

Étude des caractéristiques physico-mécaniques des tuiles en micro-béton fabriquées localement à base de la gomme arabique

Renonet Karka BOZABE^{1*}, Chakirou Akanho TOUKOUROU¹, Gérard A. GBAGUIDI¹
et Mahouton Norbert HOUNKONNOU²

¹Laboratoire d'Energétique et de Mécanique Appliquée (LEMA). Ecole Polytechnique d'Abomey Calavi
01 BP 2009 Cotonou, Benin

²Chaire Internationale de physique mathématique et applications (UNESCO), Benin

* Correspondance, courriel : potemat@yahoo.fr

Résumé

La présente étude a pour objet la validation de l'utilisation d'un liant végétal naturel comme matrice dans l'élaboration des matériaux de construction. La *gomme arabique*, également connue sous le nom de *gomme Sénégal*, en substitution du *ciment* a été utilisée pour la fabrication des tuiles en micro-béton. Les méthodes expérimentales des essais dites de « mise au point » et des « essais erreurs » ont servi pour déterminer les rapports optimaux de l'eau sur la gomme arabique (E/G) et de la solution de la gomme arabique sur le sable (SG/S). Avec ces rapports, les essais de contrôle ont été effectués sur les tuiles romanes d'expérimentations de dimensions 500x250x10 mm³. Les résultats de ces essais nous montrent que ces tuiles sont belles et biens résistantes et leurs aspects physiques ne posent aucun problème. En outre, l'analyse statique et dynamique modale par simulation numérique confirme ces résultats. Toutefois, pendant leur maturation, les tuiles à base de la gomme arabique doivent être placées dans un séchoir ou au soleil jusqu'à ce que la colle (mélange de l'eau et de la gomme) sèche complètement. Par cette étude, nous pouvons désormais envisager de couvrir nos ouvrages avec ces types de tuiles. Enfin, comme ces tuiles seront exposées aux intempéries, nous entrevoyons en perspective de réaliser une étude complémentaire pour en savoir plus sur leur vieillissement sous l'action de l'humidité et de la chaleur.

Mots-clés : *liant, matrice, gomme, ciment, tuile, analyse, statique, dynamique, modale, simulation, maturation, séchoir.*

Abstract

Study of the characteristics physico-mecaniques of tiles in micro-concrete made locally with the gum arabic

The present study has for object the validation of the use of a plant sociable disposition natural as matrix in the elaboration of building materials. The gum arabic, also known under the name of gum Senegal, in substitution of the cement was used for the manufacturing of tiles in micro-concrete. The experimental methods of the tries said about "clarification" and about " tries errors " served to determine the optimal relationships of the water on the gum arabic (E/G) and the solution of the gum arabic on the sand (SG/). With these relationships, the tries of control were made on the Romanic tiles of experiments of dimensions

500x250x10 mm³. The results of these tries show us that these tiles are beautiful and good resistant and their physical aspects raise no problem. Besides, the static and modal dynamic analysis by digital simulation confirms these results. However, during their maturation, tiles with the gum arabic must be placed in a hairdryer or in the sun until the glue (mixture of the water and the gum) dries completely. By this study, we can intend from now on to cover our works with these types of tiles. Finally, as these tiles will be exposed to the bad weather, we envisage in prospect to realize a follow-up study to know more about their ageing under the effect of the humidity and of the heat.

Keywords : *binder, matrix, gum, cement, tile, analysis, statics, dynamic, modal, simulation, maturation, hairdryer.*

1. Introduction

La gomme arabique est une résine végétale thermodurcissable dont les propriétés physiques essentielles ne sont pas apparemment différentes de celles du ciment (matière minérale): *dissolution dans l'eau et viscosité, adhésivité et collage des agrégats, agglomération et enrobage, prise et durcissement*, etc. Son utilisation comme liant en substitution du ciment pour la fabrication des tuiles en micro-béton entre dans une démarche de développement durable. Car elle présente l'avantage d'être une matière première renouvelable, contrairement aux granulats des carrières qui sont épuisables dans le temps et en outre, éviter la nuisance de carbone et de déchets supplémentaires. Il est bien vrai que jusqu'à présent, la gomme arabique est beaucoup plus utilisée dans l'industrie agro-alimentaire. Son code ingrédient européen est E414. Mais, elle est également utilisée sous plusieurs formes: Textile, soin, construction, peinture, photographie, etc. A travers ce travail et les propriétés physiques naturelles de cette matière première, nous voulons surtout déterminer certains paramètres clés tels que le rapport eau sur gomme (E/G) et le rapport solution de la gomme sur sable (SG/S) qu'il faut retenir pour la production locale des meilleures tuiles.

