

## INFLUENCE DE LA GRANULOMETRIE DU SABLE ET DE LA MATURATION SUR LES PERFORMANCES DES CARREAUX EN CIMENT

SINMENO D.<sup>1</sup>, VIANOU A.<sup>1</sup>, TOUKOUROU C. A.<sup>1</sup> et ATCHOLI K.-E.<sup>2</sup>

1- Laboratoire d'Etudes et Recherches en Techniques Industrielles (LERTI),  
Université d'Abomey-Calavi (Bénin)

2- Laboratoire d'Etudes et de Recherches sur les Matériaux, les Plasmas et les Surfaces (LERMPS)  
Université de Technologie de Belfort- Monbéliard (France)

(Reçu le 29 octobre 2004 ; Révisé le 18 août 2005 ; Accepté le 20 septembre 2005)

### RESUME

La fabrication du carreau en céramique, nécessite une consommation élevée d'énergie qui rend onéreux son coût. Les carreaux en ciment ont par contre un coût bas. Mais leur résistance mécanique est faible. L'objectif de ce travail est d'étudier l'effet de la granulométrie du sable, du ratio Ciment/Sable et de la maturation du ciment sur les performances mécaniques du carreau en ciment. A cet effet, huit différents lots, constitués selon la granulométrie du sable, ont été subdivisés en quatre parties égales, pour fabriquer des carreaux avec les ratios ciment/sable suivants : 1/4, 1/3, 3/8, 6/8. Des essais mécaniques ont montré que la maturation en atmosphère humide a permis d'accroître substantiellement la résistance des carreaux.

Mots clés : Carreau, ciment, sable, maturation, énergie, granulométrie, atmosphère, résistance.

### INTRODUCTION

Tout Etat a l'obligation d'assurer à ses populations un logement décent. La plupart des pays africains, confrontés au problème de logement, ont retenu la filière «Matériaux de construction» au nombre des filières prioritaires

Ces matériaux, généralement importés, sont chers. Leur fabrication locale les rendrait plus accessibles aux démunis. La compétitivité de ces matériaux locaux par rapport à ceux importés dépend de la technologie utilisée.

Les institutions de recherche doivent contribuer par l'amélioration technologique à cette compétitivité. Dans ce cadre le Laboratoire de Recherches en Techniques Industrielles (LERTI) du Collège Polytechnique Universitaire (CPU) a entrepris des recherches sur divers matériaux de construction à savoir : bois, tuiles, carreaux.

Le carreau, matériau de revêtement de construction est traditionnellement un produit de céramique. Ce qui nécessite une consommation élevée d'énergie qui rend onéreux le procédé de fabrication. Aujourd'hui, des unités produisent de façon artisanale des carreaux en ciment qui constituent une alternative aux carreaux importés.

L'objectif de nos travaux de recherche actuels et futurs est d'améliorer la qualité des produits issus de ces unités dont la qualité actuelle limite leur vente. Les carreaux doivent être attrayants et présenter un faible taux de brisure à la pose. C'est pourquoi, nos recherches actuelles visent principalement l'amélioration des caractéristiques mécaniques des carreaux telles que la résistance au choc et la résistance à la compression; Ainsi, nous étudierons les effets de la composition granulométrique du sable; du ratio sable/ciment et surtout de la maturation sur les caractéristiques mécaniques des carreaux.

Il convient de mentionner qu'à notre connaissance, il n'existe pas de travaux de recherche scientifique spécifiquement consacrés à des aspects de la fabrication de carreaux en ciment. L'expérimentation consiste à fabriquer des carreaux suivant des paramètres puis à les soumettre à des essais de résistance au choc et à la compression. Ces essais permettront de déterminer les paramètres optimaux qui seront conseillés aux producteurs locaux pour faire face à la concurrence internationale par la qualité

### 2. Etude théorique

Le carreau posé au sol est soumis à la compression

lorsqu'on marche dessus ou lorsqu'il supporte des objets pesants. Ces derniers peuvent tomber sur lui d'une certaine altitude. Il doit donc résister à l'impact. Il est aussi sollicité au cisaillement, qui provoque son usure. Les deux premiers cas sont couverts par notre étude. Le dernier cas fera l'objet d'investigation ultérieure.

2.1. Energie de déformation

2.1.1- Notions fondamentales

Le passage d'un état (1) du matériau déformable, isotrope et homogène à un état (2) est décrit par une fonction d'état  $dU = \delta\phi + \delta Q$  (3) [3]

$\delta\phi$  est le travail mécanique élémentaire effectué par les forces extérieures sur le système,  $\delta Q$  est la chaleur absorbée et  $dU$  est l'énergie interne totale. Dans le cas des procès réversibles,  $\delta Q = \theta dS$  ( $\theta$ : température) et ( $dS$ : différentielle de l'entropie  $S$ ); la relation (3) devient:  $dU = \delta\phi + \theta dS$  (4) [3]  
On appelle énergie libre, la fonction d'état:

$$\int \delta W dV = \frac{1}{2} \int \sigma_{ik} \left( \frac{\partial \delta u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial \delta u_k}{\partial x_i} \right) dV = \frac{1}{2} \int \sigma_{ik} \delta \left( \frac{\partial u_i}{\partial x_k} + \frac{\partial u_k}{\partial x_i} \right) dV$$

$$= \int \delta W dV = \int \sigma_{ik} \delta \epsilon_{ik} dV = U \tag{8}$$

Des relations (4) et (8) il résulte:

$$dU = \sigma_{ik} \delta \epsilon_{ik} dV = \theta dS + \delta\phi \tag{9}$$

C'est la relation thermodynamique fondamentale pour les corps déformables. Avec l'énergie libre (5), la relation (9) devient:

$$dF = -S d\theta + \sigma_{ik} \delta \epsilon_{ik} dV \tag{10}$$

On appelle potentiel thermodynamique du corps, la grandeur définie par:

$$\psi_T = U - \theta S - \int \sigma_{ik} = F - \sigma_{ik} \delta \epsilon_{ik} dV = F - \int \sigma_{ik} \delta \epsilon_{ik} dV \tag{11}$$

