

VERS L'ÉLABORATION D'UN NOUVEAU CIMENT COMPOSÉ À BASE DE DÉCHETS DE BRIQUES

G. NIGRI¹, Y. CHERAIT², H. BENOUIS²

¹LGCH, Université 08 Mai 45, BP401 Guelma, Algérie e-mail : ghania_nigri@yahoo.fr

²LGCH, Faculté des Sciences et de l'Ingénierie, Université 08 Mai 45, BP401 Guelma, Algérie, e-mail : yacheraït@yahoo.fr

Résumé : La tendance actuelle dans le monde est la recherche de matériaux à moindres coûts. Ainsi, l'utilisation de sous produits de l'industrie lourde et des déchets industriels a contribué à la fabrication de divers liants hydrauliques à faible coût. C'est dans ce contexte que s'inscrit cette étude. Elle cherche à élaborer un nouveau ciment composé à base de déchets de briques. Des résultats préliminaires montrent que l'incorporation de 5 à 15 % de déchets de briques dans un broyeur à haute énergie, permet une amélioration des principales caractéristiques physiques (retrait, densités, expansion à chaud, etc.) du nouveau liant, avec des propriétés mécaniques comparables aux ciments portlands composés de classe de résistance normale de 42,5 MPa.

Mots - clés : Ciment composé – Clinker - Déchets de briques - Analyse chimique - Propriétés mécaniques.

1- Introduction

La nécessité de trouver de nouveaux liants toujours moins chers a conduit les industriels à produire divers ciments contenant, outre le clinker, des ajouts secondaires avec des proportions plus ou moins importantes. En Algérie, ce sont principalement les laitiers de hauts fourneaux et les pouzzolanes qui sont utilisés comme ajout aux ciments. D'autres matériaux locaux peuvent être également utilisés et valorisés. Et c'est dans ce contexte que s'inscrit notre étude. Elle vise à élaborer un nouveau ciment composé à base de déchets de briques et ayant une classe de résistance de 42,5 MPa. Ces sous produits de l'industrie des produits rouges se trouvent relativement en abondance en Algérie Ref. [1] et restent peu utilisés ou recyclés jusqu'à présent. Pour la fabrication du nouveau liant, la démarche adoptée consiste dans un premier temps à caractériser les matières premières utilisées et dans une seconde étape, on cherchera à évaluer, à partir d'un protocole expérimental détaillé, les différentes performances chimiques, physiques et mécaniques du nouveau liant. Pour être validées, ces performances doivent impérativement répondre aux exigences imposées par les normes en vigueur en Algérie, et plus particulièrement la norme NA 442 Ref. [2] qui impose des limites de compositions destinées à garantir une cuisson convenable du clinker et l'obtention d'un produit sain.

2- Préparation et caractérisation des matières premières

2.1- Le clinker

Les matières premières utilisées pour la préparation du clinker sont issues essentiellement de l'est algérien. Ainsi, le calcaire utilisé est extrait de la carrière de Djebel Safia (Wilaya de Skikda), l'argile de l'Oued El-Kebir (Wilaya de Skikda), les deux adjuvants correcteurs sont issus de la carrière de Kef Fatma (Wilaya de Skikda) pour le sable, et de la région d'El Ouenza (Wilaya de Tébessa) pour le minerai de fer. Les compositions chimiques des matières premières utilisées, déterminées par fluorescence X, sont regroupées dans le tableau 1.

Tableau 1: Analyse chimique des matières premières utilisées

Eléments	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂	K ₂ O	SO ₃	P.A.F*
Calcaire (%)	55,0	0,22	0,13	1,0	0,79	0,04	0,06	0,015	42,70
Argile (%)	0,66	13,80	6,87	56,84	1,66	0,66	2,44	0,48	9,53
Sable (%)	3,47	1,15	0,70	92,43	0,30	0,09	0,30	0,30	0,47
Minerai de fer (%)	1,35	11,74	53,0	25,43	0,41	0,08	0,82	0,11	6,55

*P.A.F : Perte au feu.

2.1.1- Caractéristiques du clinker obtenu

Le clinker a été fabriqué au niveau de la cimenterie de Hadjar Soud (Wilaya de Skikda) par la technique de la voie sèche. Il est composé de 78,5% de calcaire, 17% d'argile, 3,3% de sable et 1,2% de minerai de fer. Sa composition en oxydes est donnée dans le tableau 2.

