



Influence du mode et du taux de renforcement par fibres de verre courtes E et tissu de verre sur les performances mécaniques de bétons de résine. (Influence of E short glass fiber and glass texture reinforcement mode and rate on the mechanical performances of resin concretes)

G. Mirouzi¹, B. Redjel^{1*}, D. Rangeard², B. Kebaili¹

¹ *Laboratoire de Génie Civil, Université Badji Mokhtar Annaba, BP12, 23000, Annaba, Algérie.*

² *Laboratoire GCGM, INSA de Rennes, EA 3913 20, Avenue Buttes de Cöesmes, 35708 Rennes Cedex 7, France.*

Received 01 Oct 2015, Revised 19 Feb 2016, Accepted 01 Mar 2016

*Corresponding author. E-mail: bredjel@yahoo.fr; Tel: (+1230550600962)

Résumé

Des bétons à base de résine polyester renforcée de fibres de verre courtes et de tissu de verre ont été composés selon une nouvelle formulation empirique basée sur le principe du point de saturation des sables avec la résine. Un taux de 27% de résine polyester saturant un mélange de 60% de sable fin et de 40% de sable moyen est apparu comme étant le mélange optimal adopté. Le rapport G/S égal à 1 et qui donne les meilleures résistances à la flexion et à la compression a été pris comme référence. L'évolution de la résistance en compression et celle en flexion en fonction du taux de renfort suit une loi linéaire. Ceci a permis de modéliser la prédiction du comportement mécanique par une approche empirique d'une loi de mélanges basée sur la méthode d'homogénéisation. Ces bétons de résine qui apparaissent comme des matériaux innovants peuvent constituer une alternative au béton ordinaire dans les domaines de la réparation des ouvrages endommagés ainsi que dans la réalisation d'éléments structuraux exposés aux agressions chimiques et climatiques.

Mots clés : béton de résine, fibre de verre, saturation, formulation, comportement mécanique

Abstract

Glass fiber reinforced polyester resin concrete was prepared using a new formulation based on an empirical method having a concept of rate saturation of sand with resin. The saturation is obtained at a rate of 27% of polyester resin. A mixture of 60% of fine sand and 40% of mid sand is appeared as the optimal mixture adopted. Ratio G/S = 1 giving the best strengths in bending and in compression was used as a reference. The evolution of compressive and flexural strength according to rate of reinforcement follows a linear law. This made it possible to model the prediction of the mechanical behavior by empirical approach of a mixture law based on the homogenization method. These resin concretes appearing as smart materials can constitute an alternative to ordinary concrete in the fields of damaged work repair, and also the realization of structural elements exposed to chemical and climatic attacks.

Keys words: polymer concrete, glass fiber, saturation, formulation, mechanical behavior

1. Introduction

De nombreux facteurs naturels comme les contraintes climatiques ou la pollution qui provoquent en général des phénomènes de vieillissements physico chimiques affectent la durabilité des matériaux et des structures en béton hydraulique employés dans les constructions du génie civil. Les dégradations les plus significatives encourues sont à l'origine de la fissuration, de la délamination, de la désagrégation, de l'écaillage ou de l'érosion des

surfaces ainsi que de la corrosion des armatures [1]. Ainsi dans certains cas, le remplacement de la matrice cimentaire par une matrice organique comme la résine synthétique en polymère peut constituer une voie d'amélioration efficace de la tenue des structures du BTP aux agressions environnementales. Les bétons qui en résultent sont connus sous la dénomination de bétons de polymère ou de bétons de résine et se sont surtout développés au Japon depuis les années 1980 pour des travaux de finition, pour la réalisation de structures préfabriquées comme les voûtes, les raccordements des panneaux pour les façades d'immeubles et pour les ponts ainsi que pour le développement de matériaux artificiels tel que le marbre [2]. Aux Etats Unis, c'est en moyenne un volume de 60 300 m³ de bétons de résine qui est utilisé pour la réparation et la fabrication d'ouvrages [1,3].

Divers auteurs se sont intéressés à l'étude du comportement des bétons résineux en adoptant des approches expérimentales. Ces études visent surtout à optimiser la formulation en vue d'obtenir des caractéristiques à la compression comparables à celles des BHP. Ainsi, l'introduction de la fumée de silice induit une augmentation de la résistance à la compression et du module d'Young de bétons résineux à base de polyesters et améliore leur résistance aux attaques chimiques par des solutions acides [3]. Les caractéristiques mécaniques obtenues sont comparables à celles des bétons de hautes performances et la diminution des propriétés résiduelles après des attaques chimiques est d'autant plus faible que le pourcentage massique de la fumée de silice est important [4]. Dans ces travaux, le taux de résine varie de 25% à 30% en masse. P. Novoa et al [5] se sont intéressés à l'effet de l'ajout de granulats légers à base de liège sur le comportement de trois mortiers à base de résine polyester contenant en proportion massique respectivement 25%, 27% et 30%. Il s'avère ainsi important que les architectes et les ingénieurs aient une idée des possibilités et des limitations de ces composites granulaires pour être en mesure de choisir le plus approprié et le plus économique pour une utilisation donnée.

Dans certaines applications, les bétons de résine sont renforcés à l'aide de divers types de renforts comme la fibre et les tissus de verre, les voiles à base de fibre de verre, les fibres métalliques et ce afin d'améliorer leurs performances. La quantité de polymère utilisée comme liant et qui est généralement faible reste habituellement fonction de l'importance de la charge [6,7,8,9,10,11]. La littérature scientifique et technique rapporte que normalement, la teneur en résine varie entre 5 et 15% de la masse totale, mais cette proportion peut atteindre jusqu'à 30% si le matériau de charge est fin [12]. Cependant compte tenu du prix de revient élevé des résines, l'emploi de ces poly composites est limité à l'exécution de petits éléments qui restent actuellement du domaine du laboratoire ou à des applications spécifiques [13]. Les produits en béton de résine ne brûlent pas facilement, car ils contiennent une forte charge minérale. Leur degré de résistance à la chaleur dépend du type de résine utilisé comme liant [8]. Ainsi, testant un béton de polymère optimisé à 13% de résine epoxy par rapport à l'unité de granulats composée de 65% de sable 0/4 et de 34% de gravier 4/10, O. Elalaoui et al [10] rapportent que ce composite granulaire exposé à des températures supérieures à 150 °C montre une baisse significative de ses performances due principalement à la dégradation thermo oxydante de l'epoxy. Cette dégradation est en général accompagnée par une restitution de gaz. Cependant exposé à des températures inférieures à 250 °C, le béton de résine epoxy est plus performant qu'un béton ordinaire classique à base de ciment hydraulique. Par ailleurs, dans une étude expérimentale sur un béton de polymère optimisé et soumis à différentes charges thermo cycliques M. Heidari-Rarani et M.R.M. Aliha [14] rapportent les bonnes performances de durabilité de ce composite sous ces conditions. Les bétons de polymère présentent en général des modules d'élasticité deux fois plus faibles que ceux des bétons de ciment ou des mortiers de ciment renforcés de fibres métalliques qui ont pour valeur moyenne 17 000 à 20 000MPa et même plus selon la qualité des constituants [15]. Quant au fluage, il est très influencé par les températures élevées. A titre d'exemple, le fluage à 50 °C est huit fois plus important sous une contrainte de 10 MPa et il semble que la stabilisation sous charge soit difficile à obtenir. Ce point essentiel dans le comportement de ces matériaux constitue actuellement une sorte d'obstacle à leur développement indépendamment de leur coût [13].

