

ÉTUDE COMPARATIVE DE DEUX COMPOSITES À MATRICE CIMENTAIRE RENFORCÉE
PAR DES FIBRES DE *BORASSUS AETHIOPUM* MART. ET DES BALLES DE RIZ

V. K. DOKO*, E. C. ADJOVI*, G. GBAGUIDI AISSE*, C. DELISEE** & P. GALIMARD**

* Laboratoire d'Énergétique et de Mécanique Appliquée, École Polytechnique d'Abomey-Calavi (Bénin), Email : dokovalery@yahoo.fr, adjed2012@gmail.com

** 12M, UMR 5295(INSIS), Unité de Bordeaux (UB1, IBP), Arts et Métiers-Paris Tech, INRA(USC 1368)

RÉSUMÉ

La présente étude s'intègre dans une problématique générale de développement de matériaux de construction innovants à impact environnemental réduit. Elle a expérimenté deux types de composite cimentaire renforcé par de la biomasse végétale faite de fibres de *Borassus aethiopum* Mart., et des balles de riz. A cet effet, des études de formulation, de compatibilité du ciment avec les biomasses, et de comportement mécanique des gâchées formulées ont été réalisées pour deux compositions granulaires de module de finesse 2,17 et 3. L'étude de compatibilité a révélé que les biomasses végétales bien n'ayant pas subi un traitement préalable sont compatibles avec le ciment CPJ35. La comparaison des caractéristiques physiques et mécaniques des deux composites nous a permis de conclure que le béton de fibres de *Borassus aethiopum* est meilleur en termes de performances mécaniques. Les valeurs des résistances mécaniques correspondantes aux rapports eau/ciment et ciment/fibres optimums sont comprises respectivement entre 5,5 et 8,37 Mpa pour le composite fibres de *Borassus aethiopum* -ciment et 3,63 et 12,25 Mpa pour le composite balles de riz-ciment en traction et 6,84 et 16,26 Mpa pour le composite fibres de *Borassus aethiopum* -ciment et 3,83 et 15,63 Mpa pour le composite balles de riz-ciment en compression.

Mots clefs : ciment, biomasse végétale, *Borassus aethiopum*, balles de riz, compatibilité, composite.

COMPARATIVE STUDY OF TWO CEMENT MATRIX COMPOSITES REINFORCED WITH
FIBERS OF *BORASSUS AETHIOPUM* MART AND RICE HUSK

ABSTRACT

The present study is integrated in general problems of development of building materials innovating with reduced environmental impact. Within this framework we proposed to study two types of cementing composite reinforced by vegetable biomass with knowing fibers of *Borassus aethiopum* and the rice husk. To this end, studies of formulation, compatibility of cement with the biomass and of mechanical and thermal behavior of the batches formulated were carried out for two granular compositions of fineness 2.17 and 3. The study of compatibility revealed that the vegetable biomass well not having undergone a preliminary treatment are compatible with cement CPJ35. The comparison of the characteristics physical and mechanical of the two composites enabled us to conclude that the fibers concrete of *Borassus aethiopum* are better in term of mechanical performances. The values of the mechanical resistances corresponding to the optimum reports/ratios water/cement and cement/fibers are included respectively between 5.5 and 8.37 Mpa for the composite fibers of *Borassus aethiopum* -cement and 3.63 and 12.25 Mpa for the composite rice husk-cement in traction and 6.84 and 16.26 Mpa for the composite fibers of *Borassus aethiopum* -cement and 3.8 and 15.63 Mpa for the composite rice husk -cement in compression.

Keywords : Cement, biomass vegetal, *Borassus aethiopum* mart, rice husk, compatibility, composite.

INTRODUCTION

Le rônier encore appelé *Borassus aethiopium* Mart. est une plante ligneuse « monocotylédone » classée plante prioritaire en Afrique sub-saharienne par des experts de la FAO (FAO, 2004).