Tableau 2: Composition chimique du clinker fabriqué

oxydes	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO libre
(%)	66,81	5,82	2,92	21,56	0,62	0,28	0,68	0,18	1

Une fois élaboré, nous avons cherché à déterminer la composition minéralogique potentielle du clinker. Nous avons ainsi utilisé les formules de BOGUE réactualisées Ref. [3] qui permettent de calculer avec une bonne approximation, les proportions théoriques des différents composés minéralogiques d'un clinker à partir de sa composition en oxydes. Ces formules sont exprimées par les quatre formules suivantes :

$$C_3S = 4,07C^* - 7,60S^* - 6,72A - 1,43F \quad (1)$$

$$C_2S = 8,60S^* + 1,08F + 5,07A - 3,07C^* \quad (2)$$

$$C_3A = 2,65A - 1,69F \quad (3)$$

$$C_4AF = 3,04F \quad (4)$$

Avec : $A = Al_2O_3$, $F = Fe_2O_3$,

$S^* = SiO_2(\text{totale}) - SiO_2(\text{non combinée})$

$C^* = CaO(\text{totale}) - CaO(\text{libre}) - 0,7SO_3 - 1,27CO_2$

On aboutit ainsi à la composition minéralogique, suivante:

Tableau 3: Composition minéralogique du clinker

C_3S	C_2S	C_3A	C_4AF
60	16	10	9

Ainsi les quatre phases minérales à savoir les silicates tricalciques, les silicates dicalciques, les aluminates tricalciques et les aluminoferrites tétracalciques représentent environ 95 % de la masse du clinker. Par ailleurs les deux phases silicatées (C_3S , C_2S), qui assurent les propriétés liantes du ciment, sont présentes dans une proportion de 76 %, valeur supérieure au seuil minimal préconisé par la norme NA 233 Ref. [4] qui est de 66 %.

2.2- Déchets de briques

Les déchets de briques sont des sous-produits de l'industrie des produits rouges. Ils se trouvent en grande quantité au niveau national à cause du nombre élevé de briqueteries et des taux de rejets (briques non conformes ou cassées) qu'elles génèrent et qui représentent 10 à 15 % de leurs productions Ref. [1]. Par ailleurs des études entreprises par S.WILD Ref. [5] ont montrée un caractère pouzzolanique de ces déchets, raison pour laquelle nous avons décidé de substituer une partie du clinker par ce sous produit. Nous avons utilisé dans cette recherche des échantillons récupérés auprès de la briqueterie de Bendjerah (Wilaya de Guelma). Une fois réceptionnés, les déchets ont fait l'objet d'un broyage pour les transformer en poudre fine.

Leur composition minéralogique a été déterminée par fluorescence X sur poudre. Les résultats obtenus, présentés en tableau 4, mettent en évidence des pourcentages élevés en silice et en alumine.

Tableau 4: Composition chimique des déchets de briques utilisés

Elément	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	SiO_2	MgO	Na_2O	K_2O	SO_3	P.A.F
(%)	4,28	14,17	6,30	69,26	2,25	0,28	1,34	0,02	1,96

D'autres propriétés de l'ajout ont été également évaluées. Ainsi sa masse volumique absolue est de $2,25 \text{ g/cm}^3$; sa masse volumique apparente est de $0,71 \text{ g/cm}^3$; et enfin son coefficient d'absorption d'eau est égal à 16,1 %.

2.3- Préparation des ciments

La préparation du nouveau ciment est effectuée par un broyage séparé du clinker, des déchets de briques et du gypse. Après dosage et homogénéisation, nous avons élaboré sept échantillons de ciments composés en faisant varier la proportion des déchets de briques de 5 à 35 %, toute en conservant parallèlement le dosage en gypse à 5 %.

3- Essais de caractérisation des ciments

Une fois élaboré, les mélanges ont fait l'objet de caractérisations chimiques, physiques et mécaniques conformément aux normes Algériennes (NA).

3.1- Caractérisation chimique

La détermination des constituants chimiques des ciments a été faite par fluorescence X. Les résultats de cette analyse sont reportés dans le tableau 5.

