

VALORISATION DES SOUS PRODUITS DE HAUTS FOURNEAUX DANS LA CONFECTION DU BETON DE REMPLISSAGE DES TUBES EN ACIER

HANDEL Naoual

UNIV Souk Ahras, INFRARES, Département de Génie Civil, Université Mohamed Cherif Messaadia, Souk-Ahras, Algérie.

Résumé

Dans cette étude nous avons cherché à utiliser le laitier cristallisé concassé et vitrifié de hauts fourneaux dans la confection du béton, qui a été utilisé comme un élément de bourrage dans des tubes en acier laminé à froid et soudés. L'utilisation d'un tel déchet industriel comme matériau de substitution contribuera à sauvegarder une part importante des ressources naturelles et protéger l'environnement. Trois types de mélange de béton ont été préparés, un béton ordinaire, un béton tout laitier où le gravier a été remplacé totalement par le laitier cristallisé, un béton de sable de laitier où le sable de dune a été substitué totalement par le laitier cristallisé. La caractérisation de ces bétons a été faite à partir de leurs propriétés mécaniques : la résistance à la compression, la résistance à la traction et le module longitudinal de Young ainsi que sur leur durabilité: capillarité, absorption d'eau massique et retrait hydraulique. Les résultats expérimentaux ont montré un effet bénéfique lié au pourcentage de laitier cristallisé utilisé dans les bétons. Ainsi que des améliorations des performances mécaniques des tubes remplis par le béton tout laitier contenant 100% de gravier de laitier sous charge de compression uni-axial, ont été enregistrées.

Mots-clefs : béton de sable, laitier cristallisé, , flambement local, mode de rupture.

1. Introduction

Ces dernières années, l'utilisation du béton à base de matériau recyclé tel que les agrégats du béton recyclé, et le laitier concassé cristallisé du déchet du haut fourneau, comme matériaux de bourrage dans des tubes en acier, a attiré l'attention intéressée des chercheurs. Le laitier cristallisé provenant des hauts fourneaux du Complexe Sidérurgique d'El Hadjar -Algérie, peut être identifié comme un nouveau matériau de construction dans la confection du béton. L'utilisation d'un tel déchet industriel comme matériau de substitution contribuera à sauvegarder une part importante des ressources naturelles et protéger l'environnement. Le but de cette étude expérimentale, est de réaliser des bétons contenant du laitier, en tant que granulats et de déterminer par quelques démonstrations les comportements d'une section composée, et la possibilité d'employer dans la construction des tubes à parois minces remplies par un béton à base de laitier cristallisé. Ces démonstrations sont effectuées sur des tubes en acier minces, remplis par trois types de bétons : un béton ordinaire désigné par BO, un béton tout laitier désigné par BT, et un béton de sable de laitier désigné par BS. Une série d'essais a été effectuée sur 12 tubes, 4 remplis avec BO, 4 autres l'ont été avec BT, et les 4 testant ont été avec BS. La caractérisation de ces bétons a été faite à partir des résultats d'essais de compression simples, de traction par fendage, l'absorption d'eau, la capillarité et le retrait.

2. Caractéristiques des matériaux utilisés

2.1 Ciment

Le ciment utilisé est un ciment portland composé type CEMII. Les caractéristiques physico chimiques sont représentées au tableau 1 et tableau 2.

Tableau 1 : les caractéristiques physico chimiques du ciment CMII

| Caractéristiques | Unité | Valeur |
|---------------------------|--------------------|------------------|
| Masse volumique apparente | Kg/m ³ | 1100 |
| Masse volumique absolue | Kg/m ³ | 3000 |
| Consistance normale | % | 27 |
| Prisométrie | h.mn | |
| - Début de prise | | 2h 6mn - 2h 10mn |
| - Fin de prise | | 3h - 3h 10mn |
| Classe de résistance | Mpa | 42.5 |
| Résistance moyenne | Mpa | 40-42 |
| Résistance vraie | Mpa | 38 |
| Finesse (BLAINE) | Cm ² /g | 3200-3400 |

Tableau 2 : Composition chimique du CPJ utilisé pour la confection des bétons

| CaO | Al ₂ O ₃ | SiO ₂ | Fe ₂ O ₃ | MgO | Na ₂ O | K ₂ O | Cl ⁻ | SO ₃ | CaO libre |
|-------|--------------------------------|------------------|--------------------------------|-----|-------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------|
| 56-63 | 4-6 | 19-27 | 2.5-3.5 | 1-2 | 0.1-0.6 | 0.3-0.6 | 0-0.2 | 2-3 | 0.5-2.5 |

2.2 Filler

Les fillers de laitier vitrifié a été obtenus par broyage des sous produits de l'industrie sidérurgique de haut fourneau d'El-Hadjar.