C'est une ressource renouvelable qui produit du bois de service imputrescible et résistant aux termites avec un faible taux d'absorption des fibres. Il est utilisé souvent sous forme de lattes pour réaliser les maisons à usage d'habitation par les populations rurales, et parfois celles des villes. Selon une étude expérimentale de comportement mécanique réalisée dans la perspective de l'utiliser comme armature végétale dans le béton, le *Borassus aethiopium* possède une contrainte de rupture et un module d'élasticité élevés proche de ceux de l'acier avec un taux de retrait longitudinal nul (GBAGUIDI V et al, 2010).

Le riz est une culture bien connue à travers le monde. Il est la deuxième céréale cultivée (149 000 000 ha) et la troisième produite (380 000 000 tonnes), consommée et exportée dans le monde après le blé et le maïs (MAEP, 2010). Le décorticage du riz génère beaucoup de déchets environ 30 à 40 % de balles de riz qui sont imputrescibles et hygroscopiques. Par ailleurs les balles de riz sont riches en cellulose et en cendre en particulier en silice (teneur en SiO₂ évaluée à 20 %). Ces déchets présentent un faible taux de digestibilité, ce qui explique qu'ils ne seront pas utilisés pour l'alimentation du bétail.

Dans le domaine des composites cimentaires utilisant les fibres et particules lignocellulosiques, aucun travail de recherche n'a élaboré la technologie de valorisation de fibre du *Borassus aethiopium*, bien que les forêts de *Borassus aethiopium* au Sénégal, en Gambie, au Niger par exemple exploitées pour la production du bois de service et d'œuvre génèrent des déchets fibreux. Ensuite, sur le plan de la formulation, il est nécessaire de noter qu'actuellement il n'existe pas encore de normes ou de préconisations pour les bétons de biomasse végétale.

C'est pourquoi, dans le souci de valoriser les déchets fibreux issus de l'exploitation *Borassus aethiopium* d'une part et des déchets issus des industries de décorticage du riz d'autre part, notre travail porte sur l'incorporation de ces derniers dans une matrice cimentaire afin de produire des matériaux légers entrant dans la réalisation des éléments thermiques de construction.

Diverses fibres et particules de bois d'essences diverses provenant du recyclage des déchets agricoles / d'industrie du bois ou du broyage, ont fait l'objet de plusieurs travaux relatifs à l'étude des composites cimentaires. Il s'agit des résidus de sisal, de bananier et d'eucalyptus (Savastano *et al*, 2000) ;

des fibres de palmier dattier (Kriker *et al.*, 2005), des fibres de noix de coco, de canne à sucre et de bananier (Asasutjarit *et al.*, 2007) ; des fibres de lin (Aamar Daya *et al.*, 2004) ; des fibres de diss (Merzoud *et al.*, 2007) ; copeaux de bois (Tamba *et al.*, 2007) ; particules de chanvre (Tronet *et al.*, 2001). Si l'idée d'utiliser ces biomasses végétales sous leur forme naturelle pour renforcer les matrices cimentaires est la bienvenue dans le contexte du développement durable, la faisabilité dans beaucoup de cas rencontre des échecs. Les biomasses végétales ne présentent pas une bonne compatibilité avec les liants organiques et surtout, avec le ciment Portland. La prise et le durcissement de la pâte de ciment ont beaucoup de difficulté à se développer. La réaction d'hydratation du ciment n'est pas complète, compte tenu de la présence de certains constituants dans la biomasse végétale. En effet, les sucres, tanins, phénols, chlorures et carbonates contenus respectivement dans la biomasse végétale et l'eau de gâchage ajoutée au gaz carbonique présent dans l'atmosphère à 0,03 % agissent négativement sur les différents constituants du ciment (C2S, C3S, C3A, C4AF et le gypse). Par ailleurs, la structure poreuse végétale constitue un inconvénient du fait de l'absorption très importante d'eau qui provoque une instabilité dimensionnelle du composite. Cependant, la compatibilité entre les biomasses végétales et le ciment est établie et les propriétés mécaniques sont améliorées, lorsqu'on procède à des traitements de la biomasse végétale ou de la matrice, soit par lavage et/ou par pulvérisation d'adjuvant ou renforcement avec du sable (Mougel, 1992).