Le but de ce travail est de formuler des bétons à base de résine polyester renforcée de différents taux de fibres de verre injectées sous forme de couches et d'étudier ainsi leurs influences sur le comportement global et les performances mécaniques de ces composites granulaires.

2. Procédures expérimentales

2.1. Matériaux utilisés

Deux types de sable de dune ont été utilisés : l'un fin et l'autre moyen de modules de finesse respectivement 0,8 et 1,83. Le gravier utilisé est un gravier de carrière de fraction 3/8. La figure 1 montre les courbes

granulométriques des sables fin et moyen et du gravier utilisé. Ces courbes se caractérisent par une évolution monotone croissante et continue indiquant que les fractions utilisées se distinguent par une granularité homogène les prédestinant à l'utilisation à juste titre dans la composition des bétons de résine. Le liant étudié est une résine polyester fournie sous forme liquide dans des bidons, de couleur rouge foncé, inflammable, de masse volumique $1,11 \text{ g/cm}^3$ à la température ambiante, de viscosité 20 dPa.s , de résistance à la traction de 45 MPa et de celle à la compression comprise entre 50 et 150 MPa . Cette résine comme toutes les résines synthétiques est insoluble dans l'eau. Les additifs qui sont un accélérateur et un durcisseur ont été fournis sous forme de liquide dans des flacons. Un film PVA servant d'isolant de résine a été employé pour éviter le collage entre la résine et la moule. Les renforts sont constitués de fibres de verre E courtes utilisées sous deux formes : injectées de façon aléatoire dans le volume de la matrice et en tissu sous forme de stratification. Leurs propriétés physique et mécanique sont données par le fabriquant :

- ✓ Longueur de la fibre40 mm.
- ✓ Densité $2,6 \text{ g/cm}^3$.
- ✓ Module de Young80 GPa.
- ✓ Contrainte à la rupture 2400 MPa
- ✓ Point de fusion $200 \text{ }^\circ\text{C}$.
- ✓ Allongement à la rupture $3,5\%$.
- ✓ Diamètre de la fibre $15 \text{ }\mu\text{m}$

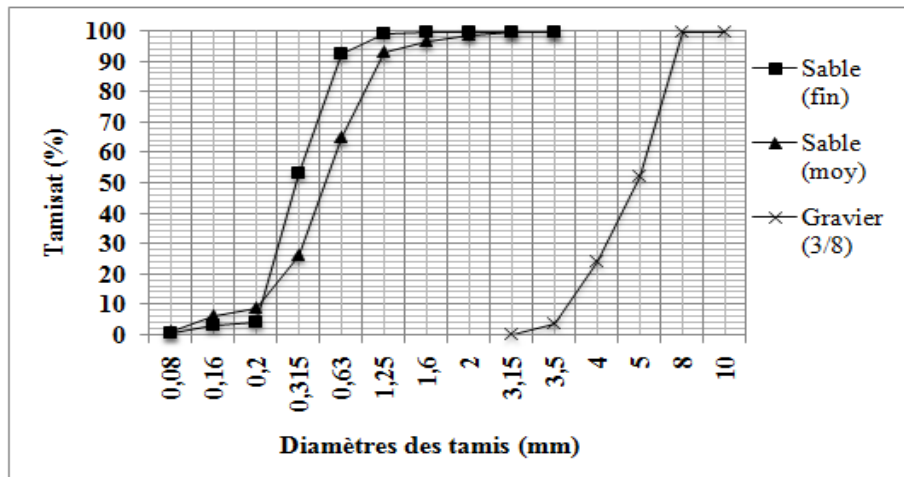


Figure 1 : Courbes granulométriques des sables et du gravier utilisés

2.2. Dispositifs d'essais

Deux types d'éprouvettes ont été utilisés :

- des éprouvettes prismatiques de dimensions $40 \times 40 \times 160 \text{ mm}^3$ pour l'essai de traction par flexion trois points.
- les demi- éprouvettes obtenues après l'essai de flexion sont alors réintroduites dans un dispositif métallique approprié muni de plaques d'acier standard permettant de régler les surfaces d'écrasement en contact avec les plateaux de la machine à $4 \times 4 \text{ cm}^2$, puis testées en compression. Cette procédure est adoptée afin d'avoir des éprouvettes ayant été fabriquées et moulées dans les mêmes conditions pour les deux types de sollicitation.

Il est à signaler que les échantillons sont décoffrés après une durée de 24 heures puis préalablement séchés à $40 \text{ }^\circ\text{C}$ avant d'être testés.

L'essai de flexion trois points a été mené sur une machine de flexion Controlab de type controls C0010/F de capacité 50 KN , dotée d'un montage de flexion trois points spécifique, à chargement manuelle, à une vitesse lente et constante. La distance entre les appuis constitués par des rouleaux en acier est de 100 mm . La force appliquée croît régulièrement de manière continue jusqu'à la rupture totale de l'échantillon. La figure 2 montre le dispositif utilisé.

La résistance à la flexion est calculée par la formule classique de la résistance des matériaux à savoir :

$$R_f = (3PL/2bh^2).$$

P, L, b et h représentent respectivement la force enregistrée au moment de la rupture, la distance entre les appuis prise égale à 100 mm , la largeur et la hauteur de l'éprouvette. Il est à signaler que cette formule tirée de la théorie des poutres donne une approche satisfaisante de la résistance à la flexion qui représente selon la norme

NF EN ISO 178, la contrainte locale de la matière au niveau des fibres externes dans la section de l'éprouvette à l'aplomb de la charge. Dans le cas de l'éprouvette considérée dans cette étude, de section transversale carré avec un rapport $(h/L) = 4$, l'approximation utilisée pourrait être bonne dans la mesure où nous supposons que son élancement répond aux deux hypothèses fondamentales de la théorie des poutres, ce qui permet de négliger l'effet du cisaillement transversal.