Tableau 5: Compositions chimiques élémentaires des ciments élaborés

% de briques	CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	CaO _{libre}	P.A.F
0	61,92	5,40	3,85	20,17	1,63	0,10	0,68	2,30	2	3,02
5	58,49	5,71	3,80	21,51	1,42	0,13	0,65	2,20	2	2,87
10	56,14	4,99	3,43	25,52	1,39	0,17	0,75	2,20	2	3,28
15	53,30	4,90	3,50	28,96	1,28	0,20	0,78	2,10	1,80	2,91
20	49,26	5,35	3,46	32,64	1,12	0,21	0,82	2	1,10	3,06
25	46,84	4,63	3,57	36,24	1,05	0,22	0,86	2	1	3,08
30	43,12	4,46	3,36	40,26	0,70	0,23	0,92	2	1,50	2,70
35	40,65	4,28	3,40	43,02	0,63	0,20	0,97	2,10	1,50	3,02

Comme il fallait s'y attendre, on constate que l'augmentation du pourcentage en déchets de briques induit une croissance de la teneur en silice, et une décroissance de la teneur en oxyde de calcium. Réglementairement, la norme NA 442 Ref. [2], stipule que le rapport entre les taux en CaO et en SiO₂ doit vérifier l'inégalité (5) :

$$\left(\frac{CaO}{SiO_2} \right) > 2$$

(5)

Cette condition est vérifiée jusqu'à une teneur en déchets de briques de 10 %. Au-delà de cette limite, le rapport baisse pour atteindre une valeur de 0,94 pour une teneur en ajout de 35 %. La même norme limite par ailleurs la teneur en oxyde de magnésium à 5% : cette condition est vérifiée pour l'ensemble des ciments élaborés. Enfin, les pertes au feu (P.A.F) varient toutes entre 2,7 et 3,28 %, et sont donc inférieures au seuil limite réglementaire Ref. [6] qui est de 5 %

3.2- Caractérisation physique

3.2.1- Masses volumiques apparente et absolue

Les mesures expérimentales des masses volumiques apparentes et absolues des ciments élaborés sont reportées dans le tableau suivant.

Tableau 6: Masses volumiques apparentes et absolues (en kg/m³) des ciments élaborés

% d'ajout	0	5	10	15	20	25	30	35
Y apparente	976	937	930	931	925	902	880	846
Y absolue	3240	3160	3040	3040	2980	2970	2950	2920

On remarque une diminution quasi-linéaire des masses volumiques des ciments en fonction de la teneur en briques. Les baisses constatées, variant entre 5 et 13 %, s'expliquent aisément par le fait que la masse volumique de l'ajout, à savoir les déchets de briques, est nettement plus faible que celle du clinker.

3.2.2- Consistance

La consistance normalisée d'une pâte de ciment caractérise sa plus au moins grande fluidité. Elle est nécessaire pour déterminer les temps de début et fin de prise ainsi que l'essai de stabilité.

La variation de la consistance normale, déduite conformément à la norme NA 229 Ref. [7] est illustrée par les valeurs du tableau 7.

Tableau 7: Consistance normale des ciments

% d'ajout	0	5	10	15	20	25	30	35
Consistance	25	25,8	25,6	25,4	25,6	25,2	25,2	25,8

On remarque une très faible variation de la consistance. On peut donc conclure le peu d'influence de l'ajout de briques sur la consistance normale des ciments fabriqués.

3.2.3- Prise

Le temps de prise, mesuré à 20°C, a été pratiqué sur une pâte de ciment normale conformément à la norme NA 230. Dans son principe, le temps de début de prise correspond à peu près au moment où la pâte cesse d'être moulable et commence à se comporter comme un solide mécaniquement résistant Ref. [8]. La fin de prise correspond à la transformation régulière et progressive de la pâte de ciment en un bloc rigide. Les résultats de cette série d'essais sont illustrés sur l'histogramme de la figure 1.

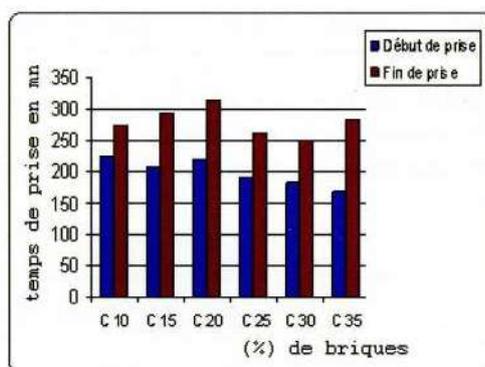


Figure 1: Histogramme des temps de prise des ciments élaborés

On peut remarquer à la lecture de l'histogramme de la Figure 1 que le temps du début de prise est de l'ordre de 3 heures pour les différents ciments élaborés. Rappelons que la norme NA 442 Ref. [2] impose un temps de prise minimal de 60 minutes pour la classe 42,5. Enfin, le temps de fin de prise varie quant à lui entre 4 et 5 heures et 15 mn. Ainsi les temps de début et fin de prises mesurés sont équivalents aux temps des ciments portlands courants.

