

**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série Sciences Technologiques

N°6 - 2021

Antananarivo - Madagascar

**Ministère de l'Enseignement Supérieur
et de la Recherche Scientifique**

ISSN 1025 - 3459



**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série

Sciences Technologiques

N° 6

2021

Membres du Comité de lecture :

- Pr RAMIARISON Claudine
- Pr RAKOTOARIVELO Marie Laure
- Pr ANDRIAMPARANY Louis Marius
- Dr RAHAINGO-RAZAFIMBELO Marcelline
- Dr RAHARIJAONA Nivoniaina Fahendrena

Ce numéro a été édité avec le concours de

Université d'Antananarivo

Service de Coopération et d'Aide Culturelle
(Ambassade de France)

et

Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique

Toute correspondance concernant les publications
RECHERCHES POUR LE DEVELOPPEMENT
doit être adressée au :

Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique
BP 6224 – Email : edition.cidst@gmail.com
Antananarivo - Madagascar
ISSN 1022-8691

RECHERCHES POUR LE DEVELOPPEMENT

Série Sciences Technologiques

N°6

2021

NOS PRINCIPALES REALISATIONS

**Fonds Documentaire consultable
gratuitement sur place**
24261 Ouvrages
1584 Titres de périodique

Production documentaire : Fiches techniques
66 thèmes sur l'agriculture et l'élevage

Base de données en ligne : MADADOC
(sur l'Environnement et le Développement Rural)
12642 Références

Base de données bibliographiques : MIREMBY
41537 Références multidisciplinaires

Edition de la Collection
"Revue Recherche pour le Développement"
42 numéros dont :

Série **Sciences Biologiques** : 25
Série **Sciences de l'Homme et Société** : 9
Série **Sciences Technologiques** : 2
Série **Médecine** : 6

Promotion de l'innovation :
Organisation de l'évènement Science Hack Day :
5 éditions
Mise en place de CATI et FABLAB



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique



**Votre partenaire
pour le développement durable
et l'innovation**

21, rue Fernand Kassanga
Andoharano - Tsimbazaza - BP 6224
Antananarivo 101
Tél : (261)20 22 566 37
E-mail : cidst@cidst.mg
Site Web : [http : www.cidst.mg](http://www.cidst.mg)
FB : [facebook.com/cidst](https://www.facebook.com/cidst)

SOMMAIRE

Partie I

Effet de l'eau salée sur les propriétés géotechniques des sols routiers

RANDRIATSIVA Mihamina Lala A., RANDRIANA Nambinina R.
RANDRIAMALALA Tiana R., RANDRIANOELINA Benjamin

9

Etude des comportements thermiques de revêtements du sol exposés au rayonnement solaire

RANDRIAMANAMPISOA Pierre Bénilde,
RAHELIARILALAO Bienvenue

25

Principes actifs des alicaments : allies pharmacologiques parfaits pour un développement durable

RANDRIAMANANTENA A. Andrin'Iranto, RASOAZANANY Elise O,
RAFALIMANANTSOA Jules, RATIARIMANANJATOVO Narindra,
RAZAFINDRAKOTO Fanoïna, RAKOTONDRAJAO Manampanirina F.,
ROBIJAONA R. Baholy

41

Emissions de gaz à effet de serre de l'électricité dérivée de la balle de riz

RAHELIARILALAO Bienvenue

69

Approches neuronales pour la prédiction des réponses statiques d'une poutre en flexion

RANDRIANARISOA Santatra M., ANDRIAMBAHOAKA Lydie C.,
RAZAFINJATO Victor, RAKOTOMALALA Jean L.

85

Elaboration de liants géopolymères à base de verre et de métakaolin

RAVELOMANANTSOA Serge, RAZANAJATOVO Harinivo O.,
RAZAFINDRAMANGA Athou Wega, HERINIAINA Tinasoa E.,
MANANIRINA HARINAIVO Alfa D., ROBIJAONA R. Baholy

107

Synergie socio-écologique : gage des infrastructures résilientes aux stress environnementaux

MANANTSOA Clermond, RAVONINJATOVO O A.,
RASOANANDRASANA E., RAZANATSOAVINA C., RALAHADY B. B.

