I. Sous-thème 1 : les infrastructures, BTP et les équipements

Article 1. Caracterisation de sols pour la construction de bauge de madagascar

Nirina Miraniaina Andriamalala Anjaramanantenasoa ¹, Manitriniala Dimby Ratoarivelo¹, Victor A Razafinjato¹, Rakotomalala Jean Lalaina¹, Rajeshwar Goodary², José Andriamampianana ¹ ¹:Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo ²: Université Des Mascareignes Maurice

Résumé

Les constructions en terre crue existent depuis des millénaires dans le monde. A Madagascar des vestiges de plus de 300 ans de constructions existent encore de nos jours et font partie du patrimoine malagasy. Actuellement, les cultures constructives, les savoir-faire autour des constructions en bauge ne nous sont pas parvenus. Le but de cette recherche est de retrouver les techniques pour reconstruire en terre crue et diminuer la facture carbone dans le génie civil à Madagascar, mais aussi de fournir une alternative économique au tout béton pour le plus grand nombre. Divers échantillons ont pour cela été prélevés et analysés pour déterminer la formulation des bauges « malagasy » et démystifier le type de construction quand à l'apport d'adjuvant fallacieux d'origine animale.

Mots clés : Bauge, argile, terre crue

Abstract

Earthen constructions have existed for thousands of years in the world. In Madagascar, remains of over 300 years of construction still exist today and are part of the « Malagasy » heritage. Currently, the construction methodology and the know-how around the constructions with barge are almost in-existent. The purpose of this research is not only to find the techniques to rebuild with raw earth and to reduce the carbon footprint in civil engineering in Madagascar, but also to provide an economic alternative to concrete constructions. Various samples have been taken and analyzed to determine the formulation of the « malagasy » barge and to demystify the misleading idea that these types of constructions contain additives of animal origin.

Keywords : cob wall, clay, earth wall

1. Introduction

Les matériaux de constructions englobent tous ceux utilisés dans le domaine du génie civil. En raison de son abondance et de son accessibilité en termes de coût, le matériau terre est le plus utilisé [Steve, 1997].

Les constructions en terre crue font partie des plus anciennes que notre planète ait connues [Guillaud, Fabien Ginisty 2018 ...]. Leur apparition à Madagascar ne peut être daté de façon certaine, mais on retrouve dans les documents historiques dès l'ère du Roi Andrianampoinimerina (1745-1810) qui a banni dans son édit royal, les constructions en bauge ou en pierre pour les personnes vivantes. Il existe de nombreux types de construction en terre crue à Madagascar, notamment le torchis, l'adobe et la bauge. Cette dernière est sans aucun doute la plus abordable et surpasse les autres techniques pour de nombreuses raisons. Il suffit juste de regarder les vestiges du passé à travers les constructions anciennes. Peu de constructions en torchis ou en adobe ont pu traverser les siècles pour se retrouver intactes encore de nos jours.

Les traditions orales indiqueraient la présence d'ovalbumine, de bouses de vaches ou encore de sèves dans les anciennes constructions en bauge, mais nous ne retiendrons que les principaux matériaux constituants qui sont la terre et les fibres végétales utilisés pour limiter les fissurations dues au retrait. La facilité de construction, mêlé à la facilité de conception ont fait de la bauge, un champion devant les autres techniques de construction en terre crue. C'est une technique traditionnelle qui a été utilisée depuis des milliers d'années et dans toutes sortes de climats [Greer et Short, 1995]. Il est très résistant aux intempéries, en raison de sa nature poreuse ; il peut résister à de longues périodes de pluie sans affaiblir [Keefe et al., 2001].

La formulation de la bauge ne s'est malheureusement pas transmise aux générations actuelles et les savoirs faires ancestraux pour sa mise en œuvre dont les témoignages par les constructions en bauge encore visibles nous sont parvenus dans un excellent état, se sont aussi perdus.

Pour retrouver la formulation ancienne nous aurons besoin d'analyser différents types de bauge, mais aussi d'autres sols à titre de comparaison.

Cette étude est centrée sur les bauges dans les hautes terres de Madagascar, la partie centrale dont l'altitude se situe audessus de 800m. L'objectif principal de cette étude est de présenter des résultats physico-chimiques et la caractérisation minéralogique des bauges et des sols, avec comme objectif spécifique sa redécouverte, et la démystification quant à l'utilisation des différents stabilisants et imperméabilisants précités.