2.1.3 Etude de l'impact au choc

2.1.3.1. Considérations générales

C'est une sollicitation dynamique qui se produit lorsque sur un corps intervient une variation brusque de vitesse. Le choc est la conséquence du contact entre des corps, contact produit en un temps extrêmement court. A la suite du choc il se produit une grande force de contact difficile à évaluer [1].

$$F = U - \theta S \tag{5}$$

[3] où  $\theta S$  est énergie liée.

2.1.2 Relations thermodynamiques pour l'énergie de déformation

En partant de l'équation d'équilibre ( $F_i = -\sigma_{ij,j}$ ), on obtient le travail mécanique des tensions à une variation  $\delta u_i$  des déformations:  $\delta W = -\sigma_{ij,j} \delta u_i$  (6) [3]  
 $\delta W$  est aussi nommé énergie spécifique de déformation.

$$\int_V \delta W dV = - \int \sigma_{ik} \delta u_i dA_k + \int \sigma_{ik} \frac{\partial \delta u_i}{\partial X_k} dV \tag{7}$$

En supposant [3] un milieu élastique non limité, non déformé à l'infini et que l'élément d'aire est à l'infini, il résulte que  $\sigma_{ik} = 0$ . Ayant en vue la symétrie du tenseur  $\sigma_{ik}$ , la deuxième intégrale se transforme en:

2.1.3.2. Sollicitation à la compression par choc

La sollicitation à la compression par choc s'explique par le schéma de la figure 1 où une barre de longueur  $l$  appuyée sur une plaque rigide et sur laquelle tombe un poids  $P$  d'une hauteur  $h$  [1]. En considérant que l'énergie cinétique entière du poids  $P$  est égale au travail produit par la force  $P$  et cédée à la barre comme énergie de déformation il résulte:  $W_d = P(h + \delta)$  (12)

$$P(h+\delta) = \frac{EA\delta^2}{2l} \quad (13)$$

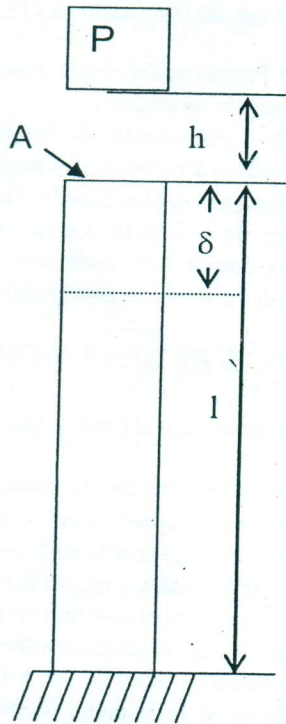


Figure 1 : Schéma de sollicitation à la compression par choc.

En prenant  $\delta$  de (13) comme inconnue on écrit l'équation de deuxième degré :

$EA\delta^2 - 2P\delta - 2Phl = 0$  dont la solution est :

$$\delta = \frac{Pl}{EA} \pm \sqrt{\frac{P^2 l^2}{EA} + 2Phl} \quad (14) \quad [1]$$

On voit que dans l'expression de  $\delta$ , apparaît la déformation que produirait la force P si elle était

appliquée de façon statique. Avec  $\delta_s = \frac{Pl}{EA}$  (15)

[1] on a :

$$\delta = \delta_s + \sqrt{\delta_s^2 + 2h\delta_s} - \delta_s \left( 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_s}} \right) \quad (16) \quad [1]$$

L'expression entre parenthèse se note

$$\Psi = 1 + \sqrt{1 + \frac{2h}{\delta_s}} \quad (17) \quad [1]$$

Il porte le nom de *multiplicateur de choc ou de collision*.

L'expression de déformation devient  $\delta = \Psi\delta_s$

$$(18) \quad [1]$$

### 3. ELEMENTS DE CALCUL

Energie de déformation [4]

$$e_i = \frac{mgh_i}{100} = 0,01 mgh_i$$

$m=0,1\text{kg}$  et  $g=9,8\text{m/s}^2$

$$e_i = 0,1 \times 9,8 \times h_i = 0,0098 h_i$$

$$\frac{\Delta e_i}{e_i} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{\Delta h_i}{h_i}$$

$h_i$  en cm

Erreur relative sur l'énergie de déformation [4]

$\Delta m = 0,01\text{kg}$  et  $\Delta h_i = 0,1\text{cm}$  [4]

$$\frac{\Delta e_i}{e_i} = \frac{0,01}{0,1} + \frac{0,1}{h_i} = 0,1 + \frac{0,1}{h_i}$$

Erreur absolue sur l'énergie de déformation [4]

$$\Delta e_i = 98 \cdot 10^{-5} h_i \left[ 1 + \frac{1}{h_i} \right]$$

Energie moyenne de déformation [4]

$$e_{\text{moy}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \Delta e_i = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 0,0098 h_i$$

$$\Delta e_{\text{moy}} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 \Delta e_i$$

Erreur absolue sur l'énergie moyenne de déformation [4]

#### 4. MOYENS ET METHODES

La fabrication des carreaux ; la maturation en atmosphère humide ou la maturation humide des carreaux ; les essais mécaniques sur les carreaux sont les points de l'expérimentation.