3.2.4- Stabilité

Les essais d'expansion, à froid ou à chaud, ont pour but de déterminer la stabilité aux expansifs des liants hydrauliques. Ils sont effectués sur mortier normal : le mortier est coulé dans un moule cylindrique formé par une feuille de laiton enroulée et fendue suivant une génératrice. L'expansion de l'éprouvette provoque l'ouverture de la fente : deux aiguilles soudées à la feuille de laiton amplifient l'ouverture, et permettent une mesure commode de l'expansion (Figure 2).

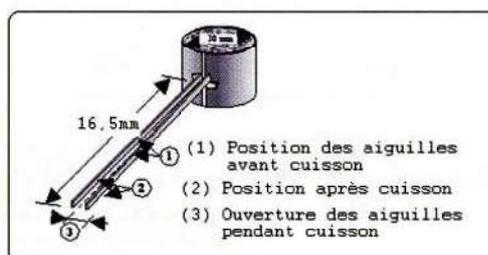


Figure 2: Moule pour essai d'expansion

Le tableau 8 indique la variation de l'expansion à froid, exprimée en millimètre, en fonction du pourcentage de déchets de briques incorporé.

Tableau 8: Expansion à froid des ciments élaborés

% d'ajout	0	5	10	15	20	25	30	35
Expansion (mm)	0,11	0,11	0,25	0,13	0,47	0,32	0,00	0,00

Les résultats obtenus, montrent une variation plutôt aléatoire de la stabilité des échantillons en fonction du pourcentage de briques. Ce comportement est peut être dû à une hydratation lente ou retardée des ciments avec ajout de briques Ref. [9]. Cependant, et en toute état des causes, les valeurs mesurées sont largement inférieures à la limite d'expansion exigée par la norme NA 232 Ref. [10], qui fixe un seuil de 10mm.

3.2.5-Retrait

Le retrait a été mesuré sur mortier normal. Les éprouvettes utilisées, de forme prismatique 4x4x16 cm ont été exposées après vingt quatre heures à une hygrométrie relative de 50 % jusqu'à l'échéance déterminée (3, 7 et 28 jours). Les déformations ont été mesurées à l'aide d'un rétractomètre digital à haute sensibilité. La photo suivante présente la méthode utilisée pour la mesure du retrait, et les résultats obtenus sont portés dans le tableau 9.

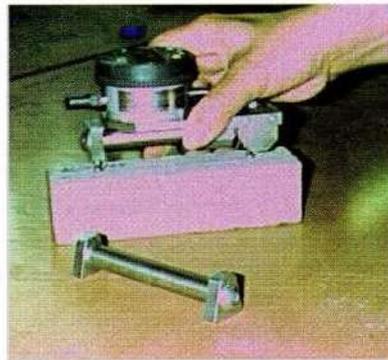


Figure 3: Mesure du retrait par un rétractomètre digital

Tableau 9: Retrait à 28 jours des mortiers des ciments élaborés

% d'ajout	0	5	10	15	20	25	30
retrait à 28 j (µm/m)	680	590	630	680	620	680	690

Les déformations différées dues au retrait à 28 jours, varient entre 590 et 690 µm/m pour les 7 ciments testés. Les différences constatées ne sont pas très importantes, et les valeurs obtenues restent admissibles vis-à-vis des prescriptions de la norme NA 422 Ref. [2] qui fixe pour les ciments portland CPJ-CEMII de classe 42,5, un retrait autorisé maximal de 1000 µm/m.

3.2.6- Couleur des ciments

Lors de l'élaboration des ciments, nous avons constaté que jusqu'à des taux d'ajouts en briques de l'ordre de 10 %, la couleur des ciments restait grise plus ou moins accentuée, ce qui correspond à la couleur traditionnelle des ciments portlands composés. Au-delà de ce pourcentage, les ciments commençaient à changer de couleur pour prendre carrément la couleur des briques, pour les taux supérieurs à 30 %.

