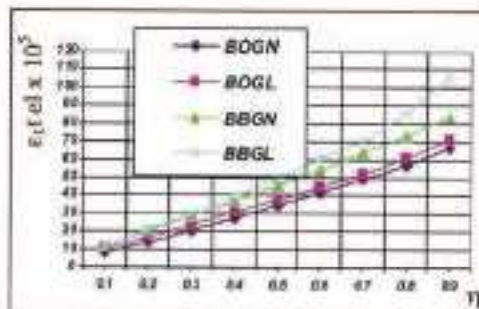


Figure 6 : Déformations élasto-instantanées élastiques longitudinales du béton à gel, en fonction des contraintes relatives η pour les séries des prismes BOGN, BOGL, BBGN, BBGL.

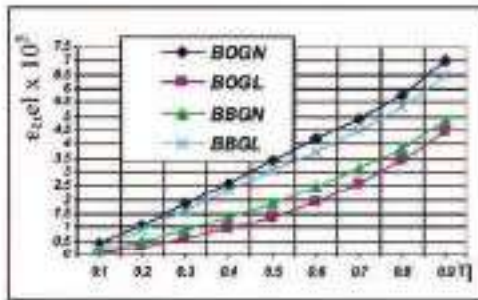


Figure 7 : Déformation élasto-instantanée transversale du béton  $\epsilon_{et}$  en fonction des humidités relatives  $\eta$  pour les séries des bétons BOGN, BOGL, BSGN, BBGL.

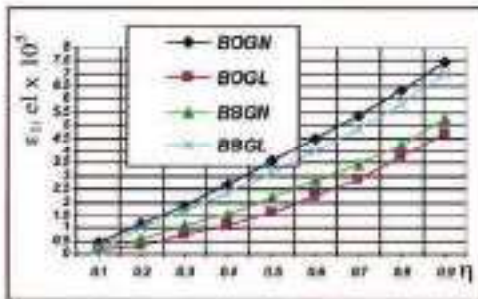


Figure 8 : Déformation élasto-instantanée longitudinale du béton  $\epsilon_{el}$  en fonction des humidités relatives  $\eta$  pour les séries des bétons BOGN, BOGL, BSGN, BBGL.

Les bétons basiques présentent des déformations élasto-instantanées longitudinales plus élevées que celles des bétons ordinaires (à base des granulats naturels ou du laitier cristallisé) ; ce qui est lié à la grande compacité des bétons basiques grâce à la formation des hydrates pendant l'hydratation et par suite, la réduction de la taille des pores.

À partir des résultats obtenus précédemment (déformations), on détermine le module d'élasticité initial à la compression :

$$E = \frac{\sum \Delta \sigma}{\sum \Delta \epsilon}$$

Les résultats obtenus sont représentés sur la figure 9.

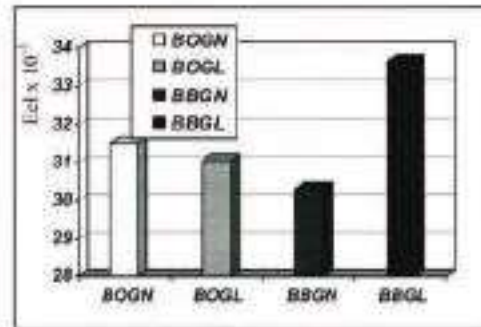


Figure 9 : Module d'élasticité des bétons BOGN, BOGL, BSGN et BBGL.

Le module d'élasticité d'un matériau cimentaire dépend de la déformation des granulats et de la fraction volumétrique qu'ils occupent au sein du matériau ; généralement un volume élevé de la pâte affecte le module d'élasticité.

Les résultats obtenus montrent que le béton basique à base de granulats du laitier cristallisé présente un module d'élasticité plus élevé par rapport aux autres types de béton. On peut expliquer ce phénomène par la qualité des granulats du laitier. Pour le béton ordinaire, le rapport G/S est plus grand en comparaison avec ceux des autres mélanges, ce qui explique l'obtention d'un module d'élasticité élevée.

#### 4. Conclusion

Nous avons étudié dans cette recherche l'influence du laitier cristallisé sur les propriétés mécaniques du béton ordinaire et basique.

L'effet du laitier cristallisé se combine à l'activation alcaline du laitier finement broyé pour améliorer certaines propriétés du béton basique notamment :

- La résistance mécanique en compression à court terme en comparaison avec un béton basique à granulats naturels (BBGN).
- La résistance mécanique en traction (notant ici le rôle de la forme et de la texture des granulats du laitier cristallisé sur l'adhérence entre la pâte hydratée et le granulat).
- Le module d'élasticité assez élevé en comparaison avec les autres types de bétons (BOGN, BOGL et BBGN). Il présente une augmentation de 10 % par rapport au béton basique à granulats naturels et de 6,30 % par rapport au béton ordinaire. Les déformations élasto-instantanées (longitudinales et transversales) restent du même ordre.
- Le laitier cristallisé contribue à l'amélioration du module d'élasticité des bétons à fortes teneurs en liant.

## 5. Bibliographie

- [3] Aïcin P.C. Bétons à haute performance. Editions Eyrolles, Paris, 2001.
- [11] Behim M., Habita M.F., Clastres P. «Caractérisation mécanique, analyse au rayons X et observation au MEB des ciments aux laitiers». Séminaire international de géo-matériaux M'sila, 2003.
- [5] Bijen J. Blast furnace slag cement for durable marine structures. Netherlands, 1996.
- [2] COLLINS F. et al. Early age strength and workability of slag pastes activated by sodium silicates. Magazine of concrete research, 53, N°5, October 2001, pp 321 – 326.
- [13] COLLINS F. et SANJAYAN J.G. Early age strength and workability of slag pastes activated by NaOH and Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>. Cement and concrete research, 1998,28 N5,655-664.
- [12] Dupain R. et al. Granulats, sols, ciments et bétons. Edition Castella, Paris, 2000.
- [16] Fernandez A.J., Puertas F. «Effect of activator mix on the hydration and strength behaviour of alkali activated slag cements». Advances in cement research, 2003, 15 N°03, July, 129/136.
- [10] Malolepszy J., W.N. Wezelik. Calorimetric studies of the slag alkaline binders of thermal analyses. Vol33, 1988, pp.431-434.
- [8] Matschei T., Bellman F., Stark J. Hydration behavior of sulphate- activated slag cement. Advance in cement research, 2005, 17,N4, October,167-178.
- [1] Mezghiche B. et al. Study of the effect of alkalis on the slag cement systems. Proceedings of the international conference on modern concrete material binders additions and admixtures, Dundee, Scotland 1999. PP. 287- 293.
- [7] Mezghiche B. Technologie des bétons aux laitiers basiques pour RADP. Thèse de doctorat en sciences techniques. Institut de minerais de Krivoi Rog, 1989, 163p.
- [15] Mezghiche B. et al. High strength concrete. Proceedings of the international conference (concrete in the service of mankind), Dundee, Scotland 27-28 June 1996.
- [4] Naceri A, Benia M, Effet de l'activation mécanique des ciments du mortier. Algerie Equipement, N43- Decembre , 2007.
- [14] Puertas F., Martínez-Ramírez S. Alkali activated fly / slag cement strength behavior and ash hydration products. Cement and concrete research,30, 2000, 1625-1632.
- [6] Smolczyk H.G. Durability and pore structure on very old concrete. Beton- informationen, 26.heft,1,1986,pp 3-10.
- [9] Zeghichi L. et al. «Study on the effect of alkalis on the cement systems». Can.J.Civ.Eng. 32, 2005, PP. 934 – 939.