Tableau 3 : Composition chimique des fillers de laitier vitrifié

| | SiO ₂ | CaO | MgO | Al ₂ O ₃ | MnO | Fe ₂ O ₃ | S |
|------------|------------------|-------|-----|--------------------------------|-----|--------------------------------|-------|
| Teneurs %) | 38.9 | 39.21 | 9.1 | 8.98 | 2 | 0.85 | 0.098 |

2.3 Granulats

Quatre types de granulats sont utilisés pour la préparation des bétons d'étude, les caractéristiques physiques et la composition minéralogique de laitier de hauts fourneaux sont illustrées respectivement aux tableaux 4 et 5.

Tableau 4 : Caractéristiques physique des granulats utilisés

| | | Sable naturel | Sable de laitier cristallisé | Gravillon De calcaire | Laitier cristallisé |
|---------------------------|-------------------|---------------|------------------------------|-----------------------|---------------------|
| Granularité | - | 0/2.5 | 0/3.15 | 5/15 | 5/15 |
| Masse volumique apparente | Kg/m ³ | 1620 | 1570 | 1520 | 1760 |
| Masse volumique absolue | Kg/m ³ | 2520 | 2700 | 2500 | 2710 |
| Module de finesse | - | 2,07 | 2,22 | - | - |
| Porosité | % | 29,39 | 41 | 0,85 | 51 |
| Teneur en eau | % | 0,21 | 0,35 | 0,05 | 0,29 |
| Absorption d'eau | | - | - | 0.55 | 5.00 |
| ES | % | 86.66 | 88.52 | - | - |

Tableau 5 : Composition minéralogique des laitiers de hauts fourneaux

| Composants (oxydes) | CaO | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | MgO | MnO | FeO |
|---------------------|---------|------------------|--------------------------------|-------|----------|------------|
| Teneur % de Laitier | 39 – 42 | 36 – 41 | 7- 10 | 5 – 9 | 0.5 –0.1 | 0.14 – 0.6 |

D'après les résultats représentés au tableau 4, on peut constater les observations suivantes:

- les masses volumiques absolues et apparentes du sable naturel et gravillon de calcaire sont dans les limites (masse volumique apparente (1400-1600 kg/m³), masse volumique absolue (2500-2700 kg/m³)) pour un béton classique.
- La masse volumique apparente du laitier cristallisé de haut fourneau d'EL HADJAR varie selon la porosité du granulats de (2700 à 2800 kg/m³). Les masses volumiques absolues du sable laitier cristallisé et gravillon laitier cristallisé varient entre (2500 à 3000 kg/m³)
- Le module de finesse du sable de dune et sable de laitier cristallisé est conforme aux normes qui exigent un module de finesse entre 1.8 et 3.2 avec une tolérance de 0.35.
- Le coefficient d'absorption d'eau de gravier calcaire et de laitier cristallisé ne dépasse pas les 5%.
- Les valeurs moyennes de ES montrent que les sables utilisés est très propre (ES>85). Il y a donc absence presque totale des fines argileuses.

2.4 Eau

L'eau utilisée est une eau de robinet dépourvue d'éléments nocifs et ayant un PH ~ 7.

3. Programme expérimental

3.1 Matériau et fabrication

La méthode utilisée pour déterminer la composition des bétons testés est celle de Gorisse-Dreux. Les compositions des bétons sont présentées dans le tableau 6.

Un total de 12 tubes, de section transversale (100x70x2) mm a été étudié. L'acier utilisé pour la confection de la section transversal est une tôle mince galvanisé laminée à froid d'épaisseur de 2 mm et obtenue par façonnage et pliage à froid pour former des U. La section étudiée est fabriquée par 2 aciers laminés à froid initialement en forme de U et soudés avec une soudure continue sur toute la hauteur du tube pour former une section rectangulaire creuse. les

élancements des éprouvettes sont (200,300,400,500) mm. La contrainte d'écoulement de l'acier est 300MPa avec un module de Young $E = 205 \text{ GPa}$.