3.3- Résistances mécaniques

3.3.1- Résistance mécanique à la compression

Le but de cette partie est de déterminer la classe de résistance des ciments élaborés. Les résistances à la compression et à la flexion ont été déterminées sur des corps d'épreuves de forme prismatique 4x4x16 cm confectionnés sur mortier normal et conservés dans une atmosphère saturée pendant respectivement 2, 7, 28 et 90 jours. Les résultats des essais d'écrasement en compression sont présentés dans le tableau 10. On signalera toutefois que la valeur obtenue pour chaque ciment est une moyenne de 3 essais.

Tableau 10: Résistance à la compression, en MPa, des mortiers de ciments élaborés

% d'ajout	0	5	10	15	20	25	30	35
Résistance à 2 jours	18,3	18,3	16,6	16	14,2	14,2	14,7	10,9
Résistance à 7 jours	38,5	39,3	34,7	35,5	30,3	29	28,4	23,3
Résistance à 28 jours	50,9	51,3	47,2	47,9	45,8	44,9	45,4	41,9
Résistance à 90 jours	53,9	55,6	56,2	59,8	56,7	56,3	57,9	49,6

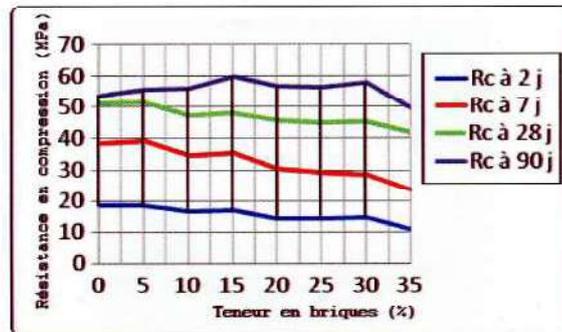


Figure 4: Variation de la résistance en fonction de la teneur en déchets de briques

La figure 4 illustre une synthèse de l'évolution de la résistance en compression dans le temps des ciments confectionnés. Il ressort de l'examen de la figure précédente que la résistance en compression baisse d'une manière générale avec l'accroissement de la teneur en déchets de briques. A titre d'exemple, à 28 jours les ciments contenant entre 10 et 15 % de d'ajout présentent des baisses en résistance variant entre 7,3 % et 5,9 % par rapport à celle du ciment sans déchet. Ces diminutions sont liées à une diminution du pourcentage des silicates tricalciques dans le ciment à faible teneur en clinker qui favorisent les résistances à court terme. Par ailleurs, l'on remarque que les résistances des ciments conservés pendant une longue période (90 jours) présentent des valeurs de résistance plus importantes que celle du ciment portland sans ajout.

3.3.2- Résistance à la traction par flexion

L'essai de rupture par flexion a été effectué sur des éprouvettes prismatiques de 4x4x16 cm en mortier normal, et consiste à appliquer une charge concentrée au milieu de la portée (Figure 5).

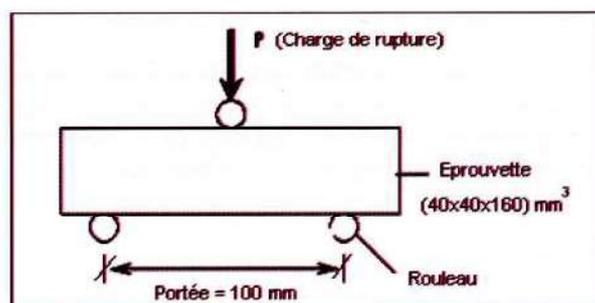


Figure 5: Essai de flexion pour éprouvette en mortier normal

Les résultats des essais de ruptures à la flexion sont reportés dans le tableau qui suit :

Tableau 11: Résistance à la flexion (MPa) des mortiers de ciments élaborés

% d'ajout	0	5	10	15	20	25	30	35
Résistance à 2 jours	3,58	3,69	3,54	3,54	3,31	3,3	3,28	2,94
Résistance à 28 jours	7,04	7,47	7,05	7,2	7,62	8,13	7,75	7,78

Les résultats chiffrés du tableau 11 permettent de conclure que les résistances à la traction des ciments élaborés varient légèrement. Ainsi à 28 jours, un ciment pur et l'autre contenant 10% de déchets de briques présentent pratiquement la même résistance à la traction par flexion (7,04 MPa contre 7,05). Cependant au-delà de 28 jours, l'ajout de briques semble favoriser l'augmentation des résistances.

Bilan :

Il est clair, à partir des résultats des différents essais entrepris, que l'on peut obtenir un ciment composé à base de déchets de briques performant et ce lorsque le pourcentage d'ajout reste inférieur à 15%. Les meilleures performances ont été obtenues pour un taux d'ajout en déchets de 10 %. Le tableau 12 présente une synthèse des caractéristiques physico-mécaniques du ciment composé contenant 10 % de déchets de briques.

Tableau 12: Caractéristiques physico-mécaniques du ciment contenant 10% de déchets de briques

Résistance en compression (MPa)		Résistance en flexion (MPa)	
2 jours	16,6	2 jours	3,54
7 jours	34,7	7 jours	5,82
28 jours	47,2	28 jours	7,05
Début de prise en minutes		225	
Fin de prise en minutes		275	
Retrait à 28 jours ($\mu\text{m/m}$)		630	
Stabilité en millimètre		0,25	
Masse volumique (g/cm^3)		3,04	
Consistance normale (%)		25,6	

Evidemment ces performances doivent être validées sur béton, et une attention toute particulière devra être portée sur le caractère durable de ce nouveau ciment en milieu agressif.

4- Conclusion

Nous avons tenté de démontrer, dans cet article, la faisabilité de fabriquer un ciment composé à base de déchets de briques finement broyés. Au terme de cette étude expérimentale, nous pouvons conclure que la substitution d'une partie du clinker par des déchets de briques permet d'obtenir un nouveau ciment composé répondant aux différentes exigences normatives nationales notamment en termes de :

- 1- spécifications chimiques (teneur en oxyde de magnésium, perte au feu, etc.),
- 2- spécifications physiques (temps de prise, stabilité, retrait, gonflement, masses volumiques),
- 3- spécifications mécaniques, notamment les résistances atteintes à 2 et 28 jours.

Les meilleures valeurs des caractéristiques et des propriétés physico-mécaniques ont été obtenues pour un ciment contenant les proportions en masses suivantes :

- 85 % de clinker,
- 10 % de déchets de briques,
- 5 % de gypse.

D'autres essais complémentaires sont en cours afin d'étudier la durabilité du nouveau liant en milieu agressif et de valider les résultats obtenus, en terme de performances mécaniques, sur béton.

5- RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] HARBI R., *Comportement mécanique et durabilité des mortiers à base de déchets de briques*. Mémoire de Magister, Université 08 Mai 45, Guelma, Algérie. 2009.
- [2] NORME ALGÉRIENNE NA442, «Ciments – Définition, classification et spécifications des ciments», éditées par Institut Algérien de la normalisation, Algérie, 2000.
- [3] BARON,J. OLIVIER,J,P, *LES BETONS, Bases et données pour leur formulation.*, Editions Eyrolles, Paris, 1997.
- [4] NORME ALGÉRIENNE NA233, «Ciments – Détermination de la silice», éditées par Institut Algérien de la normalisation, Algérie, 2000.
- [5] WILD.S, GAILUIS.A, SZWABOWSKI.J, and H.HANSEN., *Water clay brick., A European of its effectiveness as a cement replacement materiel. Exploiting wastes in concrete.* Proceedings of the international seminar held in Dundee. Ed Ravinda K.Dhir, ISBN 0727728334,1999.
- [6] NORME ALGÉRIENNE NA5042, «Ciments – Détermination des pertes au feu», éditées par Institut Algérien de la Normalisation, Algérie, 2000.
- [7] NORME ALGÉRIENNE NA229, «Ciments – Détermination de la consistance normale», éditées par Institut Algérien de la Normalisation, Algérie, 2000.
- [8] CHERAIT Y. NAFA, Z., *Eléments de matériaux de construction et essais.*, Direction des publications universitaires de Guelma, Algérie, 2006.
- [9] DARABLA R., *Propriétés physico-mécanique des ciments et des mortiers élaborés à base de laitier granulé d'El-Hadjar*, Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, Algérie, 2000.
- [10] NORME ALGÉRIENNE NA232, «Ciments – Détermination de l'expansion à chaud et à froid.», éditées par l'Institut Algérien de la Normalisation, Algérie, 2000.