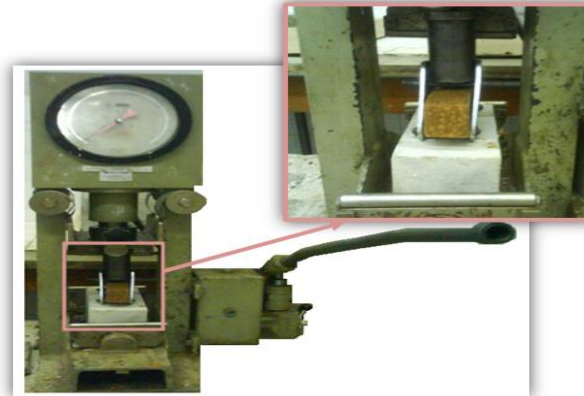


Figure 2: Dispositif de flexion 3 points

Les essais de compression ont été conduits sur une presse de compression de capacité 50 t (figure 3). Il s'agit de déterminer la contrainte de compression conduisant à l'écrasement d'une demie- éprouvette de micro béton de résine. La résistance à la compression R est donnée par la formule : $R_c = P/S$.

P et S représentent respectivement la charge enregistrée au moment de la rupture et la section comprimée de l'éprouvette prise égale à $40 \times 40 \text{ mm}^2$.



Figure 3: Dispositif et appareillage de compression

3. Formulation

Pour obtenir la saturation du mortier, il a été procédé à la variation du taux de résine par pas. Le pourcentage de résine est choisi par rapport au poids du sable. Le principe général de la détermination du taux de résine optimal pour saturer le mortier se base sur diverses expérimentations débutant avec 10% de taux de résine et se poursuivant à chaque fois avec un pas de 5%. Afin de s'assurer d'une « mouillabilité » satisfaisante, il a été opté de façon empirique pour une valeur moyenne se situant entre 25% (mortier ferme et non totalement saturé) et 30% de résine (mortier plastique avec une pâte liquide indiquant une sursaturation). Ainsi, le taux moyen de 27 % situé entre ces deux expérimentations a été adopté comme point de saturation optimisé [16]. Ce taux se situe dans la plage rapportée par J.P. Gorninski et al. [4] sur différents bétons de résine fabriqués et pourrait probablement être lié à la granulométrie des deux sables utilisés.

3.1. Préparation des bétons de résine

Les matériaux ont été fabriqués en mélangeant la résine polyester et le durcisseur d'abord puis en incorporant ensuite les granulats. Les différentes formulations des bétons de résine ont ainsi consisté à fixer les taux des sables à 60% de sable fin et à 40% de sable moyen, celui de la résine à 27% et celui du durcisseur à 2,4% et à faire varier le taux du rapport gravier / sable noté G/S par pas de 0,5. Le pourcentage de résine est évalué par

rapport au poids du mélange (sable + gravier). Le procédé de préparation des bétons de résine a consisté d'abord à mélanger à sec les sables et le gravier dans un récipient tout en respectant le dosage des constituants pour un rapport G/S donné. Le mélange de résine et de durcisseur préparé séparément est alors versé en premier et l'ensemble est malaxé rapidement afin d'éviter la cristallisation brusque. L'opération est menée jusqu'à l'homogénéisation assurant une bonne répartition des différents constituants. Le moulage est alors effectué en procédant par étaler par couche de 1 cm le béton de résine dans un moule métallique préalablement induit d'huile afin d'éviter le collage du béton sur les parois ainsi que la ségrégation. La procédure est répétée jusqu'au remplissage du moule. Quatre formulations de bétons ont été adoptées et expérimentées, correspondantes respectivement aux rapports G/S = 0,5 ; 1 ; 1,5 et 2. Le démoulage des éprouvettes est effectué après 24 heures de conservation de ces dernières dans l'eau.

Le mélange composé d'une proportion de sable fin à 60%, et de sable moyen à 40% qui semble être cohérente par rapport à la théorie de la compacité maximale des milieux granulaires et du rapport G/S égal à 1 est apparu comme étant celui optimal à prendre comme référence dans la formulation des bétons de résine fabriqués renforcés de fibres. Ce mélange donne les meilleurs résultats de résistance en traction par flexion et en compression comme rapporté dans une étude précédente [16].

3.2 Préparation des Bétons de résine à base des fibres de verre E

3.2.1 Renfort aléatoire

La méthode de conception est similaire à la méthode de préparation du micro-béton déjà adoptée à la différence qu'au début de la préparation du mélange on additionne les fibres, et on fait varier leurs taux d'addition par rapport au liant "résine". Quatre pourcentages de taux de fibres injectés de façon aléatoire dans le mélange ont été expérimentés à savoir : 1% ; 2% ; 3% et 4%. La figure 4 illustre un exemple d'échantillon des fibres de verre courtes E utilisées.



Figure 4 : Fibres de verre E aléatoires

3.2.2 Renfort tissu

Deux modes de renforcement ont été utilisés :

- des bétons à base des fibres constituées de deux couches étalées sous forme de tissu à l'intérieur de l'échantillon et à égale distance des extrémités, séparées par une couche intermédiaire de résine comme l'indique la figure 5. Celle-ci montre le tissu de verre utilisé sous forme de bande ainsi que la schématisation de la stratification au sein de l'échantillon.



Fibre tissée	Résine	H/3
Fibre tissée	Résine	H/3
	Résine	H/3

Figure 5 : Tissu de verre utilisé et schéma de la disposition de la stratification au sein de l'éprouvette

- des bétons à base de fibres constituées de trois couches étalées sous forme de tissu uniquement dans la zone tendue. La procédure précédente est renouvelée pour concevoir un stratifié à la différence que dans cette étape la distance entre les tissus est changée et les couches de tissu sont uniquement concentrées dans la zone tendue comme l'illustrent les figures 6 et 7.



