

# Etude de l'activation du laitier d'El-Hadjar par des solutions alcalines

BOUGARA Abdelkader\*, EZZIANE Karim\*, HALLAL Ahmed\*, Enseignants chercheurs, Laboratoire Sciences des Matériaux et Environnement, Département de Génie Civil, Université H.B.B. Chlef. Email : aekbougara@hotmail.com

## RÉSUMÉ

Il est possible de formuler des bétons à partir du laitier seul en activant ce dernier par des solutions alcalines tout en gardant les mêmes propriétés du béton à l'état frais et durci. Dans ce présent travail, on a essayé d'activer chimiquement le laitier d'El-Hadjar, de surface spécifique  $3612 \text{ cm}^2/\text{g}$ , par deux solutions alcalines: l'hydroxyde de sodium et l'hydroxyde de potassium ayant différentes molarités et en utilisant de petites quantités de clinker et de chaux comme substituant au laitier afin d'accélérer l'hydratation au jeune âge.

Selon la composition du mortier, on remplace totalement le clinker par le laitier et on mélange avec la solution basique. Les éprouvettes ainsi élaborées seront conservées à l'étuve à vapeur à une température de  $20^\circ\text{C}$  et subiront les tests de compression et de traction à différents âges. On s'aperçoit après analyse et confrontation des résultats, que les valeurs trouvées des résistances sont assez faibles par rapport au mortier témoin, mais n'empêche que ces résultats sont comparables avec ceux des travaux antérieurs.

## Mots-Clés

Laitier, activation chimique, alcalins, compression, traction, clinker, ajouts.

## 1. Introduction

Le développement de la résistance dû au ciment au laitier seul est relativement lent. Cependant, les recherches antérieures, et qui sont en cours, montrent que les solutions alcalines contribuent à la production de C-S-H et d'autres phases hydratées [1] ainsi qu'à l'accélération du durcissement. Les premières recherches ont été réalisées en Ukraine vers les années 50, puis se sont étendues vers les pays de l'Est d'Europe et les pays scandinaves dans les années 70. Récemment une préoccupation particulière à ces recherches a été donnée au point où il y a eu des applications réalisées à l'extrême orient, en Europe et aux Etats Unis en 1987 [2]. Les activateurs actuels utilisés sont la chaux, l'hydroxyde de sodium et en général les sels et les acides faibles et les bases fortes [1].

## 2. Présentation des essais

L'objectif de cette étude est d'activer le laitier d'El Hadjar chimiquement en utilisant des solutions alcalines, à savoir l'hydroxyde de sodium et l'hydroxyde de potassium. L'effet de l'ajout de petites quantités de clinker et de chaux a été observé. Les résultats des résistances mécaniques à différents âges ont abouti à conclure que ce procédé permet de développer les propriétés hydrauliques du laitier.

### 2.1 Matériaux utilisés

Afin de bien mener ce travail, on a utilisé du clinker et du laitier à l'état brut, ensuite, on a procédé à leurs broyages à l'aide de l'appareil de Los Angeles jusqu'à l'obtention d'une finesse semblable à celle des ciments ordinaires. Les deux matériaux ont été broyés séparément au laboratoire à l'aide de l'appareil Los Angeles en ajoutant au clinker une proportion de 5 % de gypse pour régulariser la prise. On a utilisé un sable normalisé obtenu par le mélange de deux sables à part égale de Oued Rass et Oued Chlef ayant respectivement des modules de finesse 1.95 et 3.06.

### 2.2 Confection des éprouvettes

Les éprouvettes sont confectionnées à base d'un mortier témoin ne contenant pas de laitier (3 : 1 : 0.5) et d'un mortier à base de laitier seul (2 : 1 : 0.5). Pour le mortier témoin, le mélange est

malaxé dans un malaxeur de 5 l pendant 2 minutes, puis coulé dans des moules de  $4 \times 4 \times 16$  et vibré à l'aide d'une table à secousses. Avec la deuxième tranche de l'eau de gâchage, on a introduit une proportion d'un superplastifiant afin d'améliorer la maniabilité et faciliter la défloculation des grains. Pour le mortier de laitier, l'eau de gâchage est substituée par la solution alcaline selon les mêmes proportions et avec le même procédé.

### 2.3 Essais effectués

Un jour après le moulage, les éprouvettes seront démoulées et mises en conservation sous l'eau jusqu'au moment de l'essai où elles subiront un essai de flexion. Les deux bouts de chaque éprouvette seront testés en compression afin de déterminer la résistance du mortier pour chaque dosage en laitier pour différents âges.