2. Méthodologie

Par la méthode des « essais de mise au point » [1] et la méthode des « essais erreurs », les meilleurs mélanges des constituants (sable fin, sable grossier et liant) qu'il faut retenir pour produire des tuiles expérimentales en micro-béton ont été déterminés. Nous adoptons ces proportions optimales pour fabriquer séparément des tuiles en mortier de ciment et des tuiles en mortier de gomme arabique. Puis, ces tuiles sont utilisées pour réaliser des essais de contrôle non-destructifs d'une part, afin de réexaminer leurs aspects physiques (dimensions, pores et fissures de surface, poids et sonorité) et d'autre part, les essais de contrôle destructifs afin de ré-vérifier leurs résistances mécaniques (flexion, chocs et traction) et leur imperméabilité [2]. Aussi, par simulation numérique avec le logiciel de calcul de structures « AUTODESK Robot Structural Analysis Professional 2012 » [3], nous réalisons une analyse statique (résistance à la flexion 3 points) et une analyse dynamique modale (Résistance aux chocs) [4] du comportement de ces tuiles. Cela, dans le but de comparer les résultats expérimentaux à ceux de la simulation.

La norme en vigueur [7] recommande le rapport E/C compris entre 0,5 et 0,65 et une consistance de 26 centimètres pour le cas du ciment. Quant à la gomme arabique, les rapports E/G et SG/S ne sont pas connus jusqu'alors. Grâce à ses propriétés physiques, nous allons déterminer ces deux rapports inconnus. Voici les propriétés des différentes matières premières utilisées dans ce travail pour la confection des mortiers.

2-1. Matériaux

2-1-1. Sable

• Site d'extraction : Sable lagunaire de nature siliceuse.

• Propriétés du produit :

- Propriétés physiques :

- Poids spécifique: 25,6 KN /m³

- Poids spécifique imbibé : 25,8 KN /m³

- Coefficient d'absorption d'eau : 0,5%

- Coefficient d'aplatissement : 4,8

- Propriétés chimiques : exprimées en % massique

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	S	Perte au feu 1000°C	Cl
95,56	0,01	1,82	0,28	0,02	0,01	0,26	1,1	0,02	<0,02	0,51	0,002

Deux granulométries du sable sont utilisées dans ce travail :

• Un sable fin (0/2 mm) : tamisât obtenu par tamisage du sable sur le tamis normalisé de Ø 2 mm (*Module 34, AFNOR*).

• Un sable grossier (0/5 mm) : correspond au tamisât sur tamis de Ø 5mm (*Module 38, AFNOR*) normalisé.

Pour caractériser les sables qui serviront à la fabrication des tuiles en micro-béton, nous avons réalisé les essais suivants :

- (1) L'analyse granulométrique par tamisage conformément à la norme NF P 18-560 (septembre 1990) qui donne la répartition des grains présentée dans le **Tableau 1**. Elle est illustrée par la courbe granulométrique de la **Figure 1**. D'après la dite norme, la courbe granulométrique doit être de préférence étalée (c'est à dire le coefficient d'uniformité $C_u > 4$).
- (2) L'équivalent de sable E_s conformément à la norme NF P 18-598 (octobre 1991). Cet essai exprime la propreté du sable par rapport à sa teneur en argile qui ne doit pas dépasser 10%. La norme exige un E_s minimum de 90%. Les résultats des essais nous ont donné en moyenne un $E_s = 92,8 \%$
- (3) La teneur en eau conformément aux normes NF P 18-555 (sable) et NF P 18-554 (gravillons).
- (4) La teneur en matières organiques suivant la norme NF P 18-586 (calorimétrie).

Tableau 1 : Analyse granulométrique des granulats (% passant)

Tamis (mm)	8	5	2,5	2	1,25	1	0,630	0,315	0,160	0,080
Module AFNOR X11-501 et P18-304	41	38	35	34	32	31	29	26	23	20
Sable fin	100	100	100	100	99,02	95,48	65,90	12,4	1,85	0,04
Sable grossier	100	100	98,2	82,40	68,67	21,95	16,2	8,4	3,42	0,15

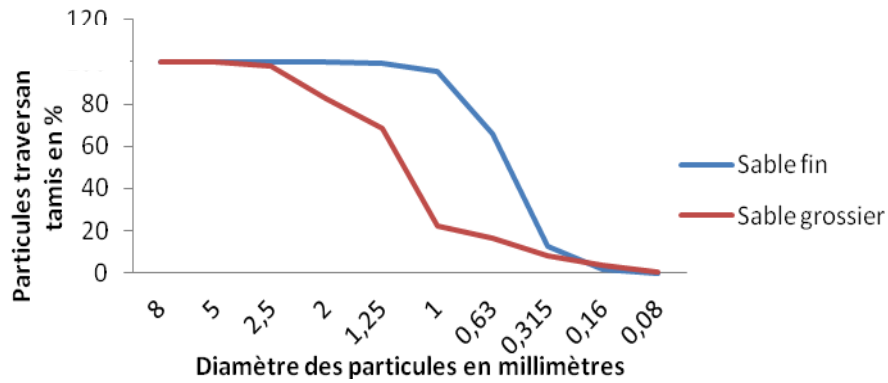


Figure 1 : Courbes granulométriques du sable fin et sable grossier

2-1-2. Ciment

• Appellation du ciment : SCB LAFARGE CPJ 35

• Propriétés du produit :

– Propriétés physiques :

- Poids spécifique : 30 KN/m³
- Surface spécifique : 4018 cm²/g
- Diamètre médian : 16,5µm

– Propriétés chimiques : exprimés en % massique

SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Na ₂ O	K ₂ O	SO ₃	RI	Perte au feu 1000°C
23,05	5,01	0,12	0,22	64,02	0,28	0,09	0,14	2,01	1,20	3,02

Les essais de prise et de consistance sur ciment sont effectués conformément à la norme NF EN 196-3 (aout 1995). Le temps de prise du ciment doit être compris entre 60 minutes et 6 heures.