##### 4.1 Fabrication des carreaux

Matériels : Ils sont constitués de moules de truelles, de marteaux et de balance

Procédé : On fait la composition granulométrique des lots de sable. Chacun des lots, après un bon mélange ; a été divisé en quatre sous-lots de poids égal. A chaque sous-lot est ajouté la quantité de ciment suivant quatre ratios ciment /sable (c/s) : 1/4 ; 1/3 ; 3/8 ; 6/8. Le mélange ciment/sable est fait minutieusement à la truelle. On y verse de l'eau dont le poids correspond au ratio eau/ciment 0,4.

Le mortier réalisé avec chaque sous-lot a servi à la fabrication du substrat des carreaux. Lors de la fabrication, chaque sous-lot de carreaux est marqué par le lot (composition granulométrique) et le ratio c/s. Au démoulage, il est inscrit sur la belle-face de chaque carreau un chiffre indiquant le lot et une fraction indiquant le ratio c/s

##### 4.2. Traitement des carreaux fabriqués

Matériels : Ce sont de grands récipients de maturation humide, de divers récipients aménagés pour la maturation en ambiance humide et de plastiques noirs.

Procédé : Les carreaux de chaque lot ont été divisés en trois groupes soumis respectivement au régime de non-maturation, de maturation en atmosphère humide ou de maturation humide pendant 6 jours ; et à la maturation sèche à l'air et à l'ombre pendant 21 jours.

##### 4.3. LES ESSAIS MECANIQUES

Les carreaux ont été soumis aux essais de résistance au choc (impact) au LERTI et aux essais de compression au laboratoire du Département Génie Civil du CPU.

###### 4.3.3.1. Essais de résistance aux impacts

Dispositif expérimental :

Il est constitué d'un lâche-bille, d'une bille de 100 g et d'un mètre métallique.

Procédé : Le carreau est posé sur la table, sous la bille

qui est posée sur le bras lâcheur à la hauteur h désirée. On fait croître progressivement la hauteur mesurée avec le mètre en lâchant la bille jusqu'à ce que l'impact provoque la fissuration du carreau.

##### 4.3.2 Essais de compression des carreaux

Matériels : Presse hydraulique avec affichage digital des forces de compression.

Procédé : Les éprouvettes de longueur 204 mm, de largeur 84 mm et d'épaisseur 14 mm sont positionnées verticalement par les plus grandes faces latérales entre les plateaux de la presse. Le déplacement du mors mobile provoque l'écrasement du carreau avec indication de la force de compression.

#### RESULTATS ET DISCUSION

De l'expérimentation il ressort que :

a) Des huit différents lots de sable formulés selon la granulométrie et ayant servi à la fabrication des carreaux, il a été noté que le lot 5 constitué de sable de diamètre compris entre 2 mm et 2,5 mm. Les carreaux qui en sont issus ont donné les meilleurs résultats aux essais mécaniques. Nous nous attendions à obtenir les meilleurs résultats avec le lot 6 (composé de deux volumes de sable de diamètre inférieur à 2 mm et d'un volume de sable de diamètre compris entre 2 mm et 5 mm) qui est recommandé dans [5] à l'attention des producteurs de tuiles Cette performance du lot 5 s'explique par le fait qu'on sort du micro béton avec cette granulométrie pour être dans le vrai béton contenant du sable grossier et du gravier moyen. Donc c'est cette composition de sable qu'il faudra recommander aux producteurs de carreaux en ciment. Bagan dans [6] a abouti aux mêmes résultats pour les tuiles

b) La maturation humide permet aux carreaux d'avoir les plus grandes valeurs en résistance mécanique au choc et à la compression mais l'éclat des carreaux est diminué et leurs belles - faces présentent de pellicules blanches, toute chose qui agit négativement sur leur beauté et par conséquent sur leur compétitivité Ce mode de maturation n'est donc pas recommandable aux fabricants de carreaux en ciment.

c) La maturation en atmosphère humide donne de bons résultats du point de vue de la résistance mécanique au choc et à la compression et préserve la beauté du carreau. C'est le mode recommandable aux fabricants.

Influence de la granulométrie du sable et de la maturation sur les performances des carreaux en ciment.

d) Les caractéristiques mécaniques au choc et à la compression des carreaux sont proportionnelles au ratio sable/ciment. Le ratio 3/8 est économiquement le ratio optimal puisque avec une consommation modeste de ciment on a de bonnes performances

mécaniques. Les tableaux et graphiques en annexe font partie d'un ensemble qui illustrent bien ces résultats.

Tableau I : Répartition en lots du sable

Lot	Diamètre des grains de sable $\Phi$ en mm	Caractérisation
1 <sup>er</sup>	$\Phi < 0,63$	Sable fin
2 <sup>ème</sup>	$0,63 < \Phi < 1$	
3 <sup>ème</sup>	$1 < \Phi < 2$	
4 <sup>ème</sup>	$2 < \Phi < 2,5$	
5 <sup>ème</sup>	$2,5 < \Phi < 5$	
6 <sup>ème</sup>	Mélange de 2 volumes de sable fin $\Phi < 2$ mm et d'un volume de gros sable $2 \text{ mm} < \Phi < 5$ mm	Mélange
7 <sup>ème</sup>	Mélange de 2 volumes de gros sable et de 1 volume sable fin	Mélange
8 <sup>ème</sup>	Mélange de 3 volumes de sable fin et de 1 volume de gros sable	Mélange

Les lots ont été formulés tel que mentionné dans le tableau II.