2. Matériels et méthodes

Les échantillons de bauge ont été prélevés sur :

- 1- La résidence du Roi Radama situé à Manandrina, ANTANANARIVO AVARADRANO (coordonnées GPS : Altitude 1316 m ; Latitude S 18°48'37,40'' ; Longitude E 47°35'24,14'').
- 2- Un ancien mur en bauge à Antanety, ANTANANARIVO ATSIMONDRANO (coordonnées GPS : Altitude 1266 m ; Latitude \$ 18°55'52,97'' ; Longitude E 47°29'01,25'')



Photo nº 1 : Bauge Radama

Les autres échantillons de sols ont été prélevés dans :



Photo n° 2: Tana (Antanety)

- 1- Un gite situé près de Moramanga, (coordonnées GPS : Altitude 878 m ; Latitude S 15°52'11,20'' ; Longitude E 48°05'15,77'')
- 2- Un gite d'adobe situé près d'Antsirabe (coordonnées GPS : Altitude 1488 m ; Latitude S 19°50'02,12'' ; Longitude E 47°02'54,59'')

Ces échantillons ont été analysés comme des minéraux argileux [Chamayou et Legros, 1989 ; Brindley et Brown, 1980 ; Tan, 1991]. La composition minéralogique a été obtenue à partir de la diffraction des rayons X (Diffractomètre BRUKER D8 ADVANCE utilisant une radiation CuKa1 (λ = 1,54056)) sur des poudres obtenues par broyage à l'agate de bauges ou de sols, puis tamisés à 40µm et sur des lamelles de la fraction inférieur à 40µm obtenu par tamisage dégressif, pour éliminer le quartz, traitées par saturation à l'éthylène-glycol. Ces lamelles permettront de déterminer l'existence d'argiles gonflantes.

Des courbes thermogravimètrique (ATG) et thermodifférentielle (ATD) des échantillons de bauge et de sols ont été réalisées à l'aide d'un METTLER TOLEDO TGA2.

La porosité des échantillons solides de bauge a été déterminée à l'aide d'un poromètre à mercure MICROMERITICS AUTOPORE IV avec un cycle à basse pression (0,0037 MPa) et un cycle à haute pression (0.0007~413 MPa).

Pour cette caractérisation des bauges, nous avons déterminé la granulométrie ainsi que la plasticité de ces matériaux de construction.

3. Résultats et discussions

3.1 Analyse par diffraction des rayons x

Chaque famille argileuse se caractérise par une valeur de « d » du plan (001). Les réflexions principales d(001) = 26.5 Å ; d(001) = 12 Å ; d(001) = 8 Å ; d(001) = 27.7 Å et de d(001) = 18 Å de la figure 1 a et 1 b, indiquent la présence respectivement du quartz, de la kaolinite, de l'illite, du feldspath et de la Gibbsite [Brindley et Brown, 1980 ; Eslinger et Peaver, 1988] dans l'échantillon.



Figure n°1a : Famille argileuse se caractérise par la valeur de « d » du plan (001)



Figure n°1b : Bauge de Radama se caractérise par la valeur de « d » du plan (001)

Les résultats nous indiquent que les échantillons de bauges de Radama et d'Antanety ont la même composition malgré la différence d'âge de ces échantillons qui ont 3 siècles d'écart. Certes, l'intensité des pics diffère, ce qui indique différentes concentrations de minéraux, mais la composition est la même.

Ces deux échantillons ont aussi une composition similaire à l'échantillon de sol de Moramanga. La présence de kaolinite, de quartz et de Gibbsite dans ces trois échantillons, à des teneurs variables, nous renseigne que les sols utilisés dans la construction de bauges ancestraux sont des sols ordinaires situés in situ et ne proviennent donc pas de gîtes uniques ou spécifiques.

L'échantillon provenant du gîte d'Antsirabe nous montre une courbe, ainsi qu'une composition minérale différents des autres échantillons. Situé dans une zone de dépôt lacustre (sédimentaire), ce gîte sert principalement à fabriquer des adobes et des briques de terre cuite. L'argile dans ces échantillons est principalement constituée d'illites. Le second composé principal de l'échantillon est le feldspath, on note aussi l'absence de quartz, ainsi que de minéraux ferreux. On peut donc déduire que les sols utilisés pour la fabrication de bauges à Madagascar sont des sols latéritiques ordinaires des hauts plateaux, différents des sols argileux sédimentaires utilisés dans la fabrication de briques ou d'adobes.

Les résultats du DRX sont faussés du fait de l'« hyper-réfraction » du quartz. Cela a pour effet de tirer les courbes de réfraction et d'aplatir les valeurs des minéraux faiblement réfractaires. Or ici, ce sont les différents types d'argiles qui nous intéressent. Il faut donc isoler les minéraux de quartz des autres minéraux. Un tamisage à 40 µm permet d'éliminer les minéraux de quartz et se concentrer sur la portion 2 Å à 40 Å. Le résultat du tamisage est d'abord passé aux rayons X, ensuite il est traité à l'éthylène-glycol, puis de nouveau passé aux rayons X. Ceci permet de confirmer la présence ou non d'argiles gonflantes.