125

Etudes comparatives du charbon de bois et du charbon vert

RAFEHIFANDAMINANA Innocente, RANDRIANARIVELO Frédéric,
RAHELIARILALAO Bienvenue

139

Etude des phénomènes de la foudre sur les tours de grandes hauteurs

RANAIVOARISOA Toky F., RAMAHATANA Faly Hobitokiniaina

153

Contrôle de la qualité de rendement d'un système Photovoltaïque avec stockage connecté au réseau	
ZOARITSIHOARANA Fitiavana Avo T., RAMANANTSIHOARANA Harisoa Nathalie, HERINANTENAINA Edmond Fils	167
Le déficit en eau dans le grand sud de Madagascar	
RAMANAKOTO Toky Nandrasana, MANJEHISOA Samurah Maechler, RAMAMINIAINA Florica Ormilla R.	179
Fabrication d'emballage bioplastique à partir des peaux de bananes	
RAMANOARY Andry Maminantenaina, ANDRIANIMANANA Jullie S., ANDRIANARISON Edouard Ravalison	199
Décontamination d'eau par rayonnement d'arc électrique	
RAFALIMANANA Sonia Jeanne, RAMAROZATOVO Vonjy	213
Etude de la performance du matériau composite renforcé de fibre de carbone	
ANDRIAMIHAJARIVO Sandratra Avo, RAKOTOMALALA Jean L. RAZAFINJATO Victor	225

Partie II

Caractérisation physique des briques artisanales en argile cuite par valorisation de déchets	
RAZAFIARIVONY Tahina, RANDRIANARISON M. P., RAHELIARILALAO B.	235
Enjeux environnementaux de revêtements routiers malagasy : Béton de ciment ou béton bitumineux	
RANDRIANANDRASANA Ndrianantsoa, RANDRIANARISON M. P., RAHELIARILALAO Bienvenue.	247
Ajouts végétaux et conditions de cuisson : effet sur la résistance des briques	
RANDRIANARISON Mino P., RAZAFIARIVONY Tahina., RANDRIANANDRASANA Ndrianantso, RAFAMANTANANTSOA Mampionona, HAJASOA Martial, RAHELIARILALAO Bienvenue	263
Caractérisation des murs ancestraux des hautes terres centrales de Madagascar	
ANDRIANIRINA Tsiory, KOERA Rasoloniaina, RANDRIAMALALA Tiana Richard, ANDRIANARY Philippe (1), RAKOTOSAONA Rijalalaina	279

Analyse multicritère de technologies routières en béton de ciment et bitumineux malagasy	
RANDRIANANDRASANA Ndrianantsoa, RANDRIANARISON M. P., RAHELIARILALAO Bienvenue	299
Ferme d'hydroliennes, côte ouest de Madagascar	
RANDRIATEFISON Nirilalaina, ANDRIANAHARISON Yvon	313
Contrôle structural de la circulation des fluides aurifères dans le secteur d'Ambodilafa	
RATEFIARIMINO Anick, RAKOTONANAHARY Serge M. A., RAKOTOMANANA Dominique	331
Mécanisation artisanale du repiquage et valorisation des déchets plastiques en riziculture	
ANDRIAMBAHOAKA Lydie C., RANDRIANARISOA Santatra M., RAZAFINDRABE Sitrakiniaina H., RAZAFINDRAKOTO Joseph R., RANDRIAMORASATA Josoa	347
Etude du mécanisme de stabilisation des sols par des stabilisants naturels : cas du purin de boeuf	
RAMIANDRISOA Antsa L., RANAIVONIRIVO Velomanantsoa G., RAKOTOARIVONIZAKA Ignace, RAJAONA R. Andrianaivoravelona	361
Essai de minéralisation du clinker par le sulfogypse et le verre	
RAZAFINDRAMANGA A. Wega., RAZANAJATOVO Harinivo O., HERINIAINA Elysé T., RAVELOMANANTSOA Serge, ALFA Mananirina H, ROBIJAONA R. Baholy	379
Remplacement du ciment dans la fabrication des bétons drainants à partir des matériaux locaux	
KOERA Rasoloniaina A., RATSIMBAZAFY Mikaela H., RAKOTOSAONA Rijalalaina, RANAIVONIRIVO Gabriely V.	389
Accessibilité des gares routières d'Antananarivo, analyses et strategies d'amélioration	
RAMANITRARIO Lantonirina C., PRAENE Jean Ph., RAZAFINJATO Victor, RAKOTOMALALA Jean Lalaina	401
Optimisation par plan de mélange de la formulation du béton hydraulique	
RAOBIMANDRANTO Navelanirina A., RAKOTOMALALA Jean Lalaina, RAZAFINJATO Victor	413