Figure 6 : Emplacement du tissu dans la zone tendue

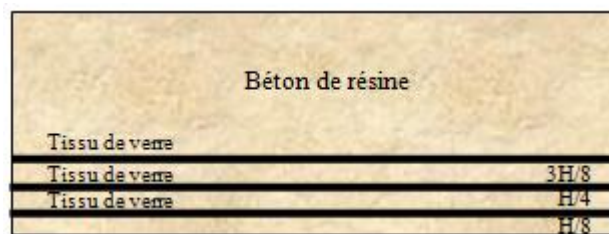


Figure 7 : Schématisation de la stratification dans la zone tendue

4. Résultats et discussions

4.1 Courbes charge - déplacement

Les figures 8 et 9 montrent des exemples types de relevé de courbe charge-déplacement obtenu en flexion trois points pour un béton de résine non renforcé et un béton de résine renforcé de 4% de fibres de verre E. Tous les autres bétons de résine renforcés de fibres de verre expérimentés montrent le même comportement et les courbes charge-déplacement la même allure. Ces courbes sont linéaires du début jusqu'à la ruine brutale de l'échantillon traduisant le comportement élastique fragile de ces matériaux. La fracture soudaine est toujours accompagnée d'un bruit craquant. Il faut signaler que la première partie concave de la courbe correspond à un réarrangement de l'éprouvette dans le dispositif expérimental avant la stabilisation totale de l'ensemble et son alignement. La même allure de courbe est relevée lors des essais de compression.

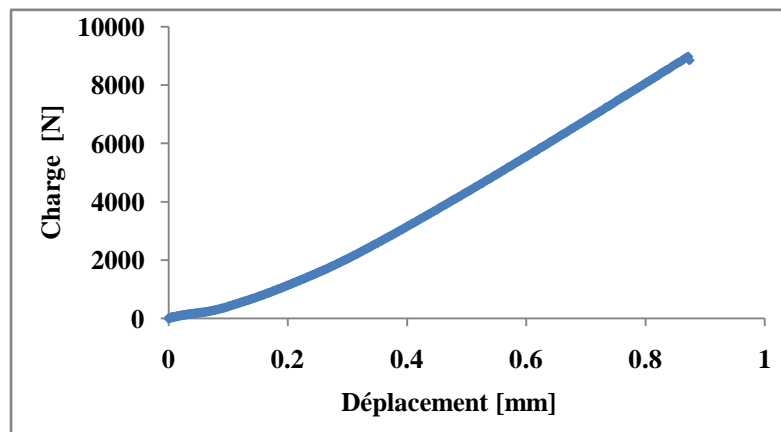


Figure 8 : Courbe charge-déplacement d'un béton de résine sans fibre, en flexion trois points

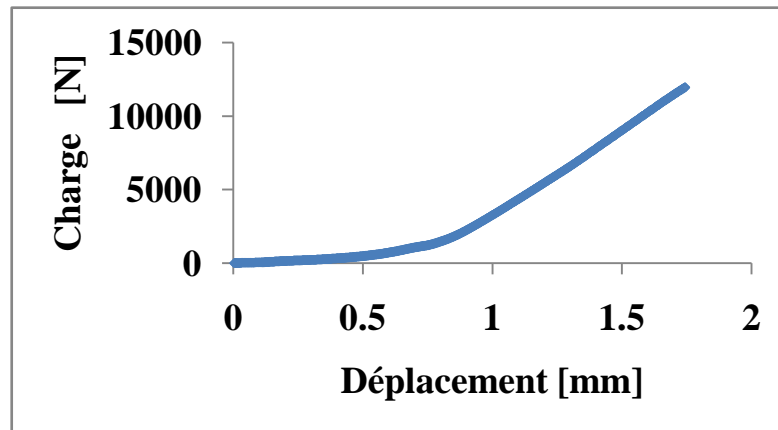


Figure 9 : Courbe charge-déplacement d'un béton de résine avec 4% de fibres de verre E, en flexion trois points

4.2 Résistances à la compression et à la flexion des bétons de résine polyester

Les résultats obtenus de la résistance à la compression et à la traction par flexion des bétons de résine polyester sans renfort et renforcés avec des fibres de verre E sont regroupés dans le tableau 1. Les chiffres entre parenthèses représentent les écarts-types calculés et ceux en pourcentage les coefficients de variation qui mesurent le degré de dispersion.

Tableau 1 : Résistances mécaniques des bétons à base de fibres de verre E.

Vf (%)	0% de fibres	1% de fibres	2% de fibres	3% de fibres	4% de fibres
Résistance flexion(MPa)	27,5 ± (1,68) (6%)	27,5 ± (1,8) 6,5%	29 ± (1,27) 4,4%	31 ± (1.80) 5,8%	33 ± (0.37) 1,1%
Résistance compr (MPa)	118 ± (1,40) (1,2%)	121 ± (1,94) 1,6%	127 ± (2.65) 2,1%	133 ± (2.48) 1,9%	144 ± (2.08) 1,5%

Les résultats expérimentaux se distinguent par une dispersion comme il fallait s'y attendre caractéristique de ces matériaux granulaires et qui est due en grande partie au caractère hétérogène de ces derniers. En effet les éprouvettes sont nominalelement non identiques dans la mesure où elles montrent un aspect aléatoire de la distribution du taux de fibres et de leur orientation qui ne sont pas uniformes, une densité de la porosité et de sa distribution qui diffèrent d'un échantillon à un autre, une hétérogénéité de la structure et des compositions locales qui peuvent être aussi différentes d'une éprouvette à une autre.

Par ailleurs une observation de la microstructure des bétons de résine fibreux permet de révéler deux types de dispersion liés à la présence de zones riches en matrice et de zones riches en renfort fibreux. Ainsi la distribution des contraintes dans les fibres, sur les interfaces et dans la matrice est très sensible à la distribution de fraction volumique locale. Par conséquent les cinétiques d'évolution de l'endommagement et de la rupture seront fortement modifiées de part les variations significatives de contraintes locales. D'autre part, la présence de porosités plus ou moins marquées, plus ou moins volumineuses et dans certains cas plus ou moins rapprochées des fibres et même localisées pour certaines sur les interfaces provoque localement une variation de contrainte locale relativement importante.

Tous ces phénomènes conjugués à d'autres comme la nature des essais mécaniques et leur conduite conduisent à un mécanisme de rupture dans ces composites qui peut s'amorcer à différents niveaux de contraintes selon l'orientation, la localisation, la densité et les dimensions des défauts ainsi que selon la qualité de l'interface fibre-matrice. Signalons tout simplement que la dispersion observée sur les résultats des essais de compression est faible par rapport à celle observée sur les essais de flexion. La nature facile de la mise en oeuvre de l'essai de compression est un paramètre important qui lui évite l'ensemble des erreurs parasites de manipulation comme le mauvais alignement de l'axe de l'éprouvette avec l'axe de la machine, les défauts et les difficultés de serrage des éprouvette au niveau des mors de traction, l'apparition de moments fléchissants parasites etc...constatés dans les autres essais comme ceux de traction directe, de flexion ou de cisaillement [17]. Les valeurs des résistances obtenues rentrent dans les plages des valeurs données par la littérature scientifique et sont ainsi concordantes. H.G. Nguyen [18] rapporte pour le cas des bétons de résine polyester des plages allant de 50 à

150 MPa pour la résistance à la compression, de 8 à 25 MPa pour celle à la traction directe et de 15 à 45 MPa pour celle à la flexion. Pour cette dernière sollicitation, M. Haider et E. Ghorbel [19] obtiennent la valeur de 25,5 MPa sur un béton contenant une fraction massique de 9% de résine époxyde. P. Novoa et al [5] testant un béton de résine époxyde réticulée avec de l'amine en flexion aboutissent à des valeurs de la résistance de l'ordre de 36 MPa.