Figure n°2 : Diffractogramme de la fraction argileuse traitée à l'éthylène-glycol

Sur la figure 2, le pic à 8,88Å du diffractogramme de la fraction argileuse traitée à l'éthylène-glycol confirme la présence d'illite. Sur ce graphe la courbe de l'échantillon traité ne subit aucun déplacement. On remarquera juste différentes valeurs de diffraction, ceci nous confirme qu'il n'y a pas d'argiles gonflantes dans cet échantillon. C'est une affirmation de la conformité de l'utilisation de ce matériau pour la confection d'adobes et de briques.

Les figures 3,4 et 5 représentent les résultats des diffractions de rayon X sur les échantillons des bauges et l'autre sol prélevé à Moramanga



Figure n°3 : Diffractogramme de l'échantillon prélevé à Moramanga



Figure n°4 : Diffractogramme de la Bauge Radama



Figure n°5 : Diffractogramme de la bauge Tana - Antanety

Sur les figures 3,4 et 5, le pic à 12,37 Å et l'absence de pic autour de 7Å sur le diffractogramme de la fraction argileuse indiquent la présence de la kaolinite. Cette argile n'est pas gonflante car le traitement a l'éthylène-glycol ne présente pas de translation de pics vers la gauche.

La persistance de ce pic autour de 12,37 Å sur l'ensemble des difractogrammes de la figure 3,4 et 5 confirme la présence de kaolinite. Ceci permet d'expliquer en partie l'extrême durabilité des constructions en bauge à Madagascar.

3.2 Analyses thermogravimétrique des bauges

Déterminer les variations de masse d'un échantillon et/ou les transformations physico-chimiques d'un matériau lors d'un traitement thermique, tel est l'objectif de l'analyse thermique. Deux types d'analyses ont alors été pratiqués sur nos échantillons : une analyse thermique différentielle (ATD) et une analyse thermogravimétrique (ATG).

L'ATD a pour objectif d'évaluer l'énergie dégagée ou absorbée par le matériau quand il subit des transformations physiques ou chimiques lors d'un cycle thermique ; l'ATG mesure la variation de masse d'un échantillon lors d'un cycle thermique.



Figure n° 6a et 6b : Diagrammes de l'analyse thermique de la bauge « TANA-Antanety » et de la bauge de « Radama »

Les analyses thermiques des deux échantillons résultent que les bauges prélevées possèdent des caractéristiques presque identiques. La forme des courbes d'ATD et ATG dans la figure n°6a et 6b ci-dessus est typique de celle obtenue avec des matériaux contenant des minéraux argileux.

Trois événements de perte de poids sont observés dans les courbes ATG et ATG entre 60 et 70 °C, 250- 300°C et 500 - 520°C, dont la perte de poids totale est comprise entre 12,65 et 14,43%.

Selon les courbes ATD montrées aux figures 6a et 6b, le premier pic endothermique est lié à l'évolution de l'eau physiquement adsorbée par les particules de kaolinite. La seconde perte de poids est due à l'évolution de l'eau résultant de la déshydratation de la gibbsite et de sa transformation ultérieure en une phase de transition alumine. La troisième perte de poids est principalement associée à la déshydroxylation de la kaolinite, qui se transforme en métakaolinite. Un large pic exothermique autour de 350°C dû à la décomposition de la matière organique a été observé pour tous les échantillons étudiés. Dans notre cas, la perte de poids dans la plage de températures de 250 à 300 °C est considérée comme due à la déshydroxylation de la gibbsite [G. P. Souza, 2005], alors que celle dans la plage de 400 à 600 °C est due à la déshydroxylation des composants de l'argile.

3.3 Porosité des bauges

L'échantillon de la bauge trempée dans l'eau présente l'apparition des bulles d'air chassées par l'eau (voir photo n°3) ; Ainsi, les bauges sont des matériaux poreux et cette caractéristique est déterminée par l'essai poromètrique dont les résultats sont résumés dans le tableau n° 1. D'après les résultats, la porosité des bauges est de l'ordre de 34 à 36 pourcents ce qui correspond à la valeur moyenne des bauges dans le monde qui est de 30 à 40% [Keefe L, (2005)]. Les diamètres variés des pores sont illustrés dans les figures n° 7 et n° 8.