Partie II

CARACTERISATION PHYSIQUE DES BRIQUES ARTISANALES EN ARGILE CUITE PAR VALORISATION DE DECHETS

par

RAZAFIARIVONY Tahina⁽¹⁾, RANDRIANARISON M. P.⁽¹⁾

RAHELIARILALAO B.⁽¹⁾

(1) Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo

RESUME

A Madagascar, 22,5% des maisons d'habitation sont construites en briques d'argile cuite pour la simplicité de leur emploi, de leur fabrication et pour leur faible coût de revient par rapport à celui des autres matériaux de construction. A part l'utilisation de combustibles alternatifs, les techniques de fabrication de briques artisanales n'ont pas évolué notablement depuis plusieurs décennies. L'objectif de l'étude est de valoriser les déchets notamment les poussières de charbon, les balles de riz et les bagasses de canne à sucre en les utilisant dans le mélange des matières premières afin d'améliorer les propriétés physiques des briques. Les ajouts ont été incorporés en différentes proportions pour pouvoir étudier les caractéristiques physiques des briques et les comparer avec celles des briques courantes. Deux types de combustibles ont été utilisés durant la cuisson : les tourbes et les balles de riz mélangés à des fines de charbon de bois. Parmi les caractéristiques physiques étudiées, la masse volumique des briques avec ajouts, quels que soient leur type et leur proportion dans le mélange, est faible par rapport à celle des briques courantes qui est de $1,58\text{g/cm}^3$. La valeur maximale de $1,48\text{ g/cm}^3$ correspond à 1,25% de bagasse au niveau des combustibles tourbes. Les porosités des briques avec ajouts est supérieure à celle des briques courantes qui est de 20,04%. La valeur minimale de 23,37% est obtenue avec 1,25% de poussier de charbon avec balles de riz et fines de charbon comme combustibles. Les briques obtenues sont plus légères et pourraient être plus performantes en matière de réduction des échanges de chaleur dans une maison.

Mots clés : Bagasse, balle de riz, masse volumique, porosité, poussier de charbon, tourbe, brique artisanale.

ABSTRACT

In Madagascar, the part of handmade clay bricks is the residential houses building is 22.5%: it's easy to use them in wall mounting or in foundation, their manufacturing

is simple and their cost are to low compared to other similar item. Except using of alternative fuels, handmade brick process has not changed significantly over the past several decades. The objective of our study is to promote green waste such coal dust, rice husk and bagasse of cane by using them as additional compound in the raw materials to improve the physical properties of the clay burned bricks. We incorporated the additions in the mixture with different proportions to be able to appreciate the physical characteristics of the bricks and to compare them with common bricks. Two types of fuels were used during the cooking process especially peat and rice husks mixed with coal fines. Among the physical characteristics studied, the volumic mass of bricks with additions, whatever their type and their proportion in the mix, are low compared to those of common bricks which is 1.58g/cm^3 . The maximum value of 1.48g/cm^3 corresponds to 1.5% of bagasse with the peat as fuels. The porosities of bricks with additions are higher than in common bricks which is 20.04%. The minimum value of 23.37% is obtained with 1.5% of charcoal dust with rice husks and charcoal fines as fuels. In this way, we obtained a lighter brick that could be more effective in reducing heat exchange in a house.

Keywords : Artisanal brick, bagasse, coal dust, peat, porosity, rice husk, volumic mass.

INTRODUCTION

Dans le monde, la brique d'argile cuite est l'un des matériaux le plus utilisé les plus utilisés en maçonnerie dans le domaine de la construction en raison de ses propriétés (Aeslina A. K. et *al.*, 2012 ; Usai G., 1985). Les modes de production artisanale de briques de terre cuite sont similaires dans beaucoup de pays (Neslihan D. et *al.*, 2017 ; Bonapace C., 2003) mais se différencient principalement au niveau des combustibles utilisés pour la cuisson. A Madagascar, les murs de 22,5% des maisons d'habitation sont construits à partir de briques pleines d'argile cuite (INSTAT, 2010). Depuis longtemps, les techniques de fabrication des briques artisanales n'ont pas connu d'évolution à part l'utilisation des combustibles alternatifs durant la cuisson (Andrianarimanana J. C. O., 1998). Ainsi, en vue d'apporter une innovation dans la technique de fabrication des briques en terre cuite, l'objectif de notre étude est de valoriser les déchets tels que les poussières de charbon, les bagasses de canne à sucre et les balles de riz en les incorporant à différentes proportions dans le mélange des matières premières et non pas en les utilisant comme combustibles pour la cuisson. L'étude consiste alors à fabriquer des briques artisanales sur le site de Sabotsy Namehana en utilisant durant la cuisson deux types de combustibles, notamment, la tourbe et les balles de riz mélangés avec de la fine de charbon. Dans le cadre de ce travail, quelques propriétés physiques des briques ont été étudiées à savoir les masses

volumiques et les porosités afin de déterminer les caractéristiques des briques obtenues et de les comparer avec celles des briques courantes.

MATERIELS ET METHODES

Site de fabrication

Le site de Sabotsy Namehana situé dans le District d’Antananarivo Avaradrano, région d’Analamanga a été choisi. La fabrication de briques artisanales a été faite dans les rizières situées près du site d’extraction de l’argile utilisée.

Composition des matières premières

- Les matières premières utilisées sont :
- L’argile ;
- L’eau ;
- L’ajout (bagasse de canne à sucre découpée / balle de riz / poussier de charbon).

L’argile

Les enquêtes menées auprès des briquetiers ont permis de déterminer que pour la fabrication de 50 unités de briques artisanales, le besoin moyen en masse d’argile est de 140 kg.