4.3 Influence du taux des fibres de verre sur les performances des bétons de fibres

Les résultats de mesure du tableau 1 sont illustrés sur la figure 10. Les résistances mécaniques en flexion et en compression augmentent de façon monotone avec l'augmentation du pourcentage massique des fibres de verre. Une augmentation lente de la résistance à la traction par flexion en fonction du taux de fibres par rapport à celle plus nuancée de la résistance à la compression est observée. Par ailleurs, les fibres influencent de façon positive la ductilité de béton de résine comme le révèlent les exemples des modes de rupture et améliorent ses performances.

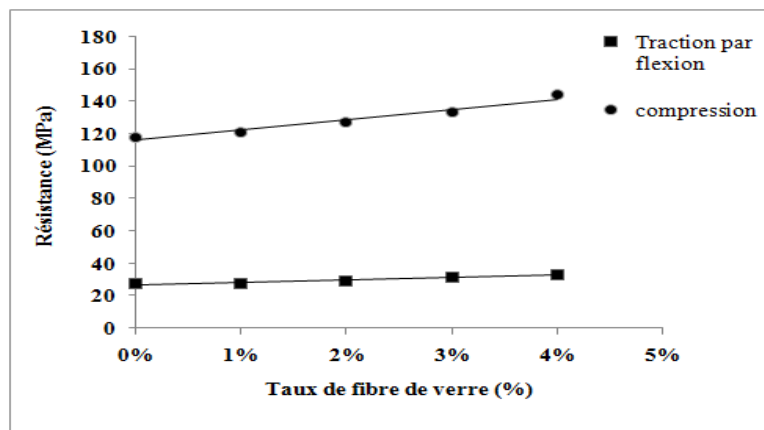


Figure 10 : Evolution des résistances en flexion et en compression en fonction du taux de fibres de verre

4.4. Modélisation du comportement

Comme le révèle clairement la figure 10, les points expérimentaux sont approximativement disposés selon une droite pour les deux types de sollicitations. Les régressions linéaires effectuées sur ces points sont données par les équations suivantes :

$$\text{En flexion : } \sigma_c = 145.V_f + 27 \quad (\text{cr} = 0,926)$$

$$\text{En compression : } \sigma_c = 640.V_f + 116 \quad (\text{cr} = 0,954)$$

σ_c représente la contrainte à la rupture du composite béton de résine fibré. Les coefficients de corrélation (cr) sont satisfaisants et très proches de 1 traduisant ainsi la bonne approche.

L'ordonnée à l'origine de ces droites de régression permet d'estimer la valeur calculée de la contrainte à la rupture de la matrice σ_m pour chaque type de sollicitation et qui est comparée à celle mesurée expérimentalement dans le tableau 2. L'écart entre la valeur expérimentale et celle théorique est faible pour les deux cas et apparaît non significatif. La comparaison est ainsi raisonnable.

Tableau 2 : Valeurs des résistances mesurée et calculée

Type de sollicitation	σ_m mesurée [MPa]	σ_m théorique [MPa]
Flexion 3 points	27,5	27
Compression	118	116

Il est à signaler que la prévision des propriétés de rupture des matériaux composites en général et de ceux granulaires à matrice polymère comme les bétons de résine renforcés de fibres courtes orientées au hasard est encore un domaine très mal maîtrisé à cause principalement de la complexité des mécanismes de déformation à l'échelle microscopique. De plus, la mauvaise connaissance de certaines caractéristiques structurales comme la distribution de longueur et d'orientation des fibres après la mise en forme ou après le malaxage pour les bétons

de résine ainsi que les origines multiples des initiateurs de rupture compliquent davantage le problème. La rupture peut se produire différemment selon l'orientation, la fraction volumique et la densité des renforts, la qualité de l'interface granulat-matrice et fibre-matrice ainsi que la nature des résines utilisées.

Les différentes approches mécaniques proposées dans la littérature scientifique sont généralement peu vérifiées par l'expérience et restent physiquement suspectes et discutables car elles ne prennent pas en compte des paramètres importants tels que le rapport d'aspect longueur/diamètre de la fibre, la longueur des fibres, la concentration des contraintes en bout de fibres. L'écart entre les prévisions théoriques et les résultats expérimentaux est aussi aggravé souvent par la forte anisotropie dans ces matériaux induite par les méthodes de fabrication. De nombreux chercheurs se basant sur des hypothèses différentes exigeant souvent une analyse de la microstructure ainsi que l'identification et la connaissance de certains paramètres caractérisant la nature et la répartition spatiale des différents composants proposent alors de décrire les résultats expérimentaux par des modèles empiriques relatifs aux matériaux bétons hydrauliques cimentaires étudiés [20,21,22]. Dans notre cas, l'approche de la modélisation du comportement à partir des équations de régressions linéaires se fonde sur la méthode d'homogénéisation qui permet d'estimer et de prédire les propriétés macroscopiques du composite béton de résine renforcé de fibres de verre à partir des propriétés mécaniques de base des principales phases qui le constituent à savoir la matrice constitué du béton de résine polyester et le renfort constitué de fibres de verre courtes E. L'objectif est de remplacer le matériau hétérogène réel par un matériau homogène équivalent ayant la même structure à l'échelle macroscopique. Ainsi, en utilisant la forme générale de la loi d'homogénéisation des mélanges en traction, la contrainte de rupture σ_c d'un matériau composite renforcé de fibres courtes orientées au hasard est donnée en fonction des caractéristiques des constituants par l'équation :

$$\sigma_c = K \cdot \sigma_f \cdot V_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m$$

σ_f et σ_m sont respectivement les contraintes de rupture de la fibre et de la matrice.

V_f et V_m représentent respectivement les fractions volumiques de la fibre et de la matrice.

K est un paramètre représentant la combinaison de deux coefficients : l'un d'orientation dû à la distribution isotrope des fibres dans le plan et l'autre d'efficacité de longueur de fibres et qui est lié surtout à la qualité des interfaces fibre-matrice et granulat matrice [23, 24, 25].