Le présent travail dans un premier temps a consisté à étudier la compatibilité entre les biomasses végétales en étude et le ciment CPJ 35, afin de juger de la nécessité d'un traitement ou non des biomasses, à réaliser une série de formulations suivie de caractérisation physique, mécanique des composites fibres de *Borassus aethiopum* -ciment et balles de riz-ciment.

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Les fibres de *Borassus aethiopum* utilisées dans cette étude proviennent des déchets de débitage du tronc en lattes et du broyage des ébauches tandis que les particules de balles de riz proviennent de l'usine de décorticage du riz de Malanville située au nord du Bénin. Les fibres et particules ainsi obtenues sont séchées à l'étuve à 105°C jusqu'à stabilisation de la masse, sériées par tamisage en quatre différentes classes granulaires et mélangées selon les compositions granulaires (Figure 1) présentées sur le Tableau 1. Elles n'ont subi aucun traitement chimique et sont conservées dans un local maintenu à une température de 20°C.

Les modules de finesse du mélange fin et du mélange grossier sont respectivement 2,17 et 3,0. Leurs masses volumiques sont respectivement de

687 kg/m³ et de 771 kg/m³ pour les fibres du *Borassus aethiopum* et de 749 kg/m³ et de 648 kg/m³ pour les balles de riz.

Le ciment utilisé est de type CPJ 35 produit au Bénin par la cimenterie SCB Lafarge d'Onigbolo.

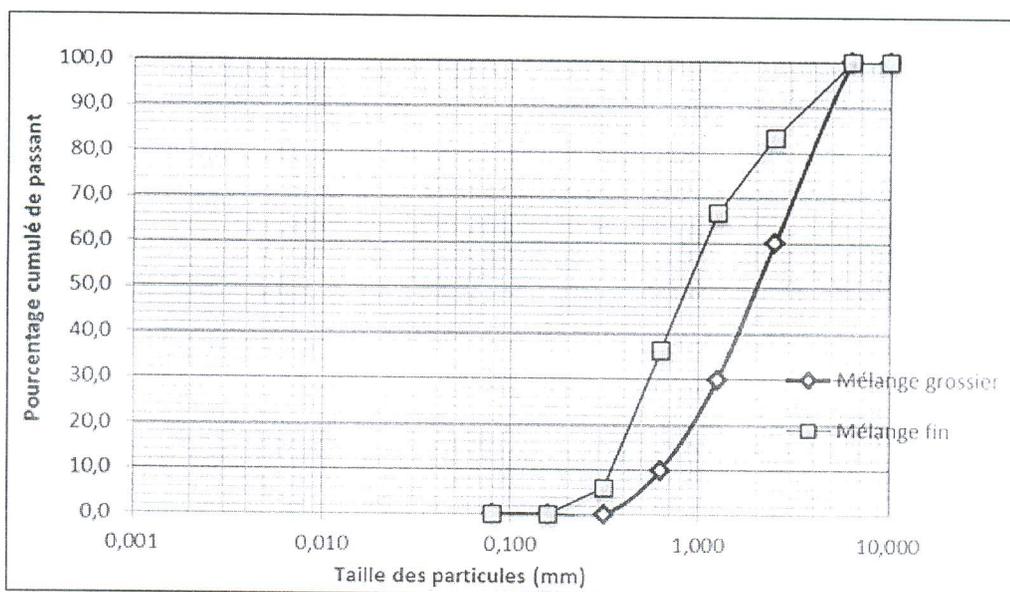


Figure 1. Courbes granulométriques des deux compositions granulaires

Tableau 1. Proportions utilisées pour les compositions granulaires

Classes Granulaires	Mélange Fin (MF)	Mélange Grossier (MG)
[2,5 ; 5[40 %	16,67 %
[1,25 ; 2,5[30 %	16,67 %
[0,63 ; 1,25[20 %	30,33 %
[0,315 ; 0,63[10 %	30,33 %