Tableau II: Formulation pondérale des lots de sable

Lot	Poids des sous-lots					Poids total du lot [ kg ]
	$\Phi < 0,63$ [ kg ]	$0,63 < \Phi < 1$ [ kg ]	$1 < \Phi < 2$ [ kg ]	$2 < \Phi < 2,5$ [ kg ]	$2,5 < \Phi < 5$ [ kg ]	
Lot 1	8	0	0	0	0	8
Lot 2	0	8	0	0	0	8
Lot 3	0	0	8	0	0	8
Lot 4	0	0	0	8	0	8
Lot 5	0	0	0	0	8	8
Lot 6	3,56	1,78	1,92	0,60	0,14	8
Lot 7	1,77	0,89	3,85	1,21	0,27	8
Lot 8	4	2	1,44	0,45	0,11	8

Tableau III : Energie de rupture des carreaux du lot 6

Ratio ciment / sable	¼			1/3			3/8			3/4		
Traitement	MH			MH			MH			MH		
	hi	Ei	∂ei	Hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei
Hauteurs de chute de rupture [cm]	14,00	0,1372	0,0147	16,50	0,1617	0,0172	21,50	0,2107	0,0221	23,00	0,2254	0,0235
	14,50	0,1421	0,0152	17,00	0,1666	0,0176	22,50	0,2205	0,0230	23,50	0,2303	0,0240
	14,50	0,1421	0,0152	17,00	0,1666	0,0176	22,00	0,2156	0,0225	23,00	0,2254	0,0235
	14,00	0,1372	0,0147	17,00	0,1666	0,0176	22,50	0,2205	0,0230	23,00	0,2254	0,0235
Hauteur moyenne de chute de rupture [cm]	14,25	0,1397	0,0149	16,88	0,1654	0,0175	22,13	0,2168	0,0227	23,13	0,2266	0,0236
Traitement	NM			NM			NM			NM		
Hauteurs de chute de rupture [cm]	13,00	0,1274	0,0137	14,00	0,1372	0,0147	19,50	0,1911	0,0201	20,50	0,2009	0,0211
	12,50	0,1225	0,0132	14,00	0,1372	0,0147	19,50	0,1911	0,0201	20,00	0,1960	0,0206
	12,50	0,1225	0,0132	14,00	0,1372	0,0147	20,00	0,1960	0,0206	20,00	0,1960	0,0206
	13,00	0,1274	0,0137	14,50	0,1421	0,0152	20,00	0,1960	0,0206	19,50	0,1911	0,0201
Hauteur moyenne de chute de rupture [cm]	12,75	0,1250	0,0135	14,13	0,1384	0,0148	19,75	0,1936	0,0203	20,00	0,1960	0,0206

Hi : hauteur de chute à l'essai ; ei : énergie de déformation en joule ; ∂ei : Erreur absolue du calcul, l'énergie de déformation ei en joule ; MH : maturation humide ; NM : non maturation

Tableau IV : Energie de rupture des carreaux du lot 6

Ratio ciment / sable	¼			1/3			3/8			3/4		
Traitement	MAH			MAH			MAH			MAH		
Paramètres	hi	Ei	∂ei	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei
Valeurs des paramètres	14,00	0,1372	0,0147	16,50	0,1617	0,0172	18,00	0,1764	0,0186	22,50	0,2205	0,0230
	13,00	0,1274	0,0137	17,50	0,1715	0,0181	18,50	0,1813	0,0191	22,50	0,2205	0,0230
	13,50	0,1323	0,0142	17,50	0,1715	0,0181	18,50	0,1813	0,0191	22,50	0,2205	0,0230
Moyenne des paramètres	13,50	0,1323	0,0142	16,50	0,1617	0,0172	18,00	0,1764	0,0186	22,00	0,2156	0,0225
	13,50	0,1323	0,0142	17,00	0,1666	0,0176	18,25	0,1789	0,0189	22,38	0,2193	0,0229

Hi : hauteur de chute à l'essai ; ei : énergie de déformation en joule ; ∂ei : erreur absolue du calcul, l'énergie de déformation ei en joule ; MAH : maturation humide ; NM : non maturation

d) Les caractéristiques mécaniques au choc et à la compression des carreaux sont proportionnelles au ratio sable/ciment. Le ratio 3/8 est économiquement le ratio optimal puisque avec une consommation modeste de ciment on a de bonnes performances

mécaniques. Les tableaux et graphiques en annexe font partie d'un ensemble qui illustrent bien ces résultats.

Tableau I : Répartition en lots du sable

Lot	Diamètre des grains de sable $\Phi$ en mm	Caractérisation
1 <sup>er</sup>	$\Phi < 0,63$	
2 <sup>ème</sup>	$0,63 < \Phi < 1$	Sable fin
3 <sup>ème</sup>	$1 < \Phi < 2$	
4 <sup>ème</sup>	$2 < \Phi < 2,5$	
5 <sup>ème</sup>	$2,5 < \Phi < 5$	Gros sable
6 <sup>ème</sup>	Mélange de 2 volumes de sable fin $\Phi < 2$ mm et d'un volume de gros sable $2 \text{ mm} < \Phi < 5$ mm	Mélange
7 <sup>ème</sup>	Mélange de 2 volumes de gros sable et de 1 volume sable fin	Mélange
8 <sup>ème</sup>	Mélange de 3 volumes de sable fin et de 1 volume de gros sable	Mélange

Les lots ont été formulés tel que mentionné dans le tableau II.