Photo n° 3 : bauge trempée dans l'eau, la présence des bulles montre la porosité

Echantillon	Porosité [%]	Moyenne porosité par site [%]	
Bauge Radama 1	35,56	35,72	
Bauge Radama 2	35,88		
Bauge d'Antanety 1	33,63	34,39	
Bauge d'Antanety 2	35,16		

Tableau nº 1 : Porosité de la bauge





Figure nº 7 : essai poromètre bauge Radama

Figure nº 8 : essai poromètre bauge d'Antanety

3.4 Analyse Granulométrique et Plasticité

Les résultats des essais granulométrique laser (fig.9) nous indiquent que les échantillons de bauges de Radama et d'Antanety ont la même distribution des grains de sol en termes de diamètre et de pourcentage malgré leur différence d'âge et leur site de prélèvement. Ces résultats sont aussi confirmés par des essais granulométriques, tamisage par voie humide (fig 10). Les courbes prennent les formes de granulométries étalées.



Figure n° 9 : Courbes granulométriques, par laser, de l'ensemble des bauges de Radama et d'Antanety



Figure n° 10 : Courbe granulométrique, tamisage par voie humide, de l'ensemble des bauges Radama et Tana (Antanety)

En ce qui concerne la plasticité, les divers états du sol correspondent à des plages d'humidité séparées par des teneurs en eau caractéristiques dites limites d'Atterberg, notamment :

- la limite de liquidité WI,
- la limite de plasticité W_p.

Le paramètre important ici c'est la limite de liquidité qui prédit la plasticité du matériau, une caractéristique du sol indispensable pour la fabrication de la bauge.

D'après ces deux paramètres, on peut définir ce qu'on attend par Indice de plasticité (Ip) du sol par la formule suivante.

Ip = Wl - Wp

Pendant l'exécution de l'essai Limites d'Atterberg, les échantillons des bauges Radama ne se décante pas facilement même après sept jours de lavage alors qu'un échantillon d'un nouveau sol, la décantation s'est faite seulement en deux heures après lavage (voir photo n° 4a et 4b). Ce constat montre la bonne cohésion des particules formant les bauges.





Photo n° 4a et 4b : Aspect de la décantation de la bauge et du sol naturel

Le tableau n°2, ci-après, résume les caractéristiques physiques de la bauge. Nous avons déterminé que les bauges ont une limite de liquidité égale à trente pourcents, ce sont des matériaux plastiques et elles contiennent un pourcentage des fines supérieur à 45 % ; résultats confirmés dans la littérature [4] [5].

Tableau nº 2 :	caractéristique	physique	de la bauge
----------------	-----------------	----------	-------------

n°	Echantillon	WL	WP	Gamma D [kN/m3]	% fines %]
1	bauge RADAMA	30.8	21.6	16.6	47
2	bauge TANA	31.1	19.5	15.7	46

4. Conclusion

Des recoupements des différents résultats des essais sont nécessaires pour bien identifier le matériau-bauge malagasy : le diffractogramme, la thermogravimetrie, la granulométrie, la plasticité et la porométrie.

La bauge est constituée par des matériaux fins plastiques, poreux, contenant des minéraux argileux et limoneux, non gonflants ainsi que des matériaux organiques. Cette caractérisation constitue un des outils importants et indispensables pour la revalorisation et la construction des nouveaux ouvrages en bauge. En effet, c'est un matériau durable, non toxique, simple à utiliser, écologique et très économique [6]. La poursuite de cette recherche doit tendre vers l'optimisation dans la mise en œuvre et l'amélioration des caractéristiques de la bauge à Madagascar.

Bibliographie

[1] Steve, B., (1997). Cob and Straw Bale Construction: The Perfect Marriage. Programme for Sustainable Living Fair, Montrose CA.

[2] Greer, M. and D. Short, (1995). Aspect of the Composite Behaviour of Cob. A Seminar Paper on Out of Earth II. University of Plymouth, England.

[3] Keefe, L., L. Watson and R.A. Griffiths, (2001). A proposed diagnostic survey procedure for cob walls. Inst. Civil Engin. Struct. Build., 146: 57-65.

[4] Hamard E, Cazacliu B, Razakamanantsoa A, Morel J-C, Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building, Building and Environment (2016)

[5] Myriam Olivier (CEREMA), Ali Mesbah (ENTPE). Introduction à la construction en terre Document préparatoire au séminaire-formation "Construire en terre crue de Guyane" Organisé par la DEAL Guyane (2016)

[6] Fabien Ginisty, TERRE CRUE, L'AUTONOMIE SOUS NOS PIEDS, DOSSIERS L'âge de faire (2018)

[7] G. P. Souza, S. J. G. Sousa, L. A. H. Terrones, J. N. F. Holanda , Mineralogical analysis of Brazilian ceramic sedimentary clays used in red ceramic (2005)

[8] Laurence Keefe, Earth Building: Methods and Materials, Repair and Conservation, (2005)