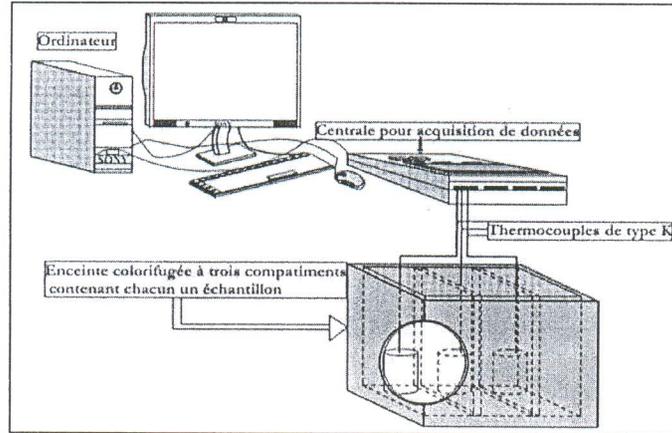


Figure 2. Dispositif de mesure de la chaleur d'hydratation du ciment par la méthode de la calorimétrie isotherme

Les gâchées réalisées pour l'étude de compatibilité entre le ciment et les biomasses végétales sont constituées de 200 g de ciment et 80 ml d'eau pour l'échantillon témoin et de 200 g de ciment, 90 ml d'eau et 15 g de biomasse végétale. Ces gâchées sont placées dans une enceinte adiabatique (Figure 2) dans laquelle on observe la vitesse d'hydratation du ciment à travers la quantité de chaleur dégagée au cours de la réaction.

La formulation des gâchées a consisté à fixer le dosage en ciment, ensuite à choisir les rapports eau de gâchage sur dosage en ciment (E/C ou k_e) adapté selon l'ouvrabilité du mélange frais par un essai de maniabilité des gâchées et enfin à déterminer la masse de granulats végétaux (R) à utiliser pour confectionner 1 m³ de gâchée.

Trois cas de dosages sont utilisés dans le présent travail. Il s'agit de 400 kg/m³, 450 kg/m³ et 500 kg/m³.

La méthode utilisée pour définir les masses des granulats à mettre en œuvre en fonction du dosage en ciment et en eau, est basée sur l'expression du volume absolu du mélange frais et des masses volumiques absolues des éléments constitutifs du composite (ρ_{br} : poids spécifique de la composition granulaire considérée ; ρ_C : poids spécifique du ciment ; ρ_e : masse volumique de l'eau)

Le volume absolu du mélange frais des différents constituants du composite est donné par l'expression (1) suivante :

$$V_{abs\ mel} = V_{abs\ ciment} + V_{eau} + V_{abs\ granulats} \quad (1)$$

Où, $V_{abs\ mel}$, $V_{abs\ ciment}$, V_{eau} et $V_{abs\ granulats}$ sont respectivement les volumes absolus du mélange frais, du ciment, de l'eau et des granulats utilisés.

Pour la caractérisation physique et mécanique des composites, trente-six gâchées ont été formulées à raison de dix-huit par composite. Pour chacune des gâchées, le ciment a d'abord été mélangé avec le granulat végétal et ensuite l'eau de gâchage a été ajoutée. Le mélange frais a été placé dans trois moules $4 \times 4 \times 16\text{ cm}^3$ tassé à l'aide de tige. Les éprouvettes ont été démoulées après vingt-quatre heures. La cure a été réalisée à l'air libre pendant vingt-huit jours. Les tests de résistances mécaniques en traction par flexion et en compression ont été réalisés conformément à la norme EN-196-1. La mesure du taux d'absorption a été réalisée conformément au protocole décrit dans le travail de Merzoud *et al.* (Merzoud *et al.*, 2007). Une fois les caractéristiques mécaniques connues, les dix-huit gâchées confectionnées pour chaque composite ont été optimisées en six-gâchées.