Les tubes creux ont été remplis par trois type de mélange de béton, un béton ordinaire designer par BO, un béton designer par BL ou le sable et le gravier calcaire a été substituer par le laitier cristallisé et un béton designer par BS ou le sable naturel a été substitué par le sable de laitier cristallisé avec ajout des fillers de sable vitrifié.

A l'âge de 28 jours, tous les tubes composés ont été testées à la compression uni-axial sur une machine de compression de capacité égale à 2000 KN, à une vitesse de chargement d'ordre de 0.6 Tf/s.

Tableau 6 : Compositions des bétons confectionnés

| | | BO | BL | BS |
|-------------------------------------|-------------------|---------|---------|---------|
| Dosage de Ciment | Kg/m ³ | 350. | 350. | 300. |
| Filler de laitier vitrifié (<0.063) | | - | - | 200 |
| Rapport Eau-Ciment E/C | - | .60 | .60 | .64 |
| Sable 0/2,5 | Kg/m ³ | 686.4 | - | - |
| Sable de laitier cristallisé 0/3.15 | | - | 627,27 | 1653.90 |
| Gravier de carrière 5/15 | | 1073.60 | - | - |
| Laitier cristallisé 5/15 | | - | 1273.54 | - |
| Masse volumique réel | | 2.67 | 2.53 | 2.25 |
| Affaissement | mm | 79 | 87 | 52 |
| Sup plastifiant | % | - | 2 | 3 |

3.2 Essais réalisés

3.2.1 Béton à l'état frais

- Masse volumique : conformément à la norme NF EN 12350-6.

3.2.2 Béton à l'état durci

- Compression simple: La caractérisation du comportement en compression est effectuée conformément à la norme NF P 18-406, sur des éprouvettes cylindriques

- Traction par fendage : La caractérisation du comportement en traction par flexion est effectuée conformément à la norme NF P 18-408, sur des éprouvettes cylindriques (16x32) cm².

- Traction par flexion : L'essai a été effectué selon la norme NF P 18 – 407. Les éprouvettes testées sont des prismes (10 x10 x40) cm³

- Module élastique est déterminé sur des éprouvettes cylindriques de (16 x 32) cm², mûries à l'eau, et équipées d'extensomètre axial de trois capteurs permettant de mesurer les déformations longitudinales de l'échantillon sous des chargements croissants

Les éprouvettes sont conservées à l'air libre dans le laboratoire d'essais, à une température de 20°C à 30°C, et une humidité relative variant entre 50 et 65 %, tous les essais sont testés à l'âge de 28 jours avec une moyenne de trois éprouvettes pour chaque type de béton.

3.2.3 Essais hydriques

- Essai de capillarité est réalisé selon la norme NF P 18-502. L'essai s'effectue sur des prismes de (7x7x28) cm³.

- Essais d'absorption d'eau massiques par immersion ont été réalisés sur des éprouvettes prismatiques (7x7x28) cm³ préalablement séchées dans une étuve à 105°C jusqu'à masse constante. Elles ont été ensuite totalement immergées dans l'eau jusqu'à saturation (jusqu'à l'obtention d'une masse constante).

- Retrait est réalisé conformément à la norme NF P 15-433, à l'aide d'un rétractomètre, avec des éprouvette prismatique (7x7x 28) cm³.

4. Résultats expérimentaux et analyses

4.1 Résultat sur béton a l'état frais

Les résultats d'essais sont présentés sur la figure 1. Comme pour un béton classique, la densité d'un béton laitier dépend de sa formulation, ainsi que sa mise en place, on obtient normalement sur béton humide des valeurs $\geq 2,4$, ce qui est obtenue pour le béton ordinaire et le béton tout laitier. La recherche d'une compacité élevée se justifie pour avoir de bonnes caractéristiques mécaniques.

On remarque que la masse volumique du béton tout laitier est plus élevée que le béton ordinaire (BO) et le béton de sable (BS) et, cela est dû aux grains de sable qui se logent dans les pores des gravillons.

4.2 Résistances mécaniques des bétons a l'état durci

Les résistances en compression des bétons sont illustrées dans la figure 2. Une première exploitation des résultats montre que la résistance à la compression du béton de sable de laitier est plus proche que celle du béton ordinaire et cela est dus à l'ajout de fillers qui a augmenter la compacité du mélange, en remarque aussi que le béton tout laitier est plus résistant que les deux autres types de béton (BO et BS), Ce qui montre que la liaison pâte-granulat est meilleure du fait de la texture superficielle du granulat.