2-1-3. Eau de gâchage

• Choix de l'eau : L'eau du réseau de distribution d'eau potable à Cotonou au Bénin est utilisée. Elle est propre et exempte de toute matière agressive vis-à-vis des mortiers. La qualité de l'eau est testée conformément à la norme NF P 18-303.

• Quantité : Pour le ciment, le dosage eau sur ciment (E/C) est donné plus haut en introduction. Quant à la gomme arabique, voir le **sous-paragraphe 2.2.2**.

2-1-4. Gomme arabique

• Autre appellation : Gomme Sénégal

• Description : La gomme arabique n'est qu'une variété, consiste en un exsudat de sève descendante solidifié, amalgamé naturellement ou par incision, sur le tronc et au pied d'arbres de la famille des acacias (**Figure 2**). Elle est récoltée principalement en Afrique saharienne (Maghreb, Mali, Sénégal, Tchad, Égypte, Soudan...). On trouve la gomme arabique dans le commerce sous forme de poudre ou de cristaux non moulus plus ou moins ronds de couleur jaune pâle à jaune brunâtre. La surface extérieure des cristaux est mate et fendillée et leur cassure est vitreuse ; elles sont souvent également traversées par de fines fissures (**Figure 3**).

• **Caractéristiques** : La gomme arabique est un polysaccharide acide fortement ramifié qui se présente sous la forme de mélanges de sels de potassium, de magnésium et de calcium. Les éléments monomères de l'acide libre (acide arabe) sont le D-galactose, le L-arabinose, le L-rhamnose et l'acide D-glucuronique. On admet que les gommés arabiques se composent au moins de deux fractions de polysaccharides de structures différentes. La fraction de masse moléculaire supérieure contient une part d'acides aminés modeste mais déterminante pour ses propriétés.

• **Propriétés physiques** : Même en concentration de 30 à 40 %, la gomme arabique reste très peu visqueuse. Elle sert principalement d'émulsifiant, spécialement pour les huiles d'agrumes, de colloïde protecteur dans les émulsions et de supports pour les arômes.

- **Solubilité** : A peu près complètement soluble dans deux fois sa masse d'eau. Insoluble dans l'alcool. Soluble dans le glycérol et le propylène glycol avec chauffage prolongé ;

- **Poids spécifique** : 13,5 KN/m³ ;

- **Toxicité** : La gomme arabique est un fort allergène pouvant causer des crises d'asthme si elle est inhalée (sous forme de vapeur).

• **Propriétés chimiques** :

Sa masse moléculaire moyenne indiquée oscille entre 200 et 300 kilodaltons et son numéro CAS est 9000-01-5.



Figure 3 : gomme arabique sous forme de cristaux non moulus de forme arrondie.

2-2. Réalisation des mortiers

2-2-1. Choix des paramètres étudiés

La méthodologie des « essais de mise au point » résumée en dix (10) points ci-dessous est utilisée pour déterminer les différents paramètres d'étude. Elle nous a guidées également pour la composition du meilleur mélange en phase d'expérimentation.

- 1) Sélectionner le sable avec les caractéristiques indiquées au **sous-paragraphe 2.1.1** ;
- 2) Effectuer sur ce sable des séries d'essais ;
- 3) Chaque série d'essais concerne la production de tuiles en partant d'un mélange standard et ensuite des variations sur le mélange standard ;
- 4) Le mélange standard (série A):
 - 1 volume de ciment ou 0,45 volume de solution (eau + gomme arabique) ;
 - 2 volumes de sable fin ;
 - 1 volume de sable grossier ;
 - Vibration : 30 secondes ;
 - Consistance du mortier : Ø 26 cm.

- 5) Les quatre (4) variations sur le mélange standard sont, mortiers :
 - Plus ou moins liquide, séries : D, A, E ;
 - Plus ou moins de ciment ou de solution de la gomme arabique, séries : F, A, G ;
 - Plus ou moins de vibration, séries : B, A, C ;
 - Plus ou moins de sable grossier, séries : H, A, I, J.
- 6) Pour le sable sélectionner, on obtient dix (10) séries d'essais intitulés : A, B, C, D, E, F, G, H, I, J. On a 5 tuiles par série, soit 50 tuiles;
- 7) Chaque tuile de chaque série d'essais sera jugée sur son aspect physique présenté au **sous-paragraphe 2.3** ;
- 8) Sur chaque série on prélève les quatre (4) tuiles restantes pour effectuer les trois (3) essais de résistances mécaniques et l'essai hydrique (voir **sous-paragraphe 2.3**) ;
- 9) Pour chaque série d'essais on procède à une analyse pondérale en considérant :
 - Des résultats des essais (**Tableau 3**);
 - La sensibilité du mélange aux variations de volume de liant, de la vibration et de la consistance du mortier.
- 10) L'analyse pondérale s'effectue en multipliant les résultats obtenus par un coefficient pondérateur (selon l'importance donnée au critère dans l'évaluation (**Tableau 4**) et en totalisant l'ensemble des points obtenus. La meilleure note sur l'ensemble des dix (10) séries d'essais indique le dosage qu'il faut retenir pour le sable sélectionné.