Les ajouts ou additifs

Pour la fabrication de 50 unités de briques artisanales, les proportions des additifs incorporés dans le mélange diffèrent (Tableau 1)

Tableau 1 : Proportions des additifs dans le mélange par rapport à la masse d’argile

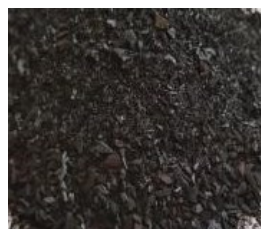
Echantillons	Poussier de charbon (PC)		Balle de riz (BR)		Bagasse (BG)	
	Taux (En %)	Masse (En kg)	Taux (En %)	Masse (En kg)	Taux (En %)	Masse (En kg)
PC>	2,5	3,5				
PC<	1,25	1,75				
BR>			2,5	3,5		
BR<			1,25	3,5		
BR>PC	1,25	1,75	2,5	3,5		
BR<PC	2,5	3,5	1,25	1,75		
BG>					2,5	3,5
BG<					1,25	1,75

Source : Auteurs

PC = poussier de charbon BR = balle de riz BG = bagasse

PC< désigne une brique composée de poussier de charbon avec un taux inférieur à 1,25% en masse d'argile.

D'après le Tableau 1, les 8 compositions réalisées se différencient par les proportions d'additifs dans le mélange des matières premières.



Source : Auteurs

Photo 1 : bagasse découpée

Photo 2 : balle de riz

Photo 3 : poussier de charbon

L'eau

Le dosage de l'eau varie selon la proportion en masse d'argile ajoutée dans l'échantillon. La bagasse et la balle de riz absorbent beaucoup plus l'eau par rapport au poussier de charbon qui est devenu très mou dû à un excès d'eau (Andrianarimanana H., 2015 ; Delot P., 2015 ; Mahitavelo Z. A. D., 2014). Le manque ou l'excès d'eau dans le mélange complique le moulage des briques (Smith R. G., 1980 ; Smith R. G., 2001).

Procédé de fabrication de briques artisanales

Les étapes de fabrication des briques en terre cuite

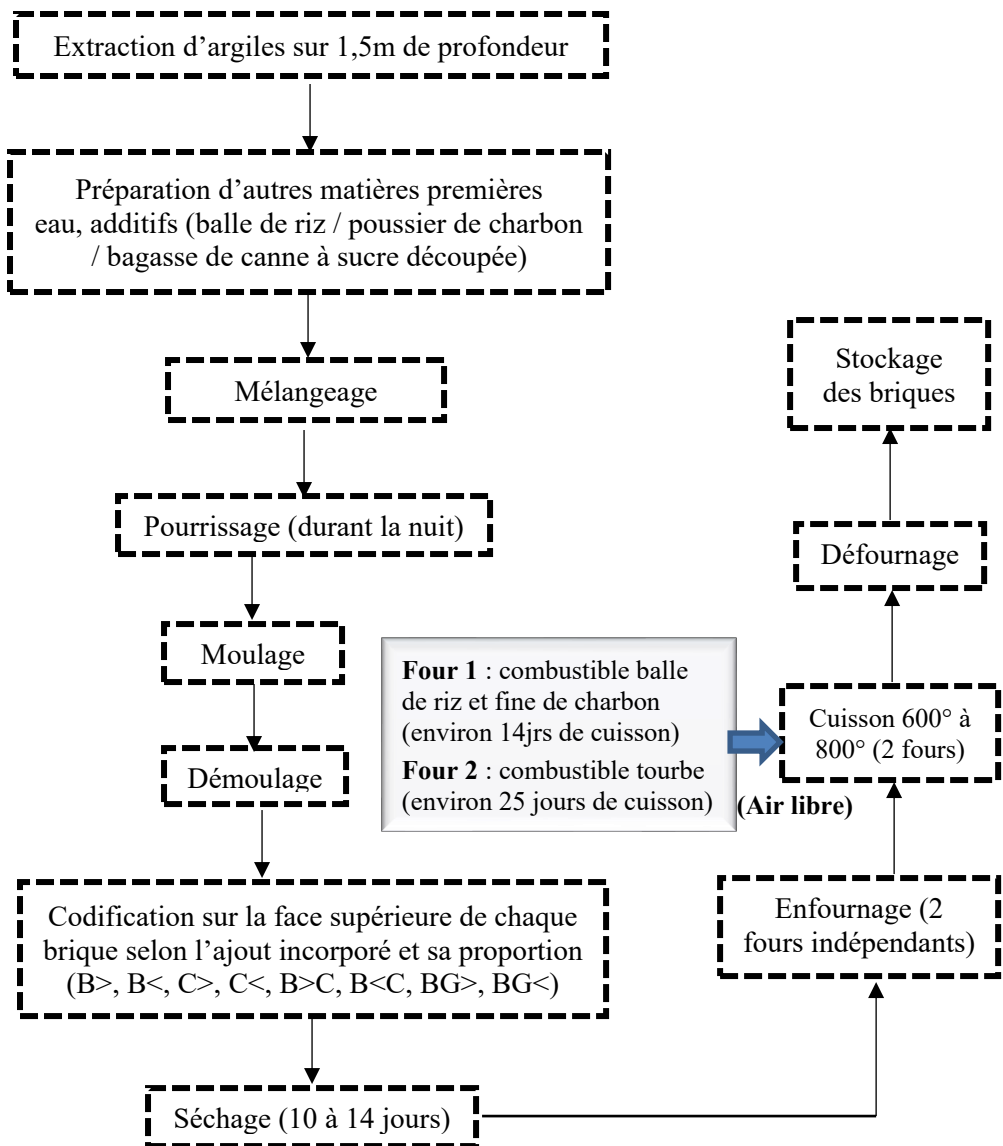
La fabrication de briques artisanales avec les ajouts a suivi les étapes suivantes : (Raketamanga M. L., 2008 ; Smith R. G., 1980 ; Smith R. G., 2001). (Figure 1)