Même pour résistance à la traction (figure 3) on a remarqué une augmentation légère pour le béton de laitier BT par rapport au béton ordinaire (BO) et béton de sable de laitier (BS).

Selon la figure 4 on remarque une augmentation de la résistance en flexion du béton de laitier et béton de sable est beaucoup plus importante que le béton ordinaire. Les résultats obtenus montrent que la texture de la matrice de sable de laitier augmente fortement la résistance à la flexion.

Les modules des déformations sécants des trois types des bétons sont de 28 000 MPa, 36000MPa, et 24 500MPa et 23 000MPa, respectivement pour le béton ordinaire, béton tout laitier, et béton de sable de laitier. On remarque que le béton tout laitier est plus rigide que les autres bétons

4.3 Résultat des essais hydriques

D'après les résultats présenter sur la figure 5, on peut dire que la remontée capillaire est plus faible pour le béton de sable de laitier (BS) contenant des fillers que pour les bétons (BO et BL) sans fillers est ceux ci s'explique par l'absence presque totale des cavités intérieurs pour le BS contenant des fillers.

Selon la figure 6, on remarque que le béton de laitier et le béton de sable composé des fillers présentent des valeurs d'absorption par immersion un peu élevés que celles du béton ordinaire. Et ce ci est dû a l'aptitude des sous produits de hauts fourneaux d'absorber de l'eau lorsque elles sont en contacte avec ce dernier.

Le retrait mesuré sur le béton ordinaire est plus faible que celui mesuré sur le béton tout laitier et le béton de sable ; cela peut être expliqué par deux raisons principales : le volume de la pâte dans le béton ordinaire est généralement beaucoup plus faible que dans le béton de sable, sachant que c'est la pâte qui se rétracte et non le squelette granulaire qui au contraire s'oppose au retrait. Les cavités qui ce trouvent au niveau du laitier cristallisé ont une influence sur le comportement du retrait du béton de laitier.