RÉSULTATS ET DISCUSSION

Etude de la compatibilité

La Figure 3 présente l'évolution de la température au cours des réactions d'hydratation du ciment seul, et du ciment en présence des fibres de *Borassus aethiopum* d'une part et des balles de riz d'autre part.

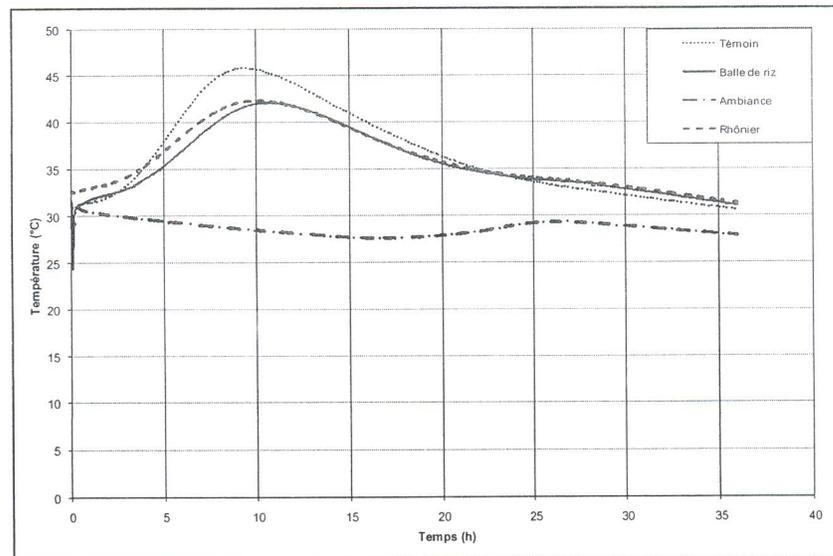


Figure 3. Courbes d'hydratation du ciment dans le témoin et en présence des fibres des biomasses végétales

Le Tableau 2 résume les différentes caractéristiques de l'hydratation du ciment dans les trois mélanges : la température maximale T_m , le temps t_m mis pour atteindre cette température, l'énergie d'hydratation A correspondant à l'aire sous la courbe et le coefficient d'hydratation C_A .

Tableau 2. Caractéristiques de l'hydratation des mélanges

Type de mélange	$T_m(^{\circ}C)$	$t_m(\text{heures})$	$A (\text{kCal})$	$C_A(\%)$
Témoin (Ciment + eau)	46,0	9,38	0,245	100
Ciment + eau + fibres de rônier	42,4	9,80	0,218	89,11
Ciment + eau + balles de riz	42,1	10,28	0,201	82,04

On constate que la présence de fibres de borassus ou de balles de riz a entraîné une baisse de la température maximale et de l'énergie calorifique dégagée au cours de la réaction d'hydratation du ciment. Cela est dû à la présence de substances organiques dans les biomasses végétales. Bien que ces dernières réduisent le degré d'hydratation du ciment, elles ne semblent avoir aucun effet considérable sur le temps nécessaire pour atteindre la température maximale. Au regard de l'échelle de comparaison présentée dans le travail de Hachmi *et al.* (1990) il ressort que les fibres de borassus et les balles de riz sont compatibles avec le ciment (car leur $C_A > 68 \%$). Ce qui nous laisse le choix d'introduire ou non dans le procédé de confection des gâchées des traitements des biomasses végétales.

Formulation et caractéristiques des composites

Exprimons les différentes composantes de la formule (1) en fonction de leur masse volumique absolue :

$$V_{abs\ ciment} = \frac{C}{\rho_C}; V_{abs\ eau} = \frac{k_e \cdot C}{\rho_e}; V_{abs\ granulats} = \frac{R}{\rho_{b,r}} \quad (2)$$

En remplaçant les expressions de (2) dans (1) et en considérant $V_{abs\ m\acute{e}l} = 1\text{m}^3$, on déduit l'expression générale de la masse des granulats.

$$R = \rho_{b,r} \cdot \left(1 - \frac{C}{\rho_C} - \frac{k_e \cdot C}{\rho_e}\right) \quad (3)$$

Connaissant les masses des granulats donnée par l'équation (3), on peut définir les rapports massiques (C/R) entrant dans la formulation des composites (Tableau 3 et Tableau 4).