Cette équation qui peut être adaptée au cas de la compression et de la flexion, peut aussi s'écrire :

$$\sigma_c = (K \cdot \sigma_f - \sigma_m) \cdot V_f + \sigma_m$$

Par analogie avec les équations de régression linéaire des droites de la figure 10, la prévision du comportement mécanique à la rupture des bétons de résine peut être traduite en adoptant comme contrainte à la rupture de la fibre de verre la même valeur en flexion et en compression à savoir $\sigma_f = 2400\text{MPa}$ correspondante à la rupture d'un fil silicone industriel [26].

En flexion, en adoptant σ_m égale à 27 MPA, le comportement à la rupture des bétons de résine polyester peut ainsi être approché par le modèle empirique suivant :

$$\sigma_c = 0,049 \sigma_f \cdot V_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m$$

La valeur du coefficient K égale à 0,049 est très inférieure à celle de 3/8 rapportée par la littérature dans le cas général de prévision du comportement à la rupture des matériaux composites traditionnels à renforts fibreux orientés au hasard soumis à la traction directe [27].

Cette divergence est probablement la conséquence de nombreux paramètres difficiles à identifier. On notera toutefois que dans notre cas, la différence peut s'expliquer en partie par la nature de la matrice qui est en microbéton ainsi que par la nature de la sollicitation qui est la flexion.

En compression et en prenant σ_m égale à 116 MPA, le modèle s'écrit :

$$\sigma_c = 0,218 \sigma_f \cdot V_f + (1 - V_f) \cdot \sigma_m$$

Ces modèles empiriques peuvent être utilisés dans un souci d'efficacité pour les utilisateurs industriels ainsi que pour les chercheurs, techniciens et ingénieurs des laboratoires pour comparer, optimiser et évaluer le comportement des différents bétons de résine composés.

4.5 Influence du tissu des fibres sur la résistance des bétons de résine polyester

Les résultats obtenus de la résistance à la compression et de celle à la traction par flexion ainsi que les écarts types en fonction du renforcement par le tissu des fibres sont regroupés dans le tableau 3. Sur ce tableau et à titre de comparaison sont rajoutés les résultats relatifs au béton de résine renforcé avec 4 % de fibres de verre disposées de façon aléatoire dans le volume. Les chiffres entre parenthèses indiquent les coefficients de variation.

Tableau 3 : résistances mécaniques des bétons à base de fibres de verres E sous forme de tissu

Résistance des bétons de résine renforcés (MPa)	Béton de résine : 2 couches de tissu de verre (au milieu)	Béton de résine : 3 couches de tissu de verre (zone tendue)	Béton de résine :4% de fibres injectées de façon aléatoire
Flexion	34 ± (1,67) (5%)	59 ± 1.49 (2,5%)	33 ± 0.37 (1,1%)
Compression	83 ± (3.67) (4,5%)	85 ± 1.02 (1,2%)	144 ± 2.08 (1,5%)

Les résultats se caractérisent par une dispersion due essentiellement comme il a été rapporté au caractère hétérogène de ces matériaux. Cette dispersion n'est toutefois pas importante et elle est de l'ordre de 5% au maximum. Ces résultats sont illustrés par l'histogramme de la figure 11.

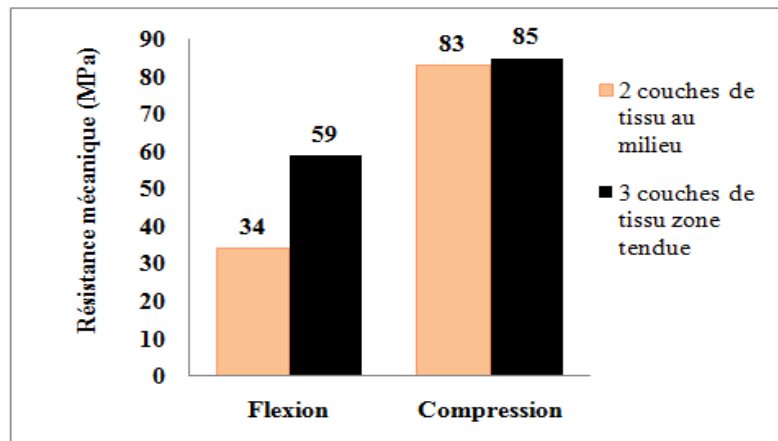


Figure 11 : Histogramme des résistances

Il semble que la résistance à la flexion est améliorée avec un renforcement de trois couches de tissu de verre dans la zone tendue qu'avec deux couches au milieu ou qu'avec un taux de renforcement aléatoire de 4%. Le rapport est d'environ 1,8. Les deux derniers modes de renforcement sont comparables. D'autre part et au vu de la dispersion mécanique des résistances et des écarts types enregistrés, la résistance à la compression ne montre pas d'évolution significative dans les deux cas de mode de renforcement par le tissu de verre. Par contre une augmentation de 70% est enregistrée sur la résistance à la compression obtenue avec un taux de renforcement aléatoire de 4% par rapport à celle obtenue avec le renforcement par trois couches de tissu.

4.6 Modes de rupture

Les illustrations des figures 12, 13, 14, et 15 montrent des exemples de modes de rupture observés sur des éprouvettes rompues en flexion pour les différents renforcements.



Figure 12 : Exemple du mode de rupture d'un béton de résine sans fibres en flexion 3 points



Figure 13 : Mode de rupture en flexion 3 points d'un béton de résine renforcé de 4% de fibres injectée de façon aléatoire



Figure 14 : Mode de rupture en flexion 3 points d'un béton de résine renforcé de deux couches de tissu de verre au milieu



Figure 15 : Mode de rupture en flexion 3 points d'un béton de résine avec trois couches de tissu de verre dans la zone tendue

Comme on peut le constater, le béton de résine sans renfort montre une rupture franche qui se produit au milieu de l'échantillon sans aucune bifurcation significative du trajet. L'aspect et la forme des faciès sont clairs et sont indicateurs d'une rupture soudaine et fragile comme le montre la figure 7.

Concernant le renfort aléatoire, celui-ci donne aussi une rupture centrale au milieu. Le chemin de la fissuration se fait au niveau de l'appui central. Dans le cas des fibres avec des couches disposées au milieu de l'éprouvette, le même mécanisme est aussi constaté. Pour le cas du renforcement avec des couches disposées dans la zone tendue on assiste plutôt à un délaminage qui s'opère dans cette région et qui évolue transversalement à travers la longueur de l'échantillon. Les illustrations des figures 16 et 17 montrent des modes de rupture en compression des éprouvettes testées. Dans le cas de cette sollicitation, les mécanismes de fissurations observés semblent être les mêmes aussi bien ceux observés sur les bétons de résine non fibrés que ceux sur les bétons renforcés de fibres. On assiste beaucoup plus à des craquelures multiples éparpillées un peu partout dans le corps des éprouvettes. Ce mécanisme est différent des fissurations longitudinales généralement observées en compression dans les bétons traditionnels et dans les mortiers cimentaires.