Tableau II: Formulation pondérale des lots de sable

Lot	Poids des sous-lots					Poids total du lot [ kg ]
	$\Phi < 0,63$ [ kg ]	$0,63 < \Phi < 1$ [ kg ]	$1 < \Phi < 2$ [ kg ]	$2 < \Phi < 2,5$ [ kg ]	$2,5 < \Phi < 5$ [ kg ]	
Lot 1	8	0	0	0	0	8
Lot 2	0	8	0	0	0	8
Lot 3	0	0	8	0	0	8
Lot 4	0	0	0	8	0	8
Lot 5	0	0	0	0	8	8
Lot 6	3,56	1,78	1,92	0,60	0,14	8
Lot 7	1,77	0,89	3,85	1,21	0,27	8
Lot 8	4	2	1,44	0,45	0,11	8

Tableau III : Energie de rupture des carreaux du lot 6

Ratio ciment / sable	¼			1/3			3/8			3/4		
Traitement	MH			MH			MH			MH		
	hi	Ei	∂ei	Hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei
Hauteurs de chute de rupture [cm]	14,00	0,1372	0,0147	16,50	0,1617	0,0172	21,50	0,2107	0,0221	23,00	0,2254	0,0235
	14,50	0,1421	0,0152	17,00	0,1666	0,0176	22,50	0,2205	0,0230	23,50	0,2303	0,0240
	14,50	0,1421	0,0152	17,00	0,1666	0,0176	22,00	0,2156	0,0225	23,00	0,2254	0,0235
	14,00	0,1372	0,0147	17,00	0,1666	0,0176	22,50	0,2205	0,0230	23,00	0,2254	0,0235
Hauteur moyenne de chute de rupture [cm]	14,25	0,1397	0,0149	16,88	0,1654	0,0175	22,13	0,2168	0,0227	23,13	0,2266	0,0236
Traitement	NM			NM			NM			NM		
Hauteurs de chute de rupture [cm]	13,00	0,1274	0,0137	14,00	0,1372	0,0147	19,50	0,1911	0,0201	20,50	0,2009	0,0211
	12,50	0,1225	0,0132	14,00	0,1372	0,0147	19,50	0,1911	0,0201	20,00	0,1960	0,0206
	12,50	0,1225	0,0132	14,00	0,1372	0,0147	20,00	0,1960	0,0206	20,00	0,1960	0,0206
Hauteur moyenne de chute de rupture [cm]	12,75	0,1250	0,0135	14,13	0,1384	0,0148	19,75	0,1936	0,0203	20,00	0,1960	0,0206

Hi : hauteur de chute à l'essai ; ei : énergie de déformation en joule ; ∂ei : Erreur absolue du calcul, l'énergie de déformation ei en joule ; MH : maturation humide ; NM : non maturation

Tableau IV : Energie de rupture des carreaux du lot 6

Ratio ciment / sable	¼			1/3			3/8			3/4		
Traitement	MAH			MAH			MAH			MAH		
Paramètres	hi	Ei	∂ei	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei
Valeurs des paramètres	14,00	0,1372	0,0147	16,50	0,1617	0,0172	18,00	0,1764	0,0186	22,50	0,2205	0,0230
	13,00	0,1274	0,0137	17,50	0,1715	0,0181	18,50	0,1813	0,0191	22,50	0,2205	0,0230
	13,50	0,1323	0,0142	17,50	0,1715	0,0181	18,50	0,1813	0,0191	22,50	0,2205	0,0230
Moyenne des paramètres	13,50	0,1323	0,0142	16,50	0,1617	0,0172	18,00	0,1764	0,0186	22,00	0,2156	0,0225
	13,50	0,1323	0,0142	17,00	0,1666	0,0176	18,25	0,1789	0,0189	22,38	0,2193	0,0229

Hi : hauteur de chute à l'essai ; ei : énergie de déformation en joule ; ∂ei : erreur absolue du calcul, l'énergie de déformation ei en joule ; MAH : maturation humide ; NM : non maturation

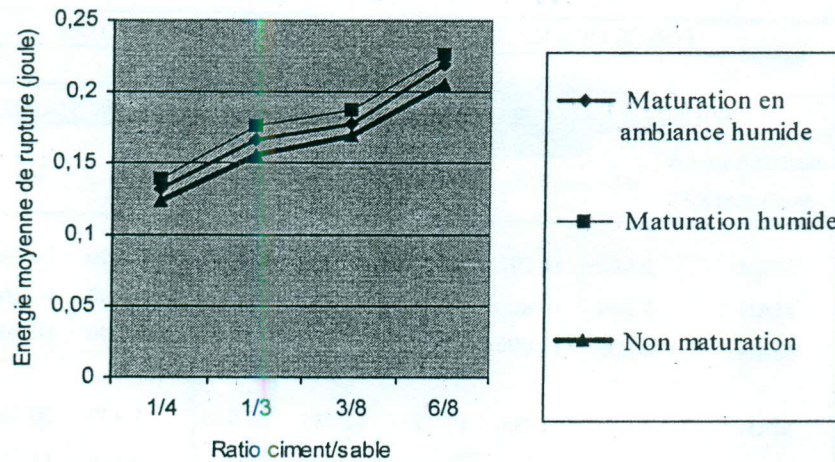


Figure 1 : Energie moyenne de rupture en fonction du ratio (ciment/sable (joule)) : lot 6