Tableau 3. Formulation optimales du composite ciment-fibres de *borassus aethiopum mart* et les caractéristiques correspondantes

Rapport C/R	Formulations		Caractéristiques physiques		Caractéristiques mécaniques	
	Rapport E/C	Désignation des composites	Masse volumique (kg/m ³)	Taux d'absorption (%)	Résistance en traction par flexion (Mpa)	Résistance en compression (Mpa)
2,15	0,60	MF-D1-E0,6	1080	42,48	5,50±0,43	6,84±0,34
1,92	0,50	MG-D1-E0,5	1190	39,46	5,75±0,43	9,16±0,61
3,64	0,40	MF-D2-E0,40	1420	15,06	7,75±0,57	10,01±0,39
3,25	0,40	MG-D2-E0,40	1380	25,76	6,75±0,38	11,97±0,28
4,45	0,35	MF-D3-E0,35	1420	21,86	7,63±0,22	15,52±0,72
3,96	0,30	MG-D3-E0,30	1470	20,36	8,38±0,43	14,43±0,61

Tableau 4. Formulation optimales du composite ciment-balles de riz et les caractéristiques correspondantes

Rapport C/R	Formulations		Caractéristiques physiques		Caractéristiques mécaniques	
	Rapport E/C	Désignation des composites	Masse volumique (kg/m ³)	Taux d'absorption (%)	Résistance en traction par flexion (Mpa)	Résistance en compression (Mpa)
1,97	0,30	MF-D1-E0,3	1080	42,00	4,886±0,38	5,68±0,16
2,24	0,40	MG-D1-E0,4	1270	43,00	3,63±0,22	3,83±0,14
3,34	0,30	MF-D2-E0,3	1310	30,00	8,00±0,22	10,11±0,77
3,80	0,40	MG-D2-E0,40	1290	42,00	7,50±0,65	8,11±0,53
4,08	0,20	MF-D3-E0,2	1580	22,00	10,25±0,94	15,00±1,16
4,64	0,25	MG-D3-E0,25	1450	32,00	12,25±0,57	15,63±1,02

Au regard des masses volumiques des composites qui sont inférieures à 2000 kg/m³, il apparaît que les composites fibres de *Borassus aethiopum*-ciment et ciment-balles de riz peuvent effectivement être classés dans la catégorie des bétons légers. Le taux d'absorption augmente avec le rapport E/C utilisé pour la confection des gâchées, ce qui, visiblement fait baisser la masse volumique et par conséquent les résistances mécaniques. Par contre l'augmentation de la fraction massique C/R entraîne une baisse du pouvoir d'absorption, une augmentation de la masse volumique et une amélioration des résistances mécaniques. Les rapports de la résistance en compression sur les résistances en traction sont de 1,27 pour le composite balles de riz-ciment et de 1,72 pour

le composite fibres de *Borassus aethiopum* ciment ce qui montre que ces composites ont des résistances en traction importantes, ce qui est contraire au mortier habituel dont le rapport est de l'ordre de 10. Ce même constat a été fait par Merzoud, mais remarquons que les résistances mécaniques de nos composites sont nettement supérieures aux résistances mécaniques étudiées sur les composites de Diss-ciment (Merzoud *et al.*, 2007) bien que les rapports massiques Diss/ciment = 5 sont supérieurs à ceux utilisés dans le cas de notre étude.

Après analyse de la Figure 4 (A et B) ci-dessous, nous remarquons que les résistances en compression enregistrées sur le composite fibres de rônier-ciment sont toujours supérieures à celles enregistrées sur le composite de balles de riz-ciment, à l'exception du dosage D2 du mélange fin pour lequel la résistance obtenue pour le composite de fibres de rônier-ciment est légèrement inférieure à celle obtenue sur le composite de balles de riz-ciment.

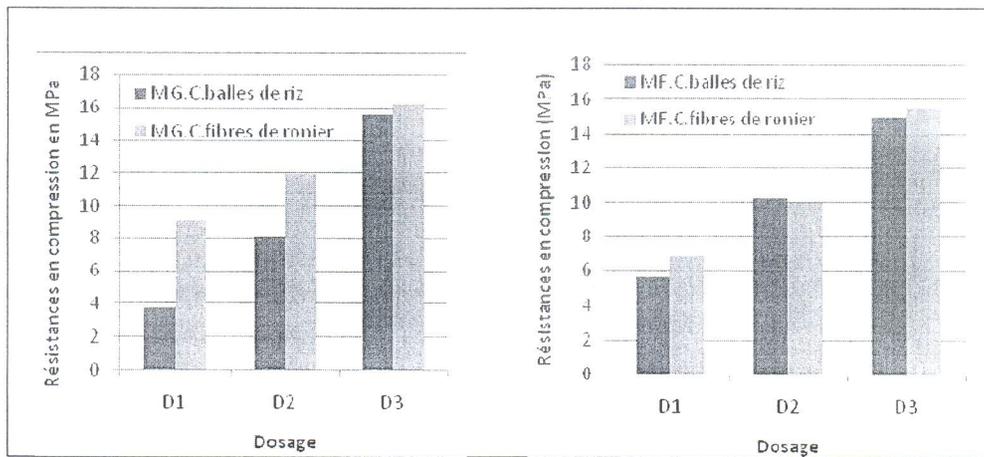


Figure 4. Variation des résistances en compression en fonction du dosage pour le mélange grossier (A) et le mélange fin (B) des deux composites

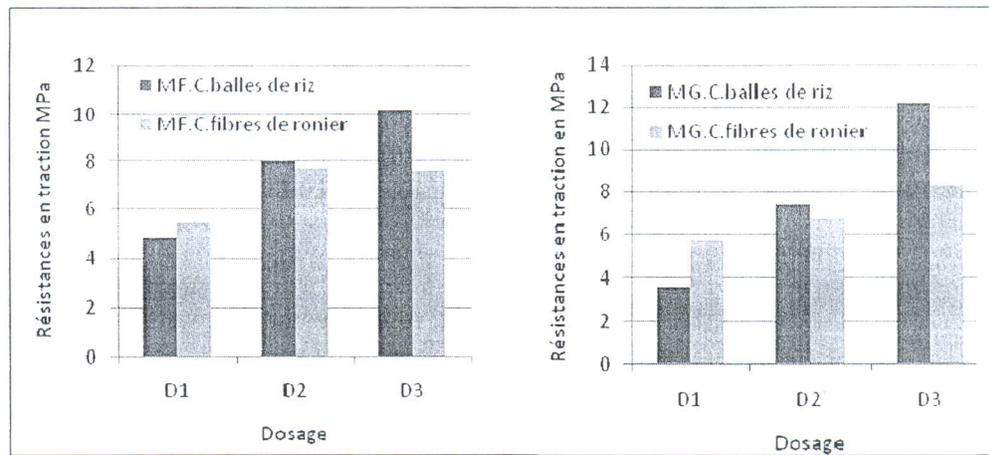


Figure 5. Variation des résistances en traction en fonction du dosage pour le mélange fin (C) et le mélange grossier (D) des deux composites

En observant bien la Figure 5 (C et D), nous constatons que pour le dosage D1, la résistance enregistrée en traction sur des éprouvettes du composite fibres de rônier-ciment est supérieure à celle enregistrée sur les éprouvettes du composite balles de riz-ciment tandis que pour les dosages D2 et D3, les résistances supérieures sont obtenues sur le composite balles de riz-ciment. En général, nous pouvons retenir que comparativement au composite balles de riz-ciment, le composite fibres de rônier-ciment résiste mieux en compression et que pour la résistance en traction, le composite balles de riz-ciment résiste mieux que le composite fibres de rônier-ciment pour des dosages en ciment élevés. Par contre, pour des dosages faibles en ciment, nous recommandons, le composite fibres de rônier-ciment.

CONCLUSION

La prise en compte de l'impact environnemental des constructions conduit à s'interroger sur des matériaux alternatifs de construction. Dans ce cadre nous nous sommes proposé de caractériser les composites résultant du mélange d'une matrice de ciment avec des fibres végétales de *Borassus aethiopum* et les balles de riz. Dans un premier temps, il a été prouvé que les fibres non traitées sont compatibles avec le ciment utilisé. Les résultats obtenus ont permis d'établir l'existence de valeurs optimales pour la quantité de liant et la quantité d'eau correspondant aux meilleures résistances mécaniques. Il ressort de cette étude que le composite fibres de *Borassus aethiopum* -ciment présente des caractéristiques physique et mécanique qui sont meilleures comparativement à celles du composite balles de riz-ciment. Bien que les capacités d'absorption des matériaux soient importantes, la légèreté constatée

est un atout ouvrant de nombreuses perspectives quant aux applications possibles des composites.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- AAMAR DAYA E. H., 2004. Contribution à la valorisation de co-produits du lin, poussières obtenues par aspiration lors du teillage, dans une matrice cimentaire, Thèse de doctorat de l'Université de Picardie Jules Verne., France.
- ASASUTJARIT C., HIRUNLABH J., KHEDARI J., CHAROENVAI S., ZEGHMATI B & CHEUL SHIN U. 2007. Development of coconut coir-based lightweight cement board', *Construction and Building Materials*, 21 : 277-288.
- FAO, Food Agriculture Organization, 2004. (Rapport, 2004)
- GBAGUIDI V., GBAGUIDI G., GIBIGAYE M., ADJOVI E., SINSIN B. A., AMADJI T. A., 2010. Détermination expérimentale des principales caractéristiques physiques et mécaniques du bois du rônier (*Borassus aethiopum* Mart.) d'origine béninoise, *J. Rech. Sci. Univ. Lomé (Togo)*, série E, 12(2): 1-9.
- HACHMI M., MOSLEMI A. & CAMPBELL G., 1990. A new technique to classify the compatibility of wood with cement. *Wood science technology*, 24, pp.345-54.
- KRIKER A., DEBICKI G., BALI A. A., KHENFER M. M. & CHABANNET M. 2005. Mechanical properties of date palm fibres and concrete reinforced with date palm fibres in hot-dry climate, *Cement Concrete Composites*, 27 : 554- 64.
- MAEP. 2010. Document de stratégie Nationale de Développement de la Riziculture au Bénin (SNDR).
- MERZOUZ M. & HABITA M. F. 2007. Elaboration of Lignocellulosic Composite formulated with a local resource : Diss as infill in structures submitted to seismic actions', *Research Journal of Applied Sciences, Medwell Journals*, 4(2) : 410-415.
- MOUGEL E., 1992. Mise au point d'un composite bois-ciment dont les variations dimensionnelles vis-à-vis des variations d'humidité sont contrôlées. Thèse de Doctorat, Université de Nancy 1, ENSTIB, Nancy.
- SAVASTANO J. H, WARDEN P. G. & COUTTS R. S. P. 2000. Brazilian waste fibres as reinforcement for cement based Composites, *Cement Concrete Composites*, 22 : 379-384.
- TAMBA S., VOUMBO L., WEREME A., GAYE S. & SISSOKO G. 2007. Durabilité des bétons légers à base de copeaux de bois, *J. Sci.Vol. 7 (4) : 67 – 72.*
- TRONET P., PICANDET V., LECOMPTE T. & BALEY C. 2001. Béton de chanvre : Effet du dosage en granulats sur les propriétés thermique et mécanique, *Comptes Rendus des JNC 17 – Poitiers 1-7.*