2-2-2. Formulation des mortiers

Tous les mortiers confectionnés dans cette étude ont été réalisés à partir des mêmes matériaux que nous avons décrits plus haut.

a- Détermination du rapport E/G

Hypothèses: La gomme arabique est à peu près complètement soluble dans deux fois sa masse d'eau et même en concentration de 30 à 40 %, la gomme arabique reste très peu visqueuse. [*Article Wikipédia, Interne*]

Rapport E/G	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4
G/E	100%	66,70%	50%	40%	33,30%	28,60%	25%

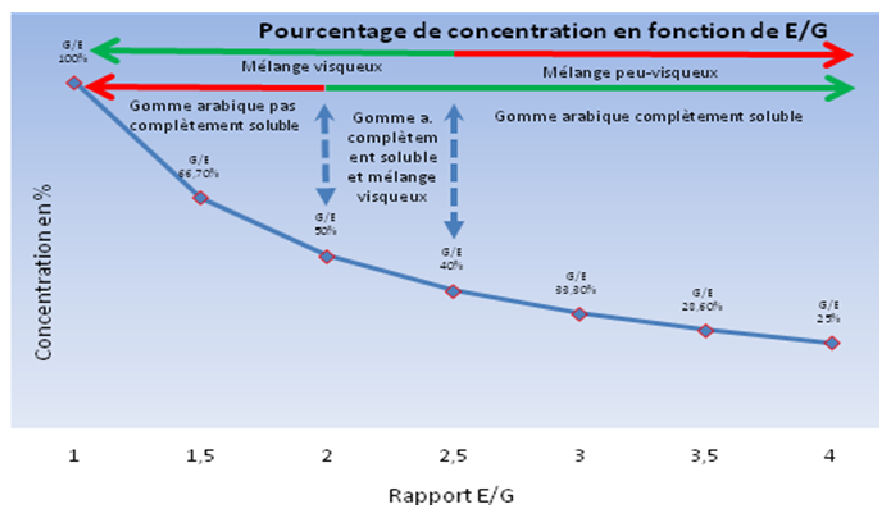


Figure 4 : Concentration en fonction d'E/G

Conclusion : Afin d'obtenir une solution ou une colle visqueuse pour laquelle la gomme arabique est complètement dissoute dans de l'eau, le rapport E/G doit être compris entre 2 et 2,5

b- Détermination du rapport SG/S

Il s'agit de déterminer la quantité de la solution eau + gomme arabique (SG) qu'il faut pour stabiliser un volume ou masse de sable (S) après séchage. Faute d'informations à ce sujet, nous avons adopté la méthode des « essais erreurs ».

Nous composons :

- 1 volume de sable grossier ;
- 2 volumes de sable fin ;
- ajout de la solution visqueuse (SG) de la gomme en faisant varier le rapport SG/S de 0,2/ 3 à 1/3. On vérifie également pour chaque variation la consistance du mortier. Pour SG/S = 0,2/3, le mélange est raide et difficile à mouler et quand SG/S = 1, le mélange coule tout simplement. Le meilleur rapport se situe autour de SG/S = 0,45/3, soit 15% et on obtient une consistance de 26 cm que recommande la norme en vigueur.

c- Résumé des formulations

1. Pour chaque série d'essai, il faut :
 - 1 sac de ciment ou une solution (eau + gomme) ;
 - 1 brouette de sable grossier ;
 - 2 brouettes de sable fin.
2. Le principe consiste à fabriquer un mélange standard (série A) sur lequel on fera ensuite des variations comme expliqué au sous-paragraphe précédent et résumé dans le **Tableau 2** ci-dessous :

Tableau 2 : Formulation des mortiers

SERIE	DOSAGE CIMENT /SABLE	DOSAGE SOLUTION (EAU + GOMME)/ SABLE	DOSAGE SABLE FIN / GROSSIER	BOITES ¹ DE CIMENT	BOITES DE SOLUTION (EAU+GOMME)	BOITES DE SABLE FIN	BOITES DE SABLE GROSSIER	CONSISTANCE Ø en cm	TEMPS DE VIBRATION en Secondes
A	1/3	0,45/3	2/1	8	3,6	16	8	26	30
B	1/3	0,45/3	2/1	8	3,6	16	8	26	15
C	1/3	0,45/3	2/1	8	3,6	16	8	26	60
D	1/3	0,45/3	2/1	8	3,6	16	8	24	30
E	1/3	0,45/3	2/1	8	3,6	16	8	30	30
F	1/3,5	0,45/3,5	2/1	6	2,7	14	7	26	30
G	1/2,5	0,45/2,5	2/1	12	5,4	20	10	26	30
H	1/3	0,45/3	3/1	8	3,6	18	6	26	30
I	1/3	0,45/3	1/1	8	3,6	12	12	26	30
J	1/3	0,45/3	1/2	8	3,6	8	16	26	30