## 3. Analyse des résultats

### 3.1 Effet du type d'activateur

L'effet de l'activation chimique du laitier par les solutions NaOH et KOH de molarité 4 est dressé dans le tableau 3. Les résultats obtenus indiquent que le meilleur activateur parmi ceux utilisés est l'hydroxyde de potassium (voir figure 2), malgré que les deux solutions sont toutes des bases fortes ayant pH voisin de 14. On attribue cela au fait que l'hydroxyde de potassium est plus électropositif (chimiquement) que l'hydroxyde de sodium.

On note aussi que les résistances obtenues sont nettement inférieures à celles du mortier ordinaire (voir tableau 3). La résistance à la traction du mortier augmente de façon continue avec l'âge jusqu'à 90 jours où on remarque une chute de résistance qui peut être due à l'effet de cure comme il est constaté dans les travaux de Swamy et Bouikni [3](1990) ou bien due à des effets chimiques méconnus.

### 3.2 Effet de la molarité

En faisant varier la molarité du meilleur activateur (KOH), on s'aperçoit que les résistances augmentent avec l'augmentation du dosage de la base jusqu'à une valeur optimale qui est 3 fois molaires comme cela est illustré sur les figures 4 et 5.

### 3.3 Effet des ajouts

Dans le but d'améliorer les résistances du laitier activé par l'hydroxyde de sodium, on a remplacé une petite quantité de laitier (5 %) par du clinker et de la chaux. Les résultats sont consignés sur le tableau 3-3.

L'addition d'une petite quantité de clinker ou de chaux au laitier n'a en général aucun effet significatif sur le développement des résistances, au contraire elle a influé négativement puisqu'on mentionne un abaissement de résistance par rapport au laitier sans ajout probablement dû à une rapide prise gênant un bon compactage. On remarque qu'on n'a pas pu avoir les valeurs de la résistance à la traction du mortier à un jour parce que les éprouvettes étaient encore molles.

Par ailleurs les travaux de Douglas [1] (1990) ont montré que l'addition d'une petite quantité de chaux ou de clinker a effectivement amélioré les résistances au jeune âge en utilisant comme activateur le silicate de sodium. Cette différence de résultat doit être confrontée avec une étude plus poussée de l'activation du laitier d'El-Hadjar avec le clinker et les solutions basiques afin de mieux situer son degré d'activation et d'optimiser ces caractéristiques obtenues.

### 3.4 Confrontation des résultats

Malgré que les résultats obtenus n'atteignent pas les buts escomptés comparativement avec ceux du mortier ordinaire mais n'empêche que ces résistances restent comparables avec ceux présentés par Shao-Dong [4] (1994) en utilisant comme activateur l'hydroxyde de sodium et le sulfate de sodium. Le tableau 6 illustre les résultats obtenus avec ceux du laitier britannique [4] où le KOH paraît être le meilleur activateur donnant des résistances de même ordre.

D'autres part, ces résultats confirment que le laitier acide ( $\text{CaO}/\text{SiO}_2 = 1.1$ ) est moins sensible à l'activation chimique. Ceci peut justifier probablement les faibles résistances obtenues avec le laitier d'El-Hadjar. Cependant, on pense qu'il est possible d'améliorer ces résistances par une excitation thermique au jeune âge ou en utilisant un laitier finement broyé.

### Conclusion

Cette étude expérimentale a permis de constater que le laitier d'El-Hadjar est sensible aux solutions alcalines, ce qui a déclenché son activité hydraulique et a développé les résistances mécaniques. On s'aperçoit qu'avec des bases fortes de molarité élevée, on n'obtient que 66% de la résistance d'un mortier au clinker. Par ailleurs, l'emploi de petites quantités d'ajouts ne semble pas tellement améliorer les résultats. Ces résultats peuvent constituer une base de données pour d'autres recherches ayant le même objectif. On pense que l'effet conjugué de l'activation chimique et thermique peut avoir des conséquences meilleures sur ces résultats trouvés.

**Tableau-1** Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques du laitier d'El-Hadjar

| COMPOSITION CHIMIQUE                |                                |                                                |       |                                 |                  |                  |                 |      |
|-------------------------------------|--------------------------------|------------------------------------------------|-------|---------------------------------|------------------|------------------|-----------------|------|
| SiO <sub>2</sub>                    | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>                 | CaO   | MgO                             | N <sub>2</sub> O | K <sub>2</sub> O | SO <sub>3</sub> | PAF  |
| 42.20                               | 5.85                           | 1.90                                           | 42.20 | 4.72                            | 0.12             | 0.43             | 1.54            | 0.80 |
| CARACTÉRISTIQUES PHYSICO-MÉCANIQUES |                                |                                                |       |                                 |                  |                  |                 |      |
| Densité apparente                   | Densité Spécifique             | Surface Spécifique (poudre) cm <sup>2</sup> /g |       | Résistance Mécanique (granulat) |                  |                  |                 |      |
| 0.80                                | 2.87                           | 2512, 3627, 4236                               |       | 45 Kg/m <sup>2</sup>            |                  |                  |                 |      |