Figure 16 : Exemple de mode de rupture en compression d'un béton de résine sans fibres



Figure 17 : Exemple de mode de rupture en compression d'un béton de résine renforcé de 3% de fibres de verre injectée de façon aléatoire.

4.7. Observations microscopiques de la structure

Des échantillons découpés sur le facies de rupture des demis éprouvettes rompues en flexion ont été observés au MEB et analysés. La figure 18 montre un exemple des observations effectuées en électrons rétro diffusés. Cette microanalyse dans le carré mauve illustre une micro particule sable et résine.

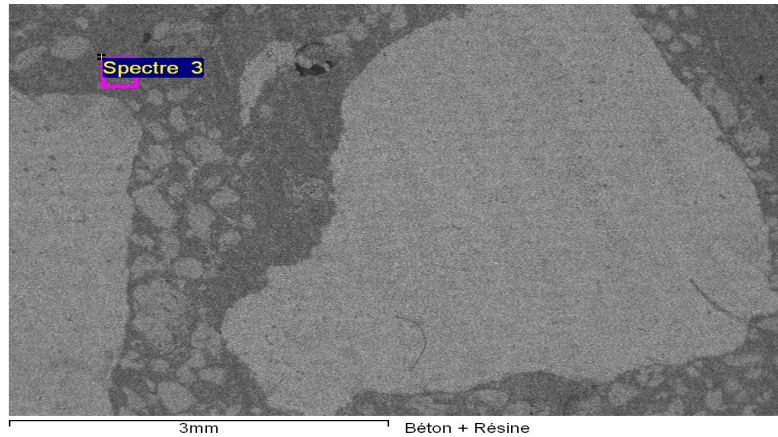


Figure 18 : micro particule sable résine

L'analyse du spectre 3 et la microanalyse EDS effectuées permettent de vérifier la nature des composants des microparticules sable résine et révèlent ainsi la présence de traces de calcite (Ca K) et de silice (Si K) caractérisées par des pics intenses de ces éléments. Les résultats d'identification de ces éléments sont illustrés par la figure 19. Le pourcentage quantifié de ces éléments est donné dans le tableau 4. La calcite qui reste l'élément prédominant affiche un pourcentage en masse moyen de 5,4 fois supérieur et un pourcentage atomique moyen de 3,78 fois supérieur à ceux de la silice respectivement.

Tableau 4 : Pourcentage quantitatif des éléments du spectre 3

	%Masse	%Atomique
O K	78.47	89.54
Si K	3.38	2.19
Ca K	18.15	8.27
Totaux	100.00	

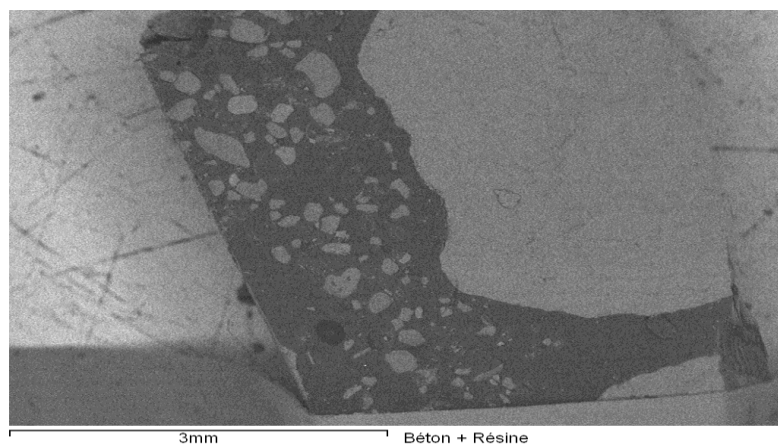


Figure 19: Nature des éléments composant les microparticules sable-résine

La figure 20 montre des observations réalisées en électrons rétro diffusés. Ces microanalyses mettent clairement en relief l'aspect du contact de la résine avec les poussières de sable et de granulat.

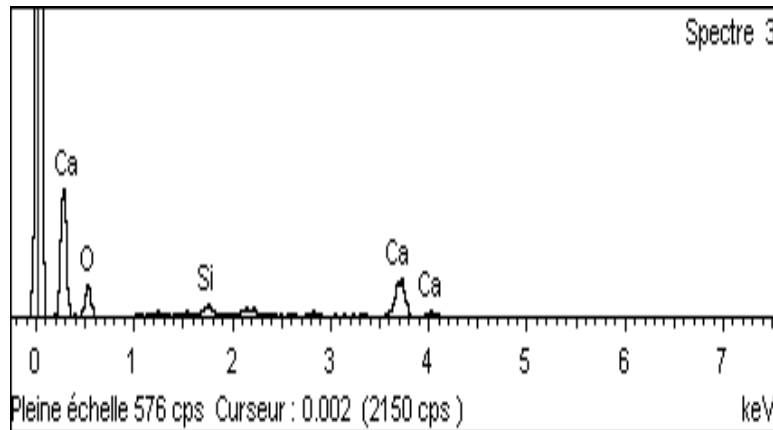


Figure 20 : Aspect du contact résine – poussières de sable et de granulat

Des exemples d'observations en électrons secondaires réalisées montrent le caractère compact des contacts granulat résine. L'adhérence est correcte et se caractérise par une absence de microfissures comme le révèle la microphotographie de la figure 21. En général et comme il a été rapporté dans une précédente étude, les ruptures des échantillons des bétons de résine sont traversantes à l'intérieur des granulats [16]. Il est à signaler que les pores à l'intérieur du béton de résine sont les espaces occupés par les bulles d'air qui apparaissent et se forment surtout lors du malaxage et qu'il est très difficile d'évacuer lors de la préparation des corps d'éprouvettes.

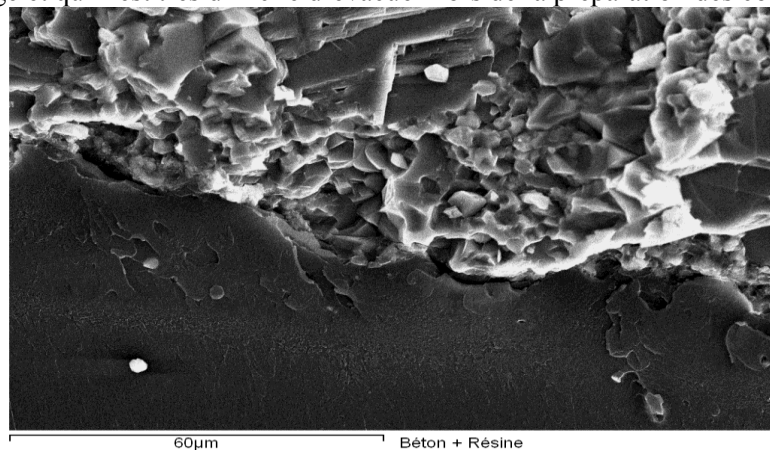


Figure 21: Compacité du contact granulat résine et absence de microfissures

Conclusion

Le béton de résine polyester apparaît comme un matériau innovant qui peut remplacer le béton ordinaire dans plusieurs domaines et notamment pour la réparation des ouvrages endommagés, pour la décoration et le revêtement extérieur des murs ainsi que pour la réalisation d'éléments structuraux exposés à des agressions chimiques et climatiques.

L'optimisation de sa formulation qui se base sur le principe du point de saturation des sables avec la résine a permis d'obtenir des produits avec des caractéristiques mécaniques en flexion et en compression performantes. Celles-ci sont comparables à celles rapportées dans la littérature pour cette catégorie de matériaux et meilleures que celles généralement mesurées sur les bétons hydrauliques classiques ordinaires à matrice cimentaire. Dans cette étude il a été opté pour un taux de résine de 27% comme point de saturation et un taux de durcisseur de 2,4% par rapport au pourcentage de la résine. Le mélange de 60% de sable fin et de 40% de sable moyen est apparu comme étant le mélange optimal à prendre comme référence dans la formulation des bétons de résine avec un rapport Gravier /Sable noté G/S égal à 1.

L'incorporation des fibres de verre dans la composition des bétons de résine par pas de taux de 1% montre que l'augmentation de la fraction volumique des fibres influe de façon positive sur les résistances mécaniques à la flexion et à la compression de ces matériaux. Des modèles empiriques basés sur les méthodes d'homogénéisation et prenant en compte les caractéristiques spécifiques des constituants permettent la prévision du comportement à la rupture des bétons de résine en fonction du taux de renfort avec une bonne probabilité.

Les observations microscopiques de la microstructure et les analyses EDS réalisées révèlent la présence de calcite et de silice ainsi que le caractère compact des contacts de la résine avec les granulats ou avec les poussières de sable. L'adhérence est correcte et se caractérise par une absence de microfissures. Ainsi, les résultats obtenus permettent d'ouvrir la voie pour l'emploi des fibres de verre dans la fabrication des bétons de résine pour l'amélioration notamment de la ductilité de ce type de matériau composite appelé à avoir une place intéressante et importante dans le marché des matériaux de construction de grande diffusion.

Remerciements-Les auteurs remercient le service CMEBA de l'Université de Rennes 1 (France) pour la réalisation de certaines études microscopiques au MEB ainsi que le personnel technique et administratif du département de Génie Civil de l'INSA de Rennes (France) pour toutes les facilités accordées et pour sa constante disponibilité.

References

1. Chen B., Liu J., *Constr. and Build. Mater.* 21 (2007) 7.
2. Ohama Y., *Proc. of the 13th ICPIC*, Portugal, (2010), 1.
3. Gorninski J.P., Dal Molin D.C., Kazmierczak C.S., *Cem. and Concr. Resear.* 34 (2004) 2091.
4. Gorninski J.P., Dal Molin D.C., Kazmierczak C.S., *Const. and Build. Mater.* 21 (2007) 546.
5. Nóvoa P., Ribeiro M., Ferreira A., Marques A., *Comp. Scien. and Technol.* 64 (2004) 2197.
6. Blaga A., *Dig. de la constr. au Canada 159F* Ottawa (1975).
7. Blaga A., *Dig. de la constr. au Canada 157F* Ottawa (1975).
8. Blaga A., Beaudoin J.J., CBD-242-F- *Dig. de la constr. Canada /Publication de l'IRC-CNRC*, (1986).
9. Haidar M., Ghorbel E., Toutanji H., *Constr. and Build. Mater.* 25 (2011) 1632.
10. Elaloui O., Ghorbel E., Mignot V., Ben Ouezdou M., *Constr. and Build. Mater.* 27 (2012) 415.
11. Kherbache S., Bouzidi N., Bouzidi M.A. Moussaceb K. Tahakourt K., *J. Mat. Enviro. Sci.* 7 (1) (2016) 18.
12. Agavrioloaie L., Oprea S., Barbuta M., *Constr. and Build. Mater.*, 37, (2012)190.
13. Dreux G., Festa J., Ed. Eyrolles Paris France (1983).
14. Heidari-Rarani M., Aliha M.R.M., *Journ. of Constr. and Build. Mater.*, 4 (2014) 308.
15. Verma D., Gope P.C., Shandilya A., Gupta A., Maheshwari M.K., *J. Mat. Enviro. Sci.* 4 (2) (2013) 263.
16. Mirouzi G., Redjel B., Jauberthie R., *Rev. Nat. & Tech. A- Sci. Fond. et Eng.*, n°09/Juin (2013) 19.
17. Chellali F., Redjel B., *Algér. – Equip., Rev. Tech. de l'ENTP* 41 Mai (2006) 16.
18. Nguyen H.G., *thèse de Doctorat Génie Civil* Université Cergy Pontoise France, 29 Septembre (2008).
19. Haidar M., Ghorbel E., 26^{ème} rencontre universitaire de génie civil Nancy France 4-6 Juin (2008).
20. Oucief H., *thèse de Magister* Institut de Génie Civil Université de Annaba (Algérie), 16 Mars (1992).
21. Harouche N., *thèse de doctorat* Université Paris VI (France), (1989).
22. Casanova P., *thèse de doctorat* Ecole Nationale des Ponts et Chaussées Paris France (1995).
23. Rehailia H., *thèse de Magister* Institut de Génie Civil Université de Annaba Algérie Juin 1992.
24. Swamy R.N., Mangat P.S., *Cem. and Concr. Resear.* 3 Mai (1974) 451.
25. Swamy R.N., *Matér.et Constr.* 45 Mai-Juin (1975) 235.
26. Berthelot J.M., Editions TEC & DOC Lavoisier 4^e édition, ISBN : 2-7430-0771-0, Paris France (2005).
27. Pigott M.R., *Prog. Sci. Eng. Comp.* Ed. T. Hayashi, K. Kawata, S.Umekawa, ICCM-IV Tokyo (1982).

(2016) ; <http://www.jmaterenvirosci.com>