¹ Boîte cylindrique standard de 425 mL (Ø = 7,5 cm et H= 11cm)

3. Dans chaque série, on produira 5 tuiles ;
4. On marque à l'aide d'un clou chaque tuile produite : Par exemple, E5 veut dire série E, tuile N° 5 ;
5. **Pour les tuiles en ciment** : Après moulage et la cure sur moule (24 heures), on laisse les tuiles trois (3) jours dans la cure humide et deux (2) jours de cure sèche avant de procéder aux essais de contrôle de qualité.
6. **Pour les tuiles en gomme arabique** : Après moulage et la cure sur moule (24 heures) dans un séchoir, on démoule les tuiles et on les place dans des séchoirs pendant 5 jours avant de réaliser les essais.

2-2-3. Confection des mélanges

Tous les mélanges sont préparés dans les mêmes conditions. Le protocole est proposé par l'équipe de Laboratoire au département de Génie civil à l'EPAC. Les proportions à respecter sont indiquées dans le **Tableau 2**.

a- Mélange a base du ciment

En contact avec de l'eau, le ciment s'hydrate. Il ya donc une réaction chimique avec formation de nouveaux éléments minéraux qui vont agglomérer les agrégats en faisant prise et en durcissant. Compte tenu de ce comportement du ciment, nous avons adopté la démarche suivante :

- D'abord malaxage du ciment et du sable (sable fin + sable grossier) pendant 2 minutes à vitesse 130 tr/min ;
- Introduction de l'eau dans le mélange sable et ciment ;
- Malaxage à vitesse 260 tr/min pendant 4 minutes ;
- Arrêt pour racler les bords ;
- Puis malaxage fort pendant 15 minutes à 700 tr/min ;
- Enfin malaxage lent pendant 15 minutes à 260 tr/min.

b- Mélange a base de la gomme arabique

En contact avec de l'eau, la gomme arabique quant à elle, change en une solution visqueuse qui colle les doigts. Sa viscosité dépend du bon choix du rapport E/G. Donc il n'y a pas de réaction chimique identiquement au ciment. On se sert de cette solution pour coller les grains de sable entre eux en présence de l'air, du soleil ou un séchoir moderne pour sécher la colle en profondeur des mélanges.

Le mélange à base de la gomme arabique est un matériau composite dont les grains de sable constituent les renforts et l'ensemble des grains, un squelette qui assure la tenue mécanique (résistance à la traction et rigidité). La solution de la gomme arabique est une résine organique. Elle est la matrice thermodurcissable qui lie les grains de sable et assure la répartition des efforts (résistance à la compression ou à la flexion). Au vu de ce comportement de la gomme arabique, les procédés de mise en œuvre couvrent les trois (3) opérations indispensables suivantes :

1. Imprégnation du renfort par le système résineux:

- mélange au préalable de l'eau et de la gomme arabique jusqu' à dissolution complète de la gomme dans l'eau et obtention d'une solution visqueuse et collante ;
- mélange du sable fin et grossier puis ajout d'une quantité étudiée de la gomme en solution précédemment réalisée ;

- malaxage jusqu'à homogénéisation de l'ensemble sable + solution visqueuse et collante de la gomme.
- 2. Mise en forme à la géométrie de la pièce.**
 - Mise en place du mélange sur l'outillage (moulage) ;
 - Compactage (vibration) ;
 - Polymérisation, démoulage et finition.
- 3. Durcissement du système**
 - par polycondensation et réticulation (séchage).



Figure 5 : *Photos des moules, de la table vibrante et des tuiles d'expérimentation.*

2-3. Caractérisation des tuiles : dispositifs expérimentaux.

Il s'agit de faire :

1. Une analyse de leurs aspects physiques : *Poids, nombre des pores et des fissures, leurs localisations sur la tuile et enfin la sonorité* ;
2. Une analyse des résistances mécaniques : *résistance à l'impact ou chocs, résistance à la traction du talon, résistance à la flexion et imperméabilité.*



Figure 6 : *photos des essais de résistances mécaniques (flexion, chocs et traction du talon).*

2-4. Simulation numérique : modèle mathématique.

2-4-1. Analyse statique

Données :

- Longueur de la tuile : $L_T = 50$ cm
- Largeur de la tuile : $B = 25$ cm

- Epaisseur de la tuile : $H = 10 \text{ mm}$
- Ecart des appuis simples: $L = 35 \text{ cm}$
- Moment d'inertie transversale de la tuile: $I = 2,1 \text{ cm}^4$
- Module de YOUNG (épreuve en mortier de ciment): $E_c = 30\,000 \text{ Mpa}$ [8]
- Module de YOUNG (épreuve en mortier de gomme arabique): $E_g = 20\,000 \text{ Mpa}$
- Poids spécifique des mortiers en ciment et en gomme : $\rho_c = 20 \text{ KN/m}^3$ et $\rho_g = 14,4 \text{ KN/m}^3$
- Coefficient de POISSON des mortiers en ciment et en gomme : $\nu_c = 0,2$ et $\nu_g = 0,36$
- Charge minimale sur tuile $F_{\text{Min}} = 0,80 \text{ kN}$ [7]
- Maillage : Méthodes de COONS ; Type de division : carrés (contour rectangulaire) ;
Eléments finis : triangles (3 nœuds)

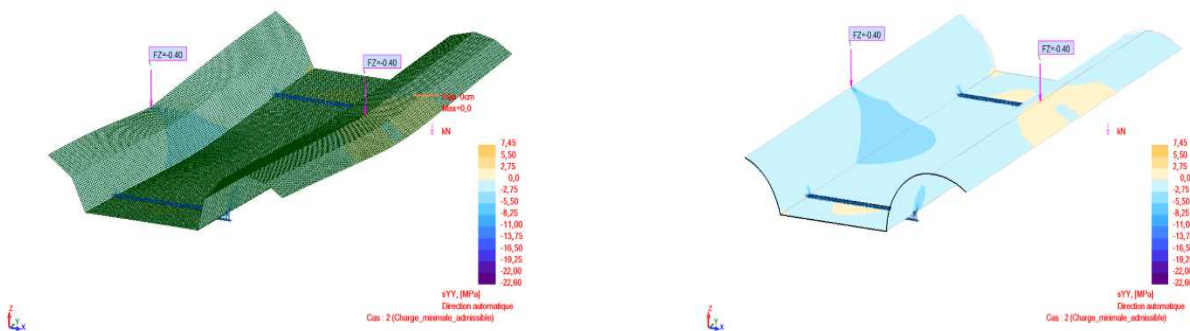


Figure 7 : Modélisation d'essai de résistance à la flexion 3 points

2-4-2. Analyse dynamique modale

Données :

- Masse de la bille : $M = 200 \text{ g}$ [7]
- Hauteur de chute $H_c = 20 \text{ cm}$ [7]
- Masse de la tuile en ciment : $M_c = 2,5 \text{ kg}$
- Masse de la tuile en gomme : $M_g = 1,8 \text{ kg}$
- Déflexion statique de la tuile en ciment : $Y_c = [(M \times L^3) / 48 \cdot E_c \cdot I] = 2,8 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$ [4]
- Déflexion statique de la tuile en gomme : $Y_g = [(M \times L^3) / 48 \cdot E_g \cdot I] = 4,3 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$
- Coefficient dynamique de frappe sur tuile en ciment : $\mu_c = [(2 \cdot H_c) / Y_c \times (1 + (0,5M_c / M))]^{0,5} = 444$ [4]
- Coefficient dynamique de frappe tuile en gomme : $\mu_g = [(2 \cdot H_c) / Y_g \times (1 + (0,5M_g / M))]^{0,5} = 411$

² $E = 48 \pi^2 \rho [(L^2/H) \cdot (f_n/K_n^2)]$ Avec f_n : fréquence de résonance de système ; K_n : constante qui dépend des conditions aux limites de la barre. [9]

- Force de frappe sur tuile en ciment : $F_c = \mu_c \times M = \mathbf{0,88 \text{ kN}}$ [4]
- Force de frappe sur tuile en gomme : $F_g = \mu_g \times M = \mathbf{0,82 \text{ kN}}$

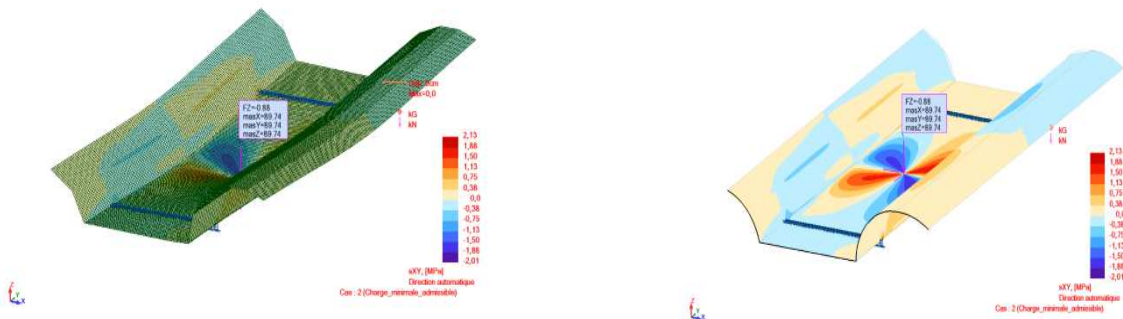


Figure 8 : Modélisation d'essai de résistance aux chocs

3. Résultats et discussion

Tableau 3 : une fiche des résultats des 5 tuiles d'une série d'essai

N° DE SERIE D'ESSAI : **A**

– Analyse de l'aspect des 5 tuiles :

Poids en kg	2,1	2,4	2,4	2,3	2,4
Pores $\emptyset > 2 \text{ mm}$ (1)	0	0	1	1	1
Pore $\emptyset > 5 \text{ mm}$ (2)	0	0	2	2	0
Fissure $> 5 \text{ mm}$ (3)	2	0	2	2	2
Localisation (4)	0	1	1	1	1
Sonorité (5)	1	2	1	2	2

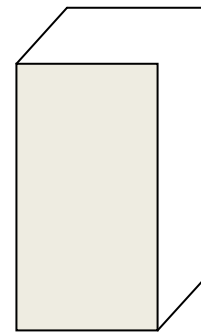


Figure 9 : La tuile, zone grise ou zone exposée, zone blanche ou zone de recouvrement.