Tableau V : Energie de rupture des carreaux du lot 8

Wratio ciment / sable	1/4			1/3			3/8			3/4		
	MAH			MAH			MAH			MAH		
Paramètres	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei	hi	ei	∂ei
Valeurs des paramètres	12,00	0,1176	0,0127	16,50	0,1617	0,0172	21,50	0,2107	0,0221	23,00	0,2254	0,0235
	12,00	0,1176	0,0127	17,00	0,1666	0,0176	22,50	0,2205	0,0230	23,50	0,2303	0,0240
	12,00	0,1176	0,0127	17,00	0,1666	0,0176	22,00	0,2156	0,0225	23,00	0,2254	0,0235
	12,00	0,1176	0,0127	17,00	0,1666	0,0176	22,50	0,2205	0,0230	23,00	0,2254	0,0235
Moyenne des paramètres	12,00	0,1176	0,0127	16,88	0,1654	0,0175	22,13	0,2168	0,0226	23,13	0,2266	0,0236
Traitement	NM			NM			NM			NM		
Valeurs des paramètres	10,50	0,1029	0,0113	14,00	0,1372	0,0147	19,50	0,1911	0,0201	20,50	0,2009	0,0211
	10,50	0,1029	0,0113	14,00	0,1372	0,0147	19,50	0,1911	0,0201	20,00	0,1960	0,0206
	11,00	0,1078	0,0118	14,00	0,1372	0,0147	20,00	0,1960	0,0206	20,00	0,1960	0,0206
	10,00	0,0980	0,0108	14,50	0,1421	0,0152	20,00	0,1960	0,0206	19,50	0,1911	0,0201
Moyenne des paramètres	10,50	0,1029	0,0113	14,13	0,1384	0,0148	19,75	0,1936	0,0203	20,00	0,1960	0,0206

Hi : hauteur de chute à l'essai ; ei : énergie de déformation en joule ; ∂ei : erreur absolue du calcul, l'énergie de déformation ei en joule ; MAH : maturation en ambiance humide ; NM : non maturation

LOT	FORCE DE RUPTURE A LA COMPRESSION EN NEWTON									
	RATIO CIMENT/SABLE									
	SOUMIS A LA MATURATION						NON SOUMIS A LA MATURATION			
	NATURE DE LA MATURATION	1/4	1/3	3/8	3/8	6/8	1/4	1/3	3/8	6/8
Lot 4	MAH	5 900	11 700	10 700	10 700	23 000	5 000	10 100	8 200	21 800
Lot 4	MAH	6 200	10 800	14 700	14 700	22 800	5 200	10 100	14 000	20 900
Lot 4	MAH	6 000	11 000	12 800	12 800	23 100	5 800	10 300	13 000	20 100
Moyenne du Lot 4	MAH	6 033	11 166	12 733	12 733	22 966	5 333	10 166	11 733	20 933
Lot 5	MAH	11 100	19 100	18 700	18 700	38 000	7 000	16 300	19 200	30 700
Lot 5	MAH	11 200	19 000	22 400	22 400	35 800	8 200	16 400	19 400	28 900
Lot 5	MAH	11 100	19 200	21 800	21 800	37 100	7 500	16 500	18 800	30 000
Moyenne du Lot 5	MAH	11 133	19 100	20 966	20 966	36 966	7 566	16 400	19 133	29 866
Lot 5	MH	11 600	26 000	34 000	34 000	37 400	8 400	10 200	17 100	25 000
Lot 6	MH	11 500	24 000	30 000	30 000	37 800	8 200	10 500	16 900	24 000
Lot 6	MH	11 500	20 800	30 100	30 100	38 000	8 300	10 200	16 900	23 800
Moyenne du Lot 6	MH	11 533	23 600	31 366	31 366	37 733	8 300	10 300	16 966	24 266
Lot 6	MAH	11 400	24 000	30 100	30 100	36 800	8 000	10 300	16 800	24 800
Lot 6	MAH	10 800	21 100	31 500	31 500	37 100	8 100	10 000	17 300	23 000
Lot 6	MAH	11 300	20 300	30 000	30 000	36 500	8 000	10 100	16 700	24 000
Moyenne du Lot 6	MAH	11 166	21 800	30 533	30 533	36 800	8 033	10 133	16 933	23 933
Lot 6	MAH	10 800	22 000	34 100	34 100	41 600	11 400	14 600	17 600	29 000
Lot 7	MAH	10 600	19 000	30 000	30 000	35 000	9 400	10 000	17 000	25 900
Lot 7	MAH	10 700	23 000	29 400	29 400	36 400	9 800	14 600	16 900	23 500
Moyenne du Lot 7	MAH	10 700	21 333	31 166	31 166	37 666	10 200	13 066	17 166	26 133
Lot 7	MAH	9 400	22 000	30 000	30 000	38 100	10 200	12 000	18 500	31 700
Lot 8	MAH	9 500	18 200	27 000	27 000	35 500	9 000	12 800	16 000	36 900
Lot 8	MAH	9 200	22 000	27 100	27 100	36 000	8 200	13 100	19 000	30 300
Moyenne du Lot 8	MAH	9 366	20 733	28 033	28 033	36 533	9 133	12 633	17 833	32 966