Caractérisation physique des briques en argile cuite

Les essais physiques ont été réalisés selon les spécifications techniques du TBM (Travaux de Bâtiment à Madagascar) T-IV N.M.2-A-2 réglementées par l'arrêté 1877-PCH/SAUH/TR du 26 juillet 1963. L'étude a déterminé les masses volumiques et les porosités des échantillons de briques selon les proportions d'additifs des additifs. On a enfourné 400 briques ont été enfournées dans chacun des 2 fours avec 2 combustibles différents :

Four N° 1 : combustible balle de riz et fine de charbon

Four N° 2 : combustible tourbe.



Source : Auteurs

Figure 1 : Procédé de fabrication des briques artisanales avec des ajouts (PC / BR / BG) (Source : Auteurs)

Le Tableau 2 récapitule le nombre de briques enfournées et les briques utilisables (non cassées, non déformées, non fissurées, avec cuisson parfaite reconnaissable par leur couleur)

Tableau 2 : Nombre de briques enfournées et utilisables

N° Four	Ajout	Briques enfournées	Briques utilisables
1	Balle de riz et/ou poussier ce charbon	300	275
2		300	280
1	Bagasse de canne à sucre	100	90
2		100	93

Source : Auteurs

Parmi ces briques utilisables, chaque essai a été fait sur 7 échantillons, le résultat retenu est la moyenne arithmétique.

Détermination de la masse volumique

La masse volumique ρ d'une brique caractérise la masse de la brique par unité de volume. Elle est définie par :

$$\rho = \frac{m}{V} \quad (1)$$

ρ : masse volumique d'une brique (g/cm³)

m : masse d'une brique (g)

V : volume d'une brique (cm³)

Détermination de la porosité

La porosité est essentielle pour connaître l'ensemble des vides dans une brique. Après avoir sécher la brique pendant 48 heures à 70°C dans une enceinte ventilée en présence d'un desséchant, elle a été pesée pour obtenir la masse sèche m_s . Après immersion dans l'eau pendant 48 heures, la même brique a été pesée pour avoir la masse humide m_h . La porosité est donnée par la relation :

$$\%P = \frac{m_h - m_s}{m_s} \times 100 \quad (2)$$

$\%P$: porosité d'une brique (%)

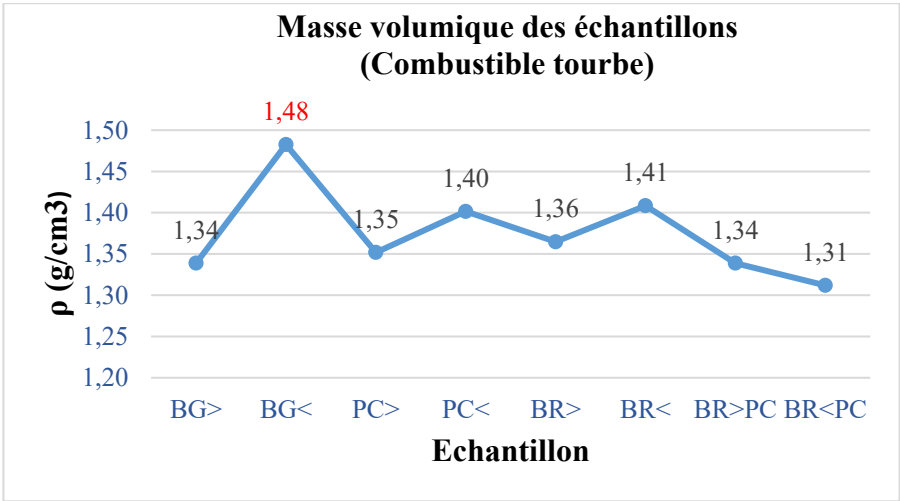
m_h : masse humide (g)

m_s : masse sèche (g)

RESULTATS

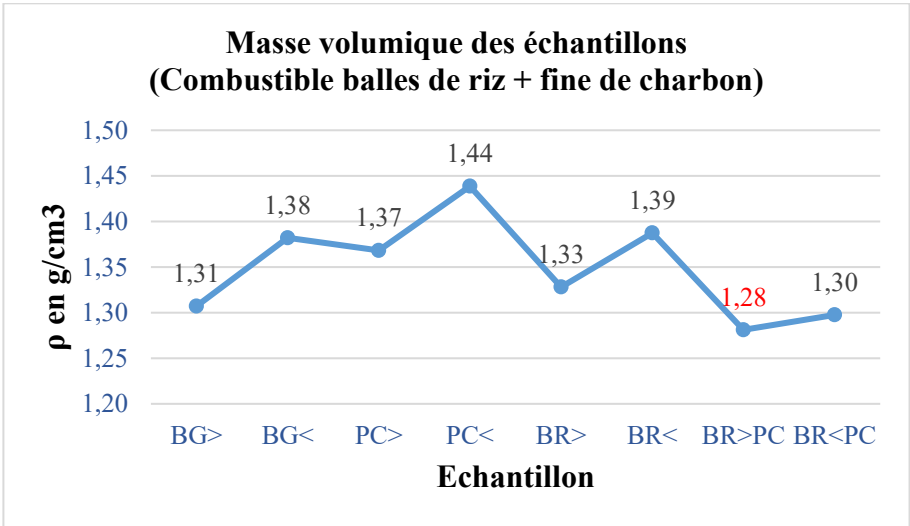
Les résultats suivants ont été obtenus à partir des valeurs moyennes sur 7 échantillons de brique selon les types d'additifs, leur proportion ainsi que les types de combustibles utilisés.

Masse volumique



Source : Auteurs

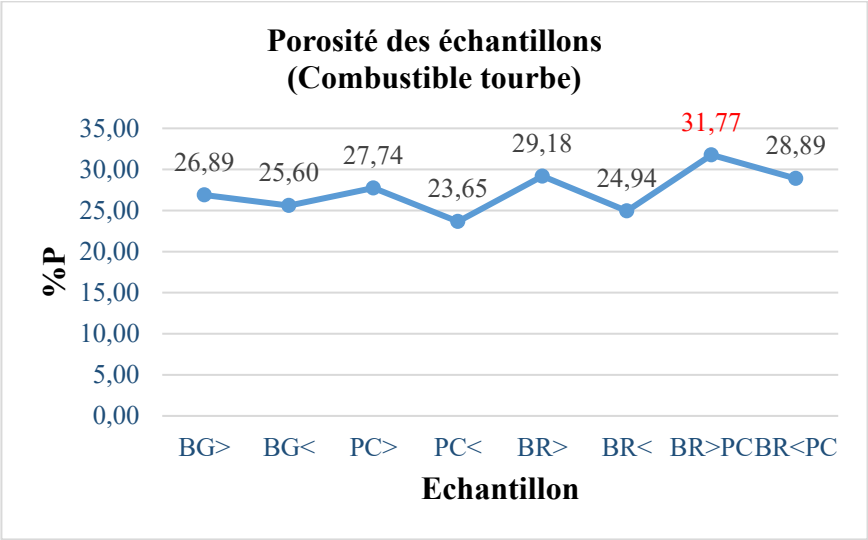
Figure 2 : Masses volumiques des briques avec ajouts et combustible tourbe



Source : Auteurs

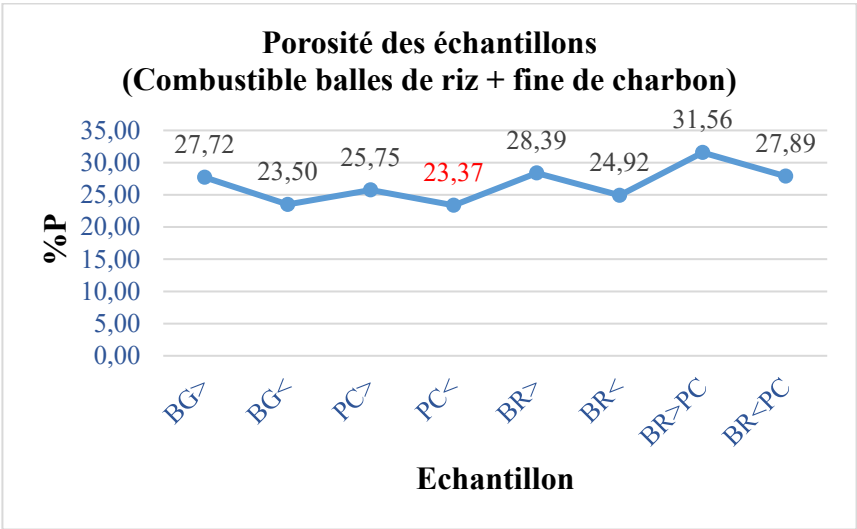
Figure 3 : Masse volumique des briques avec ajouts et combustible balle de riz et fine de charbon

Porosité



Source : Auteurs

Figure 4 : Porosité des briques avec ajouts et combustible tourbe



Source : Auteurs

Figure 5 : Porosité des briques avec ajouts et combustible balles de riz et fine de charbon

Des briques avec ajouts et des briques ordinaires sans ajouts ont été enfournées en même temps dans les 2 fours. Les résultats obtenus ont pu donner les caractéristiques physiques des briques sans additifs (Tableau 3) ; ces valeurs ont été prises comme valeurs de référence.

Tableau 3 : Valeurs de référence de grandeurs physiques des briques ordinaires

Masse volumique (g/cm ³)	Porosité (%)
1,58	20,04

Source : Auteurs

DISCUSSION

A titre de comparaison, quel que soit le type d'additif et de sa proportion incorporée dans le mélange ainsi que les combustibles utilisés :

- D'une part, les masses volumiques des échantillons varient de 1,28 g/cm³ à 1,48 g/cm³ qui sont inférieures à celle des briques ordinaires qui est de 1,58 g/cm³.
- D'autre part, les porosités des échantillons varient de 23,37% à 31,77% qui sont supérieures à celle des briques ordinaires de 20,04%.

En matière de masse volumique, l'échantillon ayant une caractéristique proche de celle d'une brique ordinaire est l'échantillon avec BG< (bagasse au taux de 1,25% en masse d'argile) cuit avec le combustible tourbe.

Quant à la porosité, c'est l'échantillon PC< (poussier de charbon au taux de 1,25% en masse d'argile) qui présente la caractéristique proche d'une brique courante. Le combustible utilisé est la balle de riz mélangée avec de la fine de charbon.

La plupart des briques fabriquées avec différents types de déchets (mégots de cigarettes, caoutchouc, boue, ...) ont présenté des effets positifs en produisant des briques légères, en augmentant la porosité et en améliorant la conductivité thermique des briques en terre cuite. (Aeslina A. K. et *al.*, 2012 ; Saffer A., Yassen, 2017 ; Aeslina A. K. et *al.*, 2009 ; Usai G., 1985). C'est aussi le cas de nos briques.

Les valeurs inférieures des masses volumiques et les valeurs supérieures des porosités résultent du fait que la balle de riz, le poussier de charbon et la bagasse jouent un rôle de combustible interne. Pendant la cuisson à haute température, ils sont carbonisés et présentent des vides à l'intérieur des briques. Ceci permet d'obtenir des briques un peu plus légères qui sont plus résistantes à l'échange thermique par rapport aux briques ordinaires. Puisque la masse volumique d'une brique avec ajout est inférieure à celle d'une brique ordinaire, sa conductivité thermique est faible ; ce qui implique une résistance thermique élevée apportant un meilleur confort thermique (Extrait de l'AGW, 2008 ; Aeslina A. K. et *al.*, 2009 ; Folaranmi J., 2009).

CONCLUSION

Selon les études réalisées, les balles de riz, les bagasses et les poussières de charbon sont bel et bien valorisés parce qu'en plus de leur utilisation habituelle comme combustibles, ils peuvent être aussi utilisés comme ajouts dans le mélange des matières premières pour la fabrication des briques artisanales en vue de l'amélioration de certaines propriétés physiques des briques. Au travers de ces expériences, on en déduit que l'incorporation des ajouts augmente les porosités totales des briques, ce qui contribue à l'obtention des briques poreuses plus légères. Elles peuvent être utilisées en construction, pour des murs porteurs. On s'en sert aussi pour la réalisation d'ouvrages décoratifs comme les claustras. Les ajouts incorporés dans le mélange diminuent les masses volumiques et donc les conductivités thermiques aussi. Ces propriétés leur confèrent une résistance thermique plus élevée, ce qui les rend plus performantes en matière de la réduction des échanges de chaleur et on pourra les utiliser comme des matériaux d'isolation thermique (Delot P., 2015).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Aeslina A. K., Mohajerani A. A., Roddick F., Buckeridge J. (2009). Density, Strength, Thermal Conductivity and Leachate Characteristics of Light-Weight Fired Clay Bricks Incorporating Cigarette Butts. 1035-1041. Proceedings of World Academy of Science, Engineering and Technology. Japan : ISSN.
- 2) Aeslina A. K., Noor A. S. (2012). (2012). An Overview of Wastes Recycling in Fired Clay Bricks. Vol. 4 No. 2, p. 53-69. International Journal of Integrated Engineering.
- 3) Andrianarimanana H. (2015)., Elaboration et caractérisation de panneaux et de briquettes de particules de bagasse. Mémoire de Master en Science des Matériaux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- 4) Andrianarimanana J. C. O. (1998). Contribution à l'étude comparative des méthodes traditionnelles et de l'utilisation du four IGLOO dans la production des briques en terre cuite à Madagascar. Thèse de doctorat en Science des Matériaux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- 5) Bonapace C., Sestini V. (2003). Traditional Materials and Construction Technologies used in the Kathmand. United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization, 2.
- 5) Delot P. (2015). Balle de riz, Compilation d'éléments techniques en vue de son utilisation en isolation thermique, p. 74-77.
- 6) Folaranmi J. (2009). Effect of Additives on the Thermal Conductivity of Clay, Leonardo Journal of Sciences, 14.

- 7) Institut National de la Statistique (INSTAT), Enquête périodique auprès des ménages. Rapport principal, 2010.
- 8) MAHITAVELO Z. A. D. (2014). Contribution à la valorisation de la bagasse – application à la fabrication de béton de fibre. Mémoire de Diplôme d'Etudes Approfondies en Science des Matériaux de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- 9) Neslijan D., Adnan N. (2017). Traditional manufacturing of clay brick used in the historical buildings of Diyarbakir (Turkey) 346 – 359. *Frontiers of Architectural Research*, 6.
- 10) Raketamanga M. L. (2008), Analyse comparative des procédés de fabrication de briques d'argile cuite. Mémoire de Master en Science des Matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.
- 11) Saffer A., Yassen I., Raz M. (2017). Effects of coal and wheat husk additives on the physical, thermal and mechanical properties of clay bricks. 131-138. *Ceràmica y Vidrio*, 56.
- 12) Smith R.G. (1980). La fabrication de briques par des artisans Malgaches et la création d'un centre pilote. Bureau International du Travail. Rapport du consultant, Juin-Juillet.
- 13) Smith R.G. (2001). La fabrication de briques par des artisans malgaches et la création d'un centre-pilote. In Rapport de consultance. Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques, Antananarivo.
- 14) Usai G. (1985). Utilization of Sulcis coal ash in the production of masonry bricks, *Ziegelindustries International*, 9.

ENJEUX ENVIRONNEMENTAUX DE REVETEMENTS ROUTIERS MALAGASY : BETON DE CIMENT OU BETON BITUMINEUX

par

RANDRIANANDRASANA N.⁽¹⁾, RANDRIANARISON M.P.⁽¹⁾

RAHELIARILALAO B.⁽¹⁾

(1) Equipe d'Accueil Doctorale de Géosciences, Technologie des Poudres, Matériaux Divisés et Habitat Economique,
ÉD Ingénierie et Géoscience Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo

RESUME

A Madagascar, 22,5% des maisons d'habitation sont construites en briques. Des chaussées en revêtement de Béton de Ciment Compacté au Rouleau, BCCR, sont expérimentées dans diverses localités de Madagascar. Cette formule apparaît comme une solution attractive techniquement et économiquement par rapport au revêtement traditionnel en Béton Bitumineux, BB. Cependant, les aspects environnementaux, émergés par le contexte du développement durable, n'ont jamais été abordés jusqu'ici. D'où l'intérêt de cette étude, qui se focalise sur les deux problématiques de l'environnement, les rejets de polluants et l'épuisement de ressources. Le but est d'estimer et de comparer les émissions de gaz à effet de serre, GES, et les consommations énergétiques de ces deux types de revêtement selon la méthode d'Analyse de Cycle de Vie régie par ISO 14040 - 14044. Les frontières de l'étude, du berceau à la réalisation des revêtements et leur maintenance sur quinze années, ne tiennent pas compte du trafic. Les données d'inventaire enregistrées dans Excel 2010 sont traitées et traduites en valeur d'impact par PLARCE 1.0, une interface développée en langage Visual Basic Application. Les résultats montrent que la phase maintenance de la chaussée revêtue en BB a beaucoup pesé dans le bilan global de sa consommation énergétique qui dépasse de 31,24% celui du BCCR. La tendance est inversée en émission de GES. Le surplus de rejets de 65,91% affiché par le revêtement en BCCR est dû en grande partie à l'utilisation du ciment, un des matériaux de construction très émissifs. Les paramètres environnementaux sont appelés ainsi, à élargir la base d'une analyse multicritère de décision autour d'une infrastructure routière.

Mots clés : Analyse de Cycle de Vie, Béton Bitumineux à chaud, Béton de Ciment Compacté au Rouleau, Émission de GES, Consommation énergétique.

ABSTRACT

Pavements made of Roller-Compacted Cement Concrete, RCCR, are being experimented in various localities in Madagascar. They appear to be a technically and economically attractive solution compared to the traditional Hot Asphalt Concrete pavement, HAC. However, the environmental aspects, emerging from the context of sustainable development, have never been addressed so far. Hence the interest of this study, which focuses on the two environmental impacts, the discharge of pollutants and the depletion of resources. The aim is to estimate and compare the GreenHouse Gas emissions, