
Influence de la granulométrie de laitier granulé de haut fourneau sur les caractéristiques des briques autoclavées.

Asma Sellami^{1*}, NourredineArabi¹

¹Laboratoire de Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, BP 12 Annaba 23000, Algérie

* asmaselami51@yahoo.fr

RESUME. Ce travail concerne l'influence de la granulométrie du laitier granulé sur les comportements physique et mécanique des briques traitées en autoclave. Il consiste à substituer la partie sable généralement utilisée par du laitier granulé de haut fourneau. Une variation des fractions granulaires de ce laitier a été entreprise. Les briques sont traitées par deux pressions de vapeur saturante 10 et 15 bars et la durée de traitement est de 10 heures (2h de montée de température, 6h de maintien et 2h de refroidissement ventilé). Les caractéristiques étudiées sont l'absorption d'eau et les résistances en traction par fendage et la compression. La granularité du laitier est mise en évidence, les compositions de la charge à fortes proportions en éléments fins sont meilleures en performances mécaniques. Les résultats obtenus montrent qu'avec l'augmentation de la température, la résistance en compression augmente. L'utilisation du laitier sans aucune modification granulaire n'a pas abouti aux résultats escomptés tant en comportement mécanique ainsi que pour la tenue à l'eau.

ABSTRACT. This work considers the influence of the particle size analysis of slag on the physical and mechanical behaviors of bricks treated in autoclave. It aims to replace the sand part generally used by granulated blast furnace slag. A variation of granular fractions of slag was undertaken. The samples cured at the saturated vapor pressures of 10 and 15 bars during 10 hours of time treatment in autoclave (2 hours of progressively rising temperatures followed by 6 hours conservation at constant temperature then 2 hours of cooling by ventilation). The characteristics studied are: water absorption and the strengths for tensile and compressive. The particle size of slag is highlighted; the mixtures of composition in highly fine elements insure the better mechanical performances. The results show the increase of compressive strength when the increase of saturated vapor pressure. Use of granular slag without any change to granularity has not produced the desired results in mechanical behavior and for water resistance.

MOTS-CLES : laitier granulé, traitement thermique, granulométrie, résistance mécanique.

KEYWORDS: granulated slag, heat treatment, grain size, mechanical strength.

1. Introduction

L'utilisation des matériaux très peu coûteux et disponibles en grande quantité, fabriqués par des procédés simples à partir de matières locales constitue un objectif permettant de multiplier et de développer des constructions à moindre coût. La fabrication de brique silico-calcaire à partir du laitier granulé remplaçant la partie sable apparaît comme une alternative intéressante à prospecter. Initialement fabriqué à partir de chaux et de sable, ce produit a fait ses preuves dans certains pays dans une proportion presque égale à la brique rouge de terre cuite (Siddique, 2008). Par ailleurs, le laitier de haut fourneau produit par l'entreprise ArcelorMittal d'el Hadjar estimée en moyenne à 300 000 tonnes/an, ne trouve que très peu de circuits d'utilisation. Ces déchets industriels au pouvoir hydratant peuvent se substituer au sable comme charge pour fabriquer des briques de laitier avec des caractéristiques mécaniques acceptables tout en utilisant des procédés simples et un personnel peu qualifié, ce qui aura certainement pour conséquence le développement des matériaux de constructions à des prix modérés.

La technique d'étuvage par autoclavage à la vapeur saturante permet d'obtenir en une dizaine d'heures par réaction hydrothermale d'un mélange chaux-sable des matériaux aux caractéristiques durables et un emploi immédiat (Aitken *et al.*, 1960). En conditions ambiantes, la cinétique est nettement plus faible et le durcissement sera obtenu après plusieurs mois. A des températures de 170 à 200° C et à pression de vapeur saturante, le quartz finement broyé qui était insoluble à température ambiante, devient chimiquement plus actif et réagit avec la chaux éteinte " Ca(OH)_2 " donnant ainsi des hydrosilicates de calcium solides et résistants, insolubles dans l'eau (Al wakeel *et al.*, 1999). Elles sont souvent regroupées sous l'appellation tobermorites. Les plus connues sont les tobermorites à 11Å, les plus stables et se forment à des rapports Ca/Si de 0,8 à 1 (Taylor, 1997).

Par sa composition chimique voisine de celle du ciment, le laitier granulé de haut fourneau peut constituer une alternative à la chaux. La méthode de refroidissement rapide lui confère une structure vitreuse métastable, il a la faculté de réagir avec la chaux dans des conditions spécifiques (Van Rompaey, 2006). Le laitier granulé possède des propriétés hydrauliques latentes qui dépendent des compositions chimiques des matières introduites dans le haut fourneau (Bouggara *et al.*, 2009., Behim *et al.*, 2002). Il nécessite néanmoins pour initier la phase d'hydratation une activation chimique, soit en activation calcique, sulfatique ou alcaline (Gruskovnjak *et al.*, 2008). Outre cela, le laitier peut aussi devenir réactif par activation mécanique (broyage plus poussé) ou thermique (étuvage ou autoclavage) (Kumar *et al.*, 2008).

Dans cette étude, sont exposés les résultats de la substitution de la partie sable par le laitier granulé à différentes fractions granulaires. Les échantillons sont étuvés par autoclavage à la vapeur saturante en utilisant des pressions de vapeur 10 et 15 bars.

2. Programme expérimental

2.1 Matériaux utilisés

L'objectif de cette étude, est de remplacer la charge composée habituellement de sable par le laitier granulé. La composition des mélanges de briques de laitier est constituée : 20% de chaux éteinte et 80% de charge (composant siliceux), et humidifiée par l'eau à 10% de la masse sèche. Cette composition a été déterminée dans une précédente étude (Arabi, 1988).

2.1.1 La chaux éteinte

La chaux éteinte sous forme de poudre est commercialisée par l'entreprise SARLBSMD de Saïda (Algérie). Les principales propriétés physiques de cette chaux sont données au tableau 1.

Tableau 1. *Caractéristiques physiques de la chaux éteinte utilisée*

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2552
Masse volumique apparente (kg/m ³)	434
Passant au tamis 0,2mm (%)	100
Refus sur le tamis 0,08 mm (%)	9

2.1.2 Le sable

Le sable utilisé est un sable roulé (sable de mer) de la région d'Annaba, il a été prélevé avec un taux d'humidité de (7%). Pour certaines configurations de mélanges le sable a été séché et broyé. Les différentes caractéristiques physiques effectuées selon la norme afnor¹ sont exposés au tableau 2.

¹Association française de normalisation

Tableau 2. *Caractéristiques physiques du sable*

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2630
Masse volumique apparente (kg/m ³)	1413
Equivalent de sable (%)	82
Refus sur le tamis 0,08 (%)	10,6

2.1.3 le laitier granulé

Le laitier granulé a été pris d'une fraîche production de l'usine ArcelorMittal d'el Hadjar (Annaba ; Algérie), il a été prélevé avec un fort taux d'humidité (à peu près 25%). Pour apprécier le pouvoir d'activité du laitier granulé du point de vue finesse, il a été broyé jusqu'à une surface spécifique permettant de donner sur le tamis 80 µm un refus au plus égal à 15%. Les caractéristiques physiques et la composition chimique du laitier sont représentées aux tableaux 3 et 4. Le module de finesse du laitier granulé a été calculé à partir de la distribution granulométrique présentée par la figure 1.

Tableau 3. *Caractéristiques physiques du laitier granulé utilisé*

Caractéristiques	Valeurs
Masse volumique absolue (kg/m ³)	2118
Masse volumique apparente (kg/m ³)	811
Module de finesse de laitier granulé	2,6
Finesse du laitier broyé (refus sur le tamis 80 µm), %	9

Tableau 4. *Composition chimique du laitier granulé utilisé*

SiO ₂	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	S
39,11	39,26	1,08	5,64	8,76	1,64	0,71



Figure 1. *Analyse granulométrique du laitier granulé*

2.2 Confection des éprouvettes et formulation des mélanges

Des éprouvettes cylindriques de dimensions ($\varnothing 50 \times 100$) mm sont conçues pour la caractérisation des briques de laitier. La composition de base des mélanges prise dans ce travail est : 20% chaux, 80% de charge (sable), 10% eau. Dans le but d'obtenir les meilleures caractéristiques du produit fini, différentes compositions ont été testées sur la base d'une variation de la fraction granulaire de la charge. Les compositions des mélanges sont représentées par le tableau 5. Le moulage des éprouvettes est fait par pressage : pression de compactage égale à 20 MPA et le démoulage par extrusion. L'étuvage des échantillons est fait par un traitement à la vapeur saturante dans une autoclave pour deux pressions de vapeur saturante 10 et 15 bars à des températures de 173 et 195° C respectivement avec un cycle de traitement pendant 10 heures (2 heures de montée de température suivie de 6 heures de maintien à température constante et ensuite 2 heures de refroidissement ventilé).

Tableau 5. Configuration des mélanges étudiés

Mélanges	Chaux éteinte (%)	Composition de la charge (80%)
1	20	100 % de sable broyé
2	20	100 % de laitier broyé
3	20	100 % de laitier brut (0/5)
4	20	50 % de laitier broyé 50% de laitier brut (0/5)
5	20	50 % de laitier broyé 30% de laitier (0,08/0,315) 20 % de laitier (0,315/1,25)
6	20	50 % de laitier broyé 20% de laitier (0,08/0,315) 30% de laitier (0,315/1,25)

3. Résultats et discussions

Il est plus connu que la variation de la masse volumique des briques de laitier est influencée par la capacité de compactage (façonnage) et de la granulométrie de ces composants. Dans le cas de notre étude, la variation de cette propriété dépendra beaucoup plus de la distribution granulométrique de la charge (le composant siliceux).

La figure 2 illustre la variation des masses volumiques à l'état cru et durci en fonction de la composition de la charge. Il en ressort de cette illustration que la masse volumique est influencée par la distribution granulaire de la charge, et la composition qui assure la meilleure compacité est celle qui présente le moins de porosité.

L'ordre de supériorité entre mélanges à l'état cru est respecté à l'état durci. Cependant, on constate une diminution de la masse volumique des briques après traitement thermique pour toutes les compositions, mais le niveau de diminution varie d'une composition à l'autre. Ceci est du probablement à l'effet d'un séchage des échantillons à l'intérieur de l'autoclave pendant l'étape de refroidissement. La plus forte baisse est enregistrée pour la composition 3 d'une valeur de 9,8%.

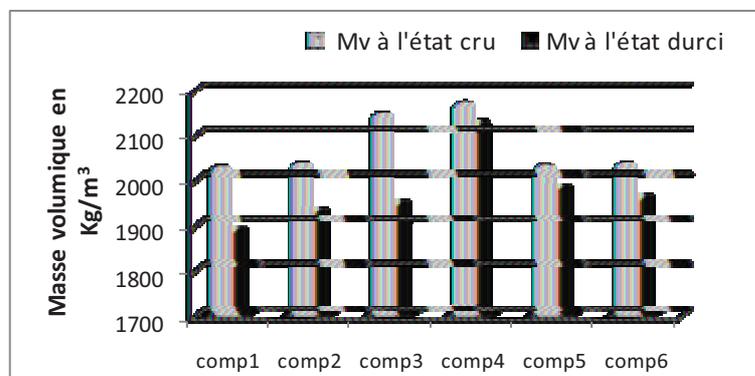


Figure 2. Variation de la masse volumique aux états cru et durci en fonction de la composition de la charge

Cette diminution est peut être due à un séchage plus important ou une évaporation importante d'eau non cristallisée (l'eau excédentaire qui n'a pas réagi avec les composants du laitier). Pour la composition 3 (100% laitier brut), il semble que très peu de constituants du laitier réagissent avec l'eau, ce qui donnera plus d'eau qu'il ne faut, puisque la teneur en eau est constante pour toutes les compositions.

La figure 3 illustre les résistances à la compression pour les échantillons traités dans l'autoclave à des pressions de vapeur saturante de 10 et 15 bars. Cette représentation montre l'effet de l'augmentation de la température sur la cinétique d'évolution de la résistance en compression. Une amélioration de celle-ci se dégage même si elle n'est pas assez importante, le même ordre de supériorité entre mélanges obtenus à pression de 10 bars est presque conservé pour la pression à 15 bars, mis à part la composition 5 et ceci peut être dû à la dispersion des résultats. L'effet notable qui se distingue pour la pression d'autoclavage de 15 bars, est que la composition 1 constituée de sable broyé enregistre la meilleure augmentation par rapport à la pression de 10 bars. Cette amélioration s'évalue à 40% et ceci peut être attribué à la diminution de la concentration de la teneur en Ca(OH)_2 d'une part et l'augmentation de la solubilité du SiO_2 d'autre part. Ces conditions favorisent probablement la formation des hydrosilicates de calcium (CSH) faiblement basiques assurant les meilleures résistances mécaniques. Pour le cas des compositions en laitier granulé, l'amélioration n'est pas aussi nette que celle enregistrée avec le sable broyé. L'augmentation de la température entraîne l'amélioration de la solubilité du laitier qui réagit avec d'autres composants et favorise ainsi la formation d'autres variétés d'hydrosilicates de calcium. Ces derniers ne peuvent se former à la température assurée par la pression de vapeur de 10 bars.

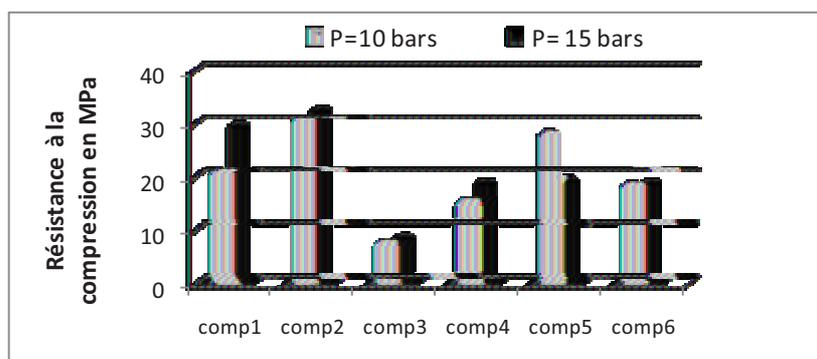


Figure 3. Résistance en compression en fonction de la pression d'autoclavage

La figure 4 présente les résultats des résistances en traction par fendage des échantillons obtenus à 10 et 15 bars de pression d'autoclavage. Ces résultats sont dans la même grandeur que les résistances obtenues avec le béton. Ils ne diffèrent pas trop de ceux obtenus en compression selon la configuration.

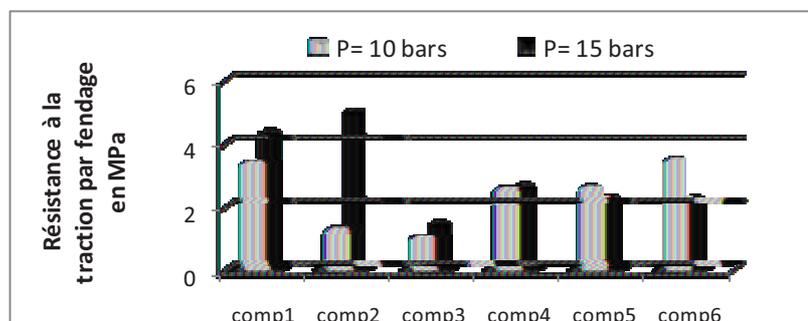


Figure 4. Résistance à la traction par fendage en fonction de la pression d'autoclavage.

La figure 5 relative à l'absorption d'eau des différentes compositions des briques obtenues aux pressions de 10 et 15 bars, montre qu'il n'existe pas de relation directe entre l'absorption et la pression d'autoclavage. Le seul fait notable est que la composition 3 présente un seuil d'absorption trop élevé et ceci est constaté pour les deux pressions d'autoclavage. Ce constat laisse penser qu'il n'existera pas une

probable accommodation de cette variante de composition en présence permanente d'eau surtout que les briques de laitier peuvent servir de matériaux de façade donc exposées aux eaux de pluie.

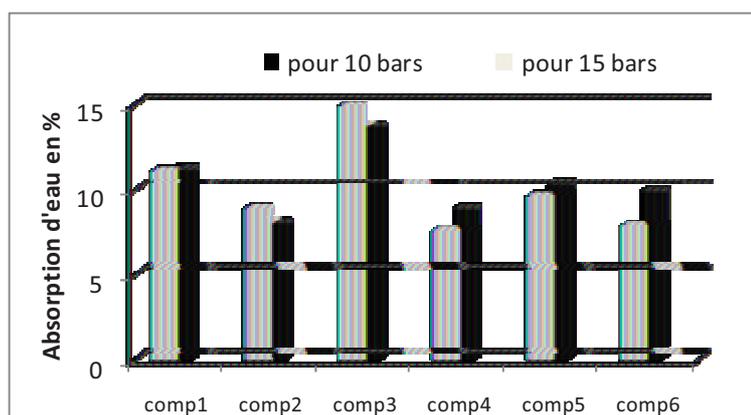


Figure 5. La capacité d'absorption d'eau des matériaux obtenus aux pressions d'autoclavage 10 et 15 bars en fonction du type de composition.

4. Conclusions

Cette étude contribuera à valoriser les matières premières disponibles localement en abondance (chaux, laitier, etc.). Elle contribuera aussi à substituer les sables (matériaux alluvionnaires) qui sont devenus matériaux interdits à l'utilisation pour la préservation des ressources naturelles. Cette substitution permet de trouver des issues à un sous-produit des hauts fourneaux en abondance, qui est le laitier.

L'utilisation du laitier granulé à la place du sable pour la fabrication des briques de laitier est mise en évidence, les résultats obtenus avec le laitier granulé en tant que charge sont très satisfaisants pour un matériau qui servira de matériaux de remplissage (maçonnerie).

Le process par traitement accéléré à la vapeur confère au matériau des qualités qui permettent un emploi dans la construction aussitôt sorti des autoclaves.

La variation de la granulométrie du laitier granulé améliore la résistance à l'état cru. Celle-ci est indispensable lors de la manutention et réduira le volume de rebus.

L'influence de la pression d'autoclavage est mise en évidence, une évolution assez intéressante de la résistance à la compression principalement pour le laitier de

Influence de la granulométrie de laitier d'HF sur les caractéristiques des briques

granulométrie fine. Les conditions hydrothermiques contribuent à accroître la solubilité des matières initialement inertes.

5. Références

- AitkenA., TaylorH.F.W., «Hydrothermal reactions in lime-quartz pastes », *J. Appl. Chem.* 10 (1960) 7-15
- Al-WakeelE.I., El-KorashyS.A., El-HemalyS.A., UossefN.,« Promotion effect of C-S-H-phase nuclei on building calcium silicate hydrate phases », *Cem. Concr. Comp.* 21 (1999),173-180
- ArabiN., Etude des briques silico-calcaires à base de laitier granulé, Mémoire de magister, Université d'Annaba, Algérie, 1988.
- BehimM., RedjelB., JauberthieR., «Réactivité du laitier de haut fourneau d'Annaba en substitution partielle du ciment», *Journal de Physiques IV*, 12 (2002) 223-228
- BougaraA., LynsdaleC.,EzzianeK., «Activation of Algerian slag in mortars», *Const. Buil. Mat.* 23 (2009) 542–547
- GruskovnjakA., LothenbachB.,WinnefeldF.,FigiR.,KoS.C., AdlerM., MäderU., «Hydration mechanisms of super sulphated slag cement», *Cem. Concr. Res.* 38 (2008) 983– 992
- KumarS., KumarR., BandopadhyayA., AlexT. C., Ravi KumarB., DasS. K.,MehrotraS.P.,« Mechanical activation of granulated blast furnace slag and its effect on the properties and structure of portland slag cement », *Cem. Concr. Comp.* 30(8)(2008) 679-685.
- SiddiqueR., *Waste materials and by-products in concrete*, Springer Press, (2008), p.427
- TaylorH.W.F., *The Chemistry of Cement*, Thomas Telford, London, 1997
- Van RompaeyG., Etude de la réactivité des ciments riches en laitier, à basse température et à temps court, sans ajout chloruré. Thèse de Doctorat, Université Libre de Bruxelles,(2006) 462p.