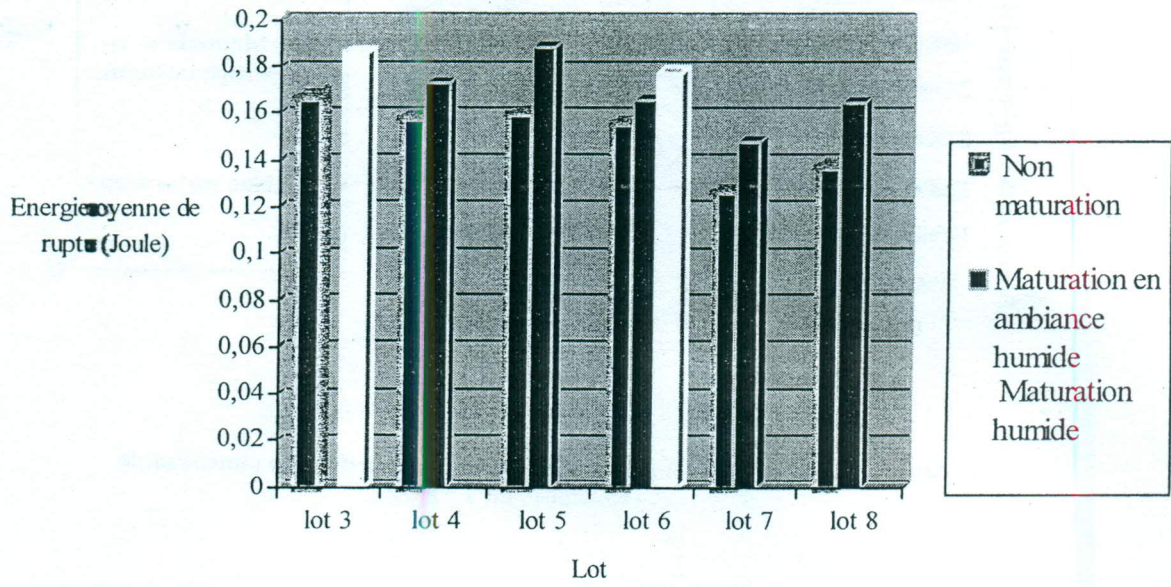


Figure 3 : Energie moyenne de rupture par lot : ratio 1/3

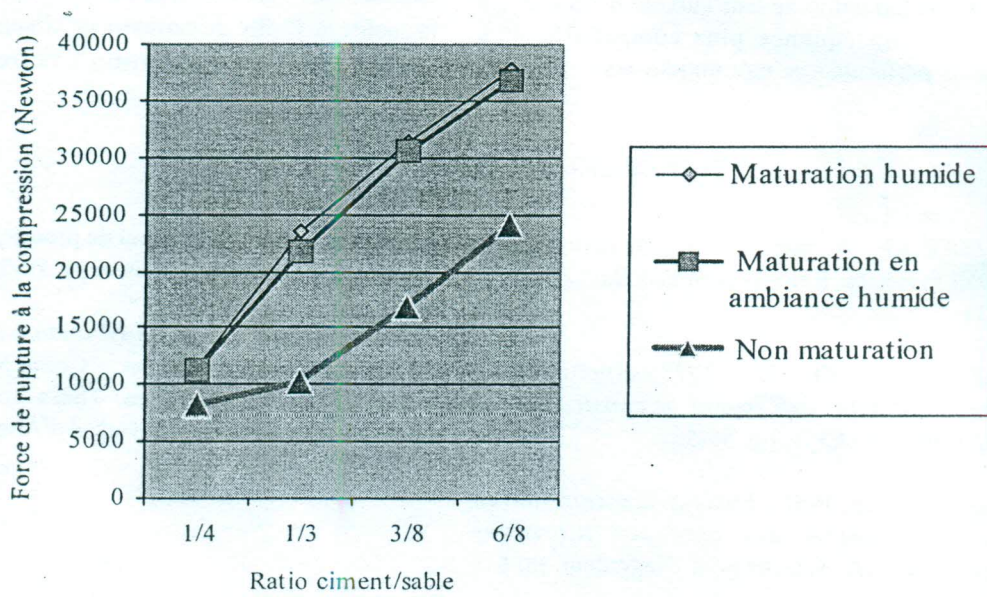


Figure 4 : Force de rupture à la compression ven fonction du ratio ciment/sable (Newton) : lot 6

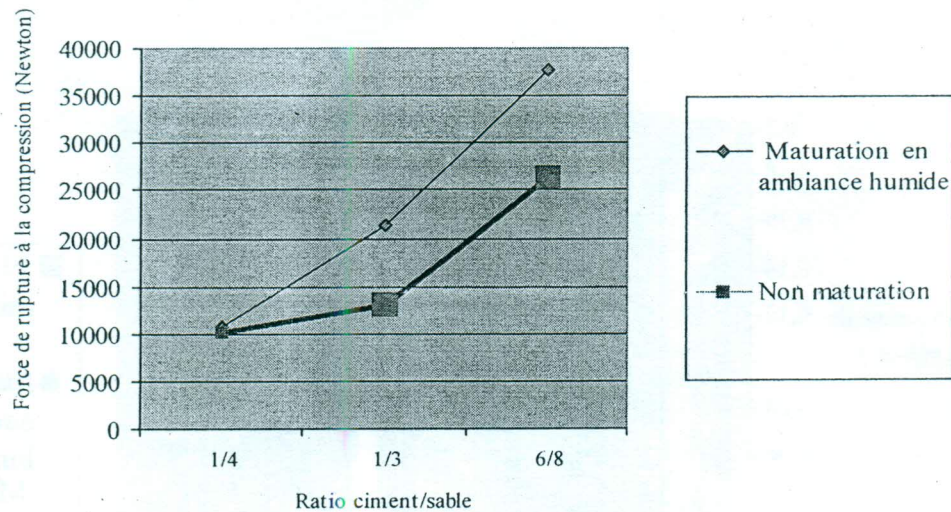


Figure 5 : Force de rupture à la compression en fonction du ratio ciment/sable (Newton) : lot 7

## CONCLUSION

Le sable de granulométrie comprise entre 2 mm et 2.5 mm et la maturation humide comme celle en atmosphère humide permet d'accroître la résistance mécanique des carreaux en ciment, toutes choses favorisant la réduction de leur taux de brisure et les rendant en conséquence plus compétitifs. Les meilleures performances mécaniques sont obtenues

avec la maturation humide par contre la maturation en atmosphère humide, à la différence de la maturation humide, préserve la beauté des carreaux. C'est le mode de maturation à conseiller aux producteurs qui doivent opter pour le ratio ciment/sable 3/8.