**Tableau-2** Caractéristiques physico-chimiques du clinker de Oued Sly

| COMPOSITION CHIMIQUE  |                                |                                |      |      |                             |           |             |      |
|-----------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|------|-----------------------------|-----------|-------------|------|
| 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>             | insoluble | Chaux libre | PAF  |
| 20.58                 | 4.90                           | 4.70                           | 62.8 | 0.53 | 2.28                        | 0.42      | 2.17        | 1.00 |
| COMPOSITION PHYSIQUES |                                |                                |      |      |                             |           |             |      |
| Densité               |                                |                                |      |      | Surface Spécifique (poudre) |           |             |      |
| 3.14                  |                                |                                |      |      | 3100 cm <sup>2</sup> /g     |           |             |      |

**Tableau-3** Effet du type d'activateur sur le mortier de laitier

| Temps en jours | Résistance à la traction en MPa |      |      | Résistance à la compression en MPa |       |       |
|----------------|---------------------------------|------|------|------------------------------------|-------|-------|
|                | Mortier témoin                  | NaOH | KOH  | Mortier témoin                     | NaOH  | KOH   |
| 1              | 2.58                            | /    | 0.9  | 7.70                               | 1.38  | 2.53  |
| 3              | 4.34                            | 2.32 | 3.61 | 15.16                              | 6.02  | 7.94  |
| 7              | 5.59                            | 4.07 | 5.07 | 22.44                              | 9.14  | 11.67 |
| 28             | 6.46                            | 4.65 | 5.16 | 30.31                              | 13.5  | 18.25 |
| 90             | 7.89                            | 4.15 | 4.96 | 34.06                              | 19.94 | 22.5  |

**Tableau-4** Effet du dosage de l'activateur sur les résistances

| Temps en jours | Traction |      |      | Compression |       |       |
|----------------|----------|------|------|-------------|-------|-------|
|                | 2 M      | 3 M  | 4 M  | 2 M         | 3 M   | 4 M   |
| 1              | /        | /    | 0.9  | 0.5         | 1.05  | 2.53  |
| 3              | 2.75     | 3.15 | 3.61 | 5.52        | 7.67  | 7.94  |
| 7              | 4.65     | 4.81 | 5.07 | 10.78       | 11.89 | 11.67 |
| 28             | 5.44     | 6.01 | 5.16 | 15.56       | 18.94 | 18.25 |
| 90             | 4.77     | 4.95 | 4.96 | 19.78       | 23.16 | 22.5  |

**Tableau-5** Effet des ajouts sur l'activation

| Temps en jours | Résistance à la traction en MPa |            |          | Résistance à la compression en MPa |            |          |
|----------------|---------------------------------|------------|----------|------------------------------------|------------|----------|
|                | Sans ajout                      | 5% clinker | 5% chaux | Sans ajout                         | 5% clinker | 5% chaux |
| 1              | /                               | /          | /        | 1.38                               | 1.40       | 1.31     |
| 3              | 2.32                            | 2.29       | 2.12     | 6.02                               | 5.03       | 6.05     |
| 7              | 4.07                            | 3.92       | 4.14     | 9.14                               | 7.67       | 8.28     |
| 28             | 4.65                            | 4.27       | 4.72     | 13.5                               | 11.13      | 12.45    |
| 90             | 4.15                            | 4.25       | 4.59     | 19.94                              | 15.28      | 17.22    |

Activateur utilisé NaOH de molarité 4

**Tableau-6** Confrontation des résultats de résistance à la compression

| Temps en jours | Laitier d'El-Hadjar |          | Laitier britannique                  |           |
|----------------|---------------------|----------|--------------------------------------|-----------|
|                | NaOH (4M)           | KOH (4M) | Na <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (2M) | NaOH (4M) |
| 1              | 1.38                | 2.53     | 1.2                                  | 5.2       |
| 3              | 6.02                | 7.94     | 5.1                                  | 12.9      |
| 7              | 9.14                | 11.67    | 10.2                                 | 17.1      |
| 28             | 13.5                | 18.25    | 20                                   | 22.9      |

**Figure-1** Courbes granulométriques des sables utilisés

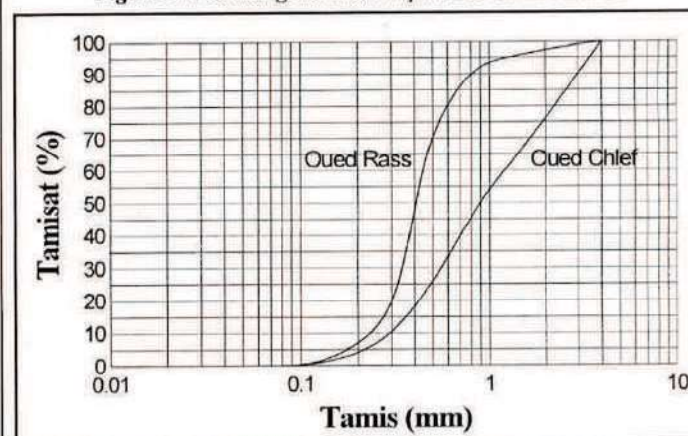


Figure-2 Résistances à la traction du laitier activé par différents types d'activateurs

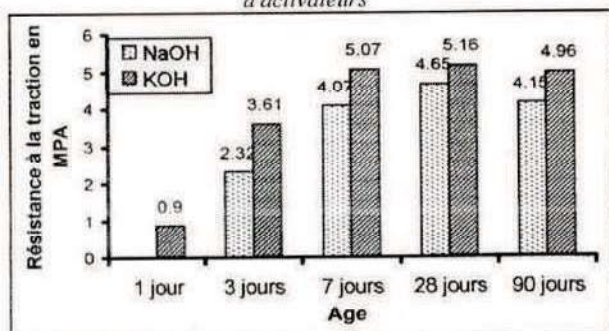


Figure-3 Résistances à la compression du laitier activé par différents types d'activateurs

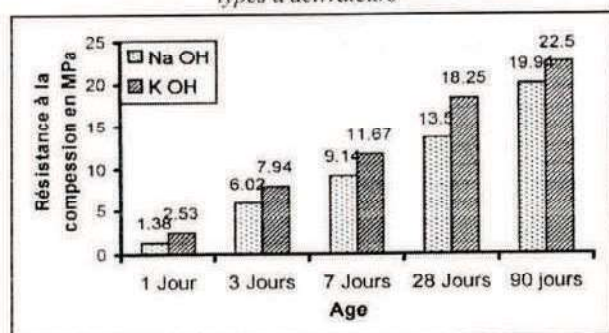


Figure-4 Effet de la concentration molaire sur les résistances à la traction

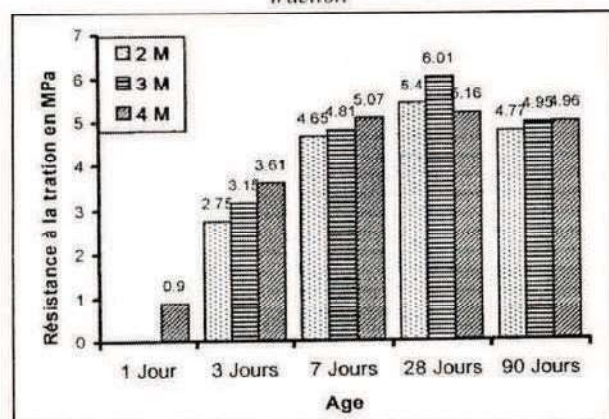
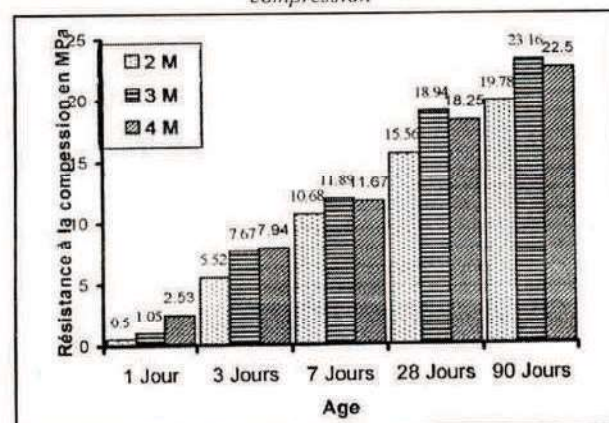


Figure-5 Effet de la concentration molaire sur les résistances à la compression



## Bibliographie

[1] DOUGLAS E, BRANDSTER J. A Preliminary study on the alkali activation of ground granulated blast furnace slag, cement, [Une étude préliminaire sur l'alkali-activation du ciment au laitier granulé de haut fourneau] Cement, Concrete and Research, Vol 20, 1990, pp 746-756.

[2] WANG S D, KAREN L. Hydration Products of Alkali Activated Slag Cement, [Produits d'hydratation des ciments au laitier activé par des alcalins] Cement, Concrete and Research, Vol 25, N°3, 1995, pp 561-571.

[3] SWAMY R N, BOUIKNIA. Some Engineering Properties of Slag Concrete as influenced by Proportioning and Curing, [Quelques propriétés mécaniques du béton au laitier influencé par le taux de substitution et la cure], ACI Materials Journal, V 87, N° 3, Mai Juin 1990

[4] WANG S D, KAREN L. Factors Affecting the Strength of Alkali Activated Slag [Les facteurs affectant la résistance des ciments au laitier activé par les alcalins], Cement, Concrete and Research, Vol 24, N°6, 1994, pp 1033-1043.