NOTATION

- (1) : 0 si plus de 6 pores, 1 si moins de 6 pores et 2 si pas de pores.
- (2) : 0 si pores $\emptyset > 5 \text{ mm}$ et 2 si pas de pores.
- (3) : 0 si fissures $> 5 \text{ mm}$ et 2 si pas de fissures.
- (4) : 0 si dans la zone grise, 1 si dans la zone blanche et 2 si absence de tout problème.
- (5) : 0 si son sourd, 1 si son moyen et 2 si son clair ;
- (6) : 0 si le résultat est mauvais, 1 si résultat moyen et 2 si résultat bon.

– Procéder aux calculs suivants :

- Poids moyen en Kg : **2,32**
- Ecart de poids entre la plus légère et la plus lourde tuile en Kg : **0,3**
- Aspect moyen (0, 1 ou 2) : **1**

- Sonorité moyenne ((0, 1 ou 2) : **2**
- Analyse de la résistance (1 tuile par essai) :
 - Résistance à l'impact ou choc (6) : **1**
 - Imperméabilité (6) : **2**
 - Résistance à la traction du talon en Kg : **22,4**
 - Résistance à la flexion en Kg : **26,5**

Tableau 4 : une fiche des résultats d'une série d'essaiN° DE SERIE D'ESSAI : **A****ANALYSE PONDERALE DES RESULTATS D'ESSAIS :**

On multiplie chaque résultat avec le poids du critère présenté dans le tableau ci-dessous.

CRITERES	RESULTAT	POIDS	TOTAL
– Poids moyen en Kg	2,32	0,4	0,93
– Ecart de poids en Kg	0,3	10	3
– Aspect moyen	1	5	5
– Sonorité	2	5	10
– Résistance à l'impact	1	3	3
– Résistance à l'impact	2	5	10
– Imperméabilité	22,4	0,5	11,2
– Résistance à la traction du talon	26,5	0,2	5,3
– Résistance à la flexion			
	Note Totale		48,43

Tableau 5 : résumé des résultats expérimentaux des tuiles à base du ciment, choix du meilleur mélange

Série	Poids moyen en kg	Ecart de poids en Kg	Aspect moyen	Sonorité	Résistance à l'impact	Imperméabilité	Résistance à la traction du talon	Résistance à la flexion	Total
A	0,93	3	5	10	3	10	11,2	5,3	48,43
B	0,96	3	5	10	3	5	10,5	4,8	42,26
C	0,96	3,1	5	10	3	10	9,8	4,8	46,66
D	0,92	3	5	5	3	10	9,9	4,7	41,52
E	0,94	3,2	5	5	3	10	10	4,8	41,94
F	0,96	3,2	5	5	3	10	10,4	4,7	42,26
G	0,94	3,1	5	10	3	5	10,2	4,4	41,64
E	0,95	2,9	5	5	3	5	10,4	4,6	36,85
I	0,92	2,9	5	5	3	10	10	5,1	41,92
J	0,92	3	5	5	3	10	11,1	4,8	42,82

CHOIX DU MEILLEUR MELANGE :

le mélange pour lequel la note totale est la plus élevée correspond à la **série A** pour les mortiers à base du ciment.

Tableau 6 : résumé des résultats expérimentaux des tuiles à base de la gomme arabique, choix du meilleur mélange

Série	Poids moyen en kg	Ecart de poids en Kg	Aspect moyen	Sonori té	Résistance à l'impact	Impermé abilité	Résistance à la traction du talon	Résistance à la flexion	Total
A	0,70	2	5	5	3	10	14,8	6,88	47,38
B	0,70	2	5	5	3	10	15,4	7,10	48,20
C	0,72	1	5	5	6	10	16,1	7,22	51,04
D	0,70	1,4	5	5	3	10	15,1	6,42	46,62
E	0,68	2	5	5	6	10	14,1	6,40	49,18
F	0,68	2	5	5	6	10	15,0	6,48	50,16
G	0,71	1,6	5	5	6	10	15,2	6,46	49,97
E	0,71	1,4	5	5	6	10	14,8	6,55	49,46
I	0,68	2	5	5	3	10	15,0	7,11	47,79
J	0,68	1	5	5	3	10	13,9	6,84	45,42

CHOIX DU MEILLEUR MELANGE :

le mélange pour lequel la note totale est la plus élevée correspond à la **série C** pour les mortiers à base de la gomme arabique.

Tableau 7 : résultats de la simulation, analyse statique

Méthode d'essais : Résistance à la flexion 3 points type 1	Tuile Romane en ciment	Tuile Romane en gomme arabique
Charge minimale admissible en KN [7]	0,80	0,80
Charge à la rupture F en KN par expérience après 28 jours	1,20	1,32
Résistance de calcul ³ en Mpa	25,20	27,72
Contrainte composée ⁴ de Von Mises en Mpa	23,55	23,80
Déplacements linéaires maximal et minimal en cm	0 et 0	0 et 0
Rotations (R _{xx}) maximale et minimale en Rad	0,002 et - 0,004	0,003 et - 0,006

$$^3 \sigma_{max} = \frac{3FL}{2BH^2} \quad [10]$$

$$^4 s_{Mises} = \sqrt{\frac{1}{2}[(s_{XX} - s_{YY})^2 + s_{XX}^2 + s_{YY}^2] + 3 * s_{XY}^2} = \sqrt{\frac{1}{2}[(s_1 - s_2)^2 + s_1^2 + s_2^2]}$$

Tableau 8 : résultats de la simulation, analyse dynamique modale

Méthode d'essais : Résistance aux chocs	Tuile Romane en ciment	Tuile Romane en gomme arabique
Force de frappe sur tuile calculée en KN pour une bille de 200 g avec hauteur de chute de 20 cm	0,88	0,82
Fréquences maximale et minimale des oscillations propres en Hz	213,53 et 50,86	180,64 et 43,03
Périodes maximale et minimale des oscillations en Seconde	0,02 et 0,00	0,02 et 0,01
Déplacements linéaires (U_z) maximal et minimal en cm	0,1 et - 0,1	0,1 et - 0,1
Rotations (R_z) maximale et minimale en Rad	7,9 et -7,9	8,2 et - 8,2

Après examen des résultats expérimentaux et ceux de la simulation numérique, on constate que :

- 1) Pour produire des tuiles de qualité à base de la gomme arabique, il faut :
 - Au préalable, confectionner la solution eau + gomme (SG) suivant le rapport E/G compris entre 2 et 2,5 ;
 - Ajouter une quantité de la solution (SG) au sable suivant un rapport SG/S autour de 0,45/3 soit 15% avant malaxage ;
 - Un séchoir approprié selon l'épaisseur de la tuile.
- 2) Mécaniquement, les tuiles à base de la gomme arabique résistent mieux :
 - Aux charges statiques de flexion car elles se déforment largement (rotation autour de l'axe X) avant la rupture (*Tableau 7*) ;
 - Aux charges dynamiques de chocs car elles réduisent la force de frappe des objets en chute sur la couverture et se déforment largement (rotation autour de l'axe Z) avant la rupture (*Tableau 8*).
- 3) Avec une faible épaisseur (4 à 6 mm) et bien séchées, les tuiles à base de la gomme arabique sont curieusement très résistantes et le test d'imperméabilité est positif.
- 4) Esthétiquement, elles sont trop noires et nécessitent des colorants.

4. Conclusion

Par ce travail, nous avons prouvé qu'avec un peu d'attention sur les rapports des constituants, on peut produire des tuiles de bonne qualité à base de la gomme arabique. D'ailleurs, l'analyse des caractéristiques mécaniques de ces types de tuiles le confirme. En effet, par rapport aux tuiles à base de ciment ; à la flexion, elles se déforment largement avant de se rompre. Aussi, elles résistent mieux aux chocs en réduisant sensiblement la force de frappe des objets et elles sont étanches. Sauf leur production nécessite un séchoir approprié. Par conséquent, nous allons continuer les recherches pour en savoir plus sur leur comportement en service à la longue.

Références

- [1] - ODUL P., Novembre 1996, *Les toitures en tuiles de mortier – Production et mise en œuvre*- Support pédagogique.
- [2] - SKAT- BIT – *Quality control guidelines – fibre or micro concrete tiles*- H. –E. Gram & P. Gut, March 1991, element 23.
- [3] - AUTODESK ROBOT STRUCTURAL ANALYSIS PROFESSIONAL 2012- version : 25.0.0.3774 - *Manuel d'utilisation*.
- [4] - BAGUIDI G. A., 2009-2010. *Cours d'analyse dynamique des structures, DEA-SPI EPAC de l'UAC au Benin*.
- [5] - FOUJDET E. A., 2009-2010. *Cours de calcul des structures par la méthode des éléments finis (MEF), DEA-SPI EPAC de l'UAC au Benin*.
- [6] - GAY D. et GAMBELIN J., 1999. *Dimensionnement des structures – HERMES Science Publications, Paris*.
- [7] - LOCOMAT – *Tuiles en mortier vibré- Document normatif-Burkina Faso*, juin 1997.
- [8] - BROCH J.T.,1984. *Mechanical vibration and shock measurements*. Brüel & Kjaer. 2nd Edition
- [9] - A. DAOUI- *identification des fréquences de résonance et du module d'élasticité par la méthode d'analyse vibratoire-SBEIDCO – 1st International Conference on Sustainable Built Environment Infrastructures in Developing Countries ENSET Oran (Algeria) - October 12-14, 2009*.
- [10] - BAILON J.P. & DORLOT J.M., 2000, *Des matériaux – Presse internationale polytechnique, Ecole Nationale Polytechnique Montréal*.