Ces résultats contribueront sans nul doute à améliorer la qualité de l'offre de carreaux en ciment relativement moins chers à côté des carreaux en céramique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. BUZDUGAN Gh., 1980.- Rezistanta materialelor. Editia XI revizuită. Editura Technica Bucuresti, pp. 409-411.
2. LAZAR B. et DOBRE I., 1978.- *Aplicatii ale mecanicii solidului deformabil in constructia de masini*. Editura FACLA, pp. 55-58.
3. SINMENOUD., 1998.- *Etude de la maturation en atmosphère humide des carreaux fabriqués localement*. D.E.A. Science pour l'Ingénieur, pp 81-98.
4. SKAT BIT, 1992.- Manuel de production, Tuiles en fibro et vibro-mortier. Genève, pp 15-33.
5. BAGAN G., 2002.- *Contribution à l'amélioration des tuiles en micro béton - Caractérisation des matériaux et des structures*. Thèse pour l'obtention du diplôme de Doctorat. Université d'Abomey-Calavi, p. 133.

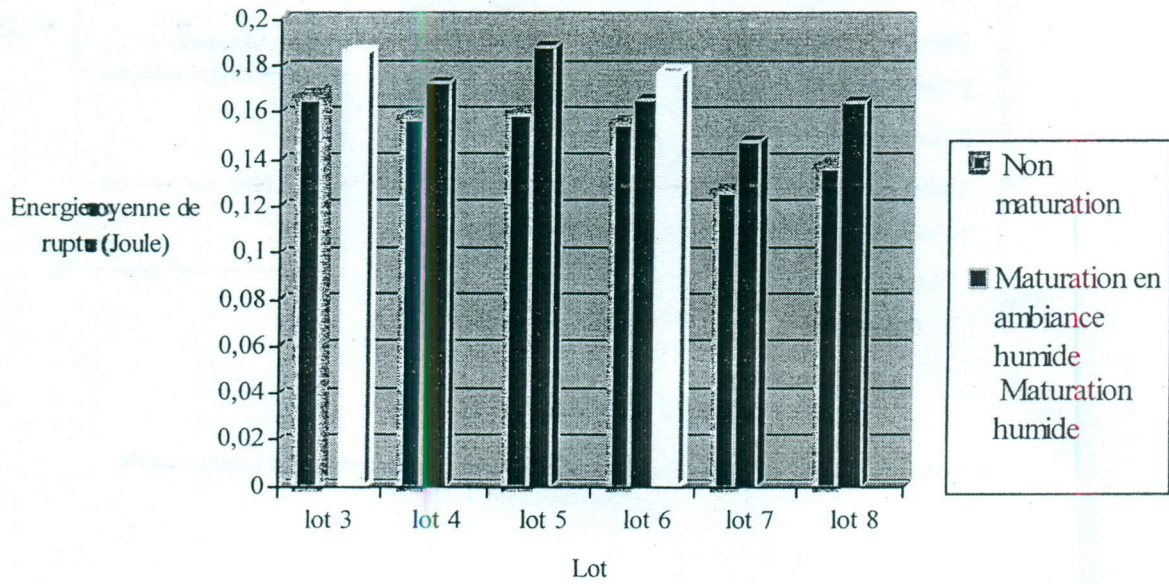


Figure 3 : Energie moyenne de rupture par lot : ratio 1/3

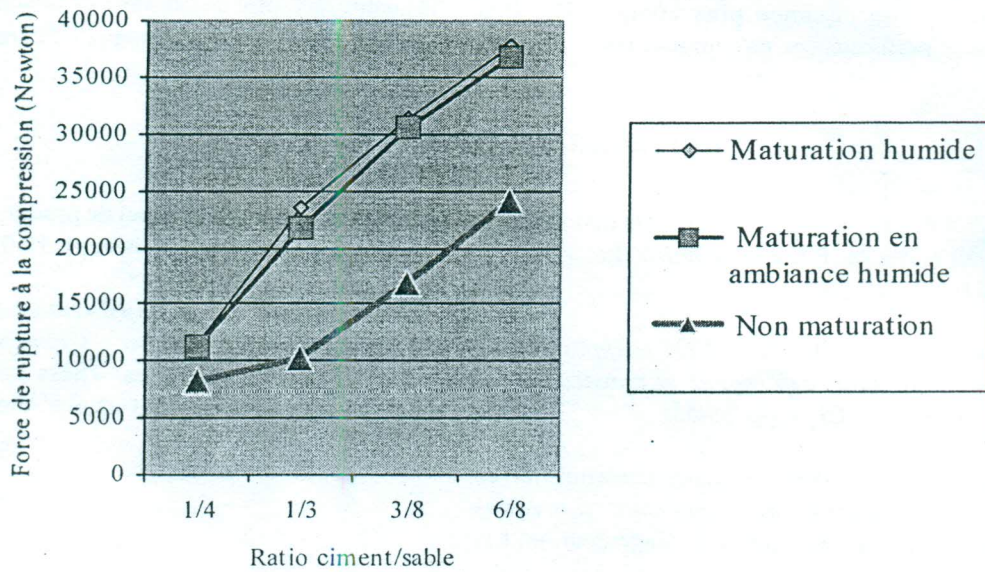


Figure 4 : Force de rupture à la compression ven fonction du ratio ciment/sable (Newton) : lot 6