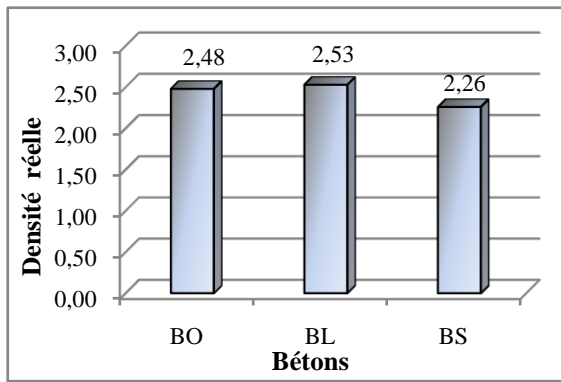


Figure 1. Densité à l'état frais des différents bétons

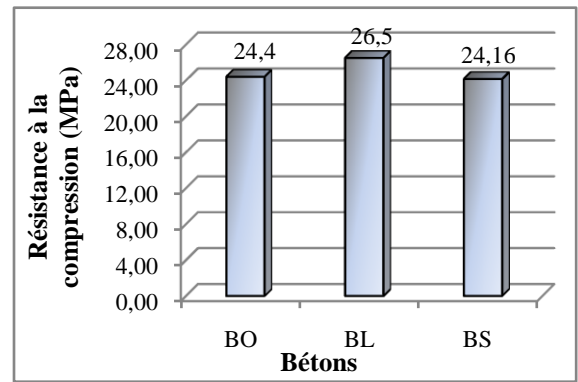


Figure 2. Résistance à la compression des différents bétons

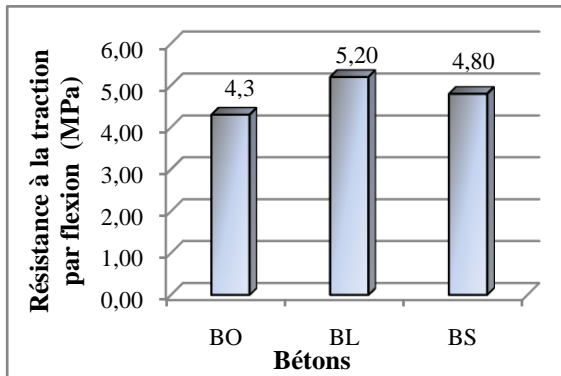


Figure 3. Résistance à la traction par fendage des différents bétons

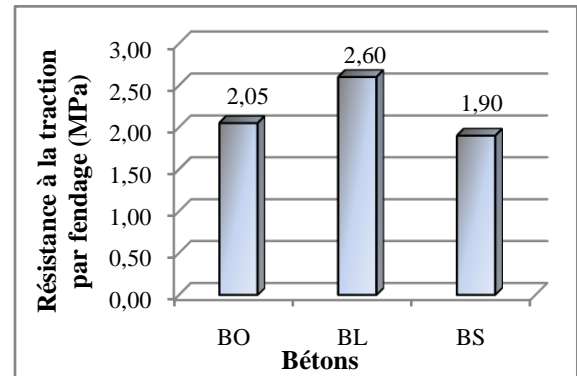


Figure 4. Résistance à la traction par fendage des différents bétons

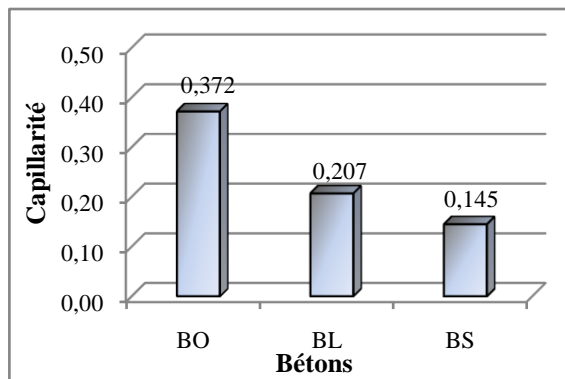


Figure 5. Absorption d'eau par capillarité

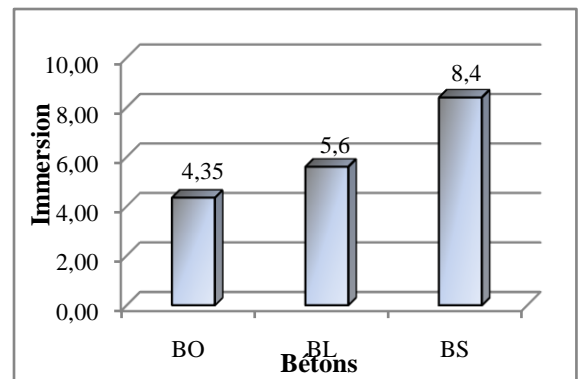


Figure 6. Absorption d'eau par immersion

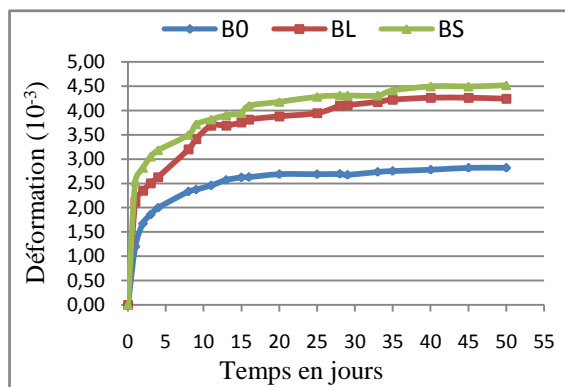


Figure 7. Evolution du retrait mesuré sur les différents

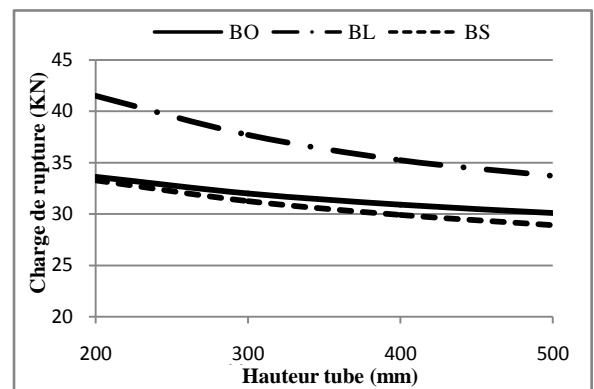


Figure 8. Charge de rupture des tubes en acier

5. Compression directe sur les tubes composés

D'après Les résultats obtenus a partir des essais sur les tubes en acier composés, on constate que la hauteur des tubes composés a un effet considérable sur la capacité portante, on remarque aussi que la capacité portante diminue avec l'augmentation de la hauteur du tube soumis a une charge uni-axiale quelque soit le type de béton de remplissage.

La figure 8 illustre des améliorations dans le comportement des tubes composés remplis par le béton tout laitier en comparant avec les tubes remplis par BO et BS. Le gain de résistance est plus élevé pour les tubes en acier remplis par le béton tout laitier qu'aux tubes composés remplis par le béton ordinaire et le béton de sable comme le montre la figure 5. La capacité portante des tubes remplis par BL a augmenté de 17% et 20% par rapport aux tubes remplis par BO et BS respectivement.

Les résultats obtenus a partir des essais sur les tubes remplis par les différents types des bétons montrent le principale comportement pour les tubes en acier a paroi mince est l'instabilité par voilement local, cela a eu lieu dans tous les échantillons avec une petite atténuation pour les tubes en acier long, un voilement ver l'extérieur et vers l'intérieure des parois, avec un écrasement partiel du béton.

6. Conclusion

Les résultats obtenus dans cette étude et les constatations observées nous conduisent à conclure que :

- L'utilisation du laitier cristallisé comme granulats dans le béton, contribue à l'amélioration de certaines propriétés mécaniques et physiques notamment la résistance à la compression
- La compacité élevée obtenue grâce à l'ajout de filler en proportion convenable permet d'obtenir des gains de résistances en compression, de traction par fendage et de flexion.
- Le béton tout laitier présente la meilleure résistance en compression par rapport à celles obtenues avec le béton ordinaire et les bétons de sable
- Les résistances en traction des trois types des bétons sont comparables et de valeurs très proches.
- Le retrait mesuré sur le béton ordinaire est plus faible que celui mesuré sur le béton tout laitier et le béton de sable, Ceci est lié à la granulométrie de l'étendue granulaire et la nature des fillers ajoutés.
- Le remplissage des tubes creux en acier par le béton tout laitier a amélioré le comportement et a augmenté la capacité portante par rapport aux tubes remplis par un béton ordinaire et un béton de sable.
- La capacité portante diminue avec l'augmentation de l'élancement pour les tubes composés.
- Le mode de rupture des tubes composés est un mode par cloquage dissymétrique et voilement local ou l'acier des parois se déforme vers l'extérieur ou vers l'intérieur. Ce mode devient moins accentué avec l'augmentation de l'élancement des pièces.
- Le problème des tubes composés à paroi mince c'est le voilement des parois, ce qui est constaté dans cette étude, mais l'utilisation des bétons à base de laitier cristallisé a minimisé ce voilement, dans il est très intéressant d'utiliser ces types des bétons (BL, BS) de remplissage.

7. Bibliographie

- [1] N. Handel et al, Etude expérimentale des colonnes partiellement remplis par le béton sous charge axiale, MATEC Web of Conferences EDP Sciences, 02008-P.1-7,2012.
- [2] N. Handel et al, Etude expérimentale du comportement des poteaux mixtes, 19ème Congrès Français de Mécanique, France (Marseille), 24 au 28 Août 2009.
- [3] N. Handel et al, Experimental investigation of partially encased composite columns axially loaded, International Review of Mechanical Engineering; Vol. 3 Issue 6, p825, Nov2009.

- [4] J. Zeghiche , N. Handel, Experimental behaviour of concrete-filled thin welded steel stubs, axially loaded case ,8 International Conference on Concrete Technology in Developing Countries Hammamat, TUNIS, November 8-9, 2007.
- [5] E. Ellobody, B. Young, D. Lam, Behaviour of normal and high strength concrete-filled compact steel tube circular stub columns, Journal of Constructional Steel Research 62, pp. 706–715, 2006.
- [6] M. Naseem Baig, F. Jiansheng, N. Jianguo, Strength of Concrete Filled Steel Tubular Columns, ISSN 1007-0214 05/15 volume 11, pp. 657-666, 2006.
- [7] Behim Mourda « sous produit industriels et développement durable: réactivité, rôle et durabilité des laitiers d'El Hadjar dans les matériaux à matrices » Thèse de doctorat d'état en génie civil. , institut de génie civil Annaba, 2005.
- [8] Achoura Djamel, Contribution à l'étude de la formulation et de la caractérisation des bétons de sable à base de laitier de hauts fourneaux d'EL HADJAR, thèse, Université de Annaba, 2005.
- [9] T. Zhong, H. Lin.Hai., W. Zhi-Bin, Experimental behaviour of stiffened concrete filled thin walled hollow structural (HSS) stub column, Journal of Constructional Steel. Research 61, pp. 962–983 ,2005.
- [10] M. Mursi, U. Brian, Strength of slender concrete filled High strength steel box columns, Journal of Constructional Steel Research 60, pp. 1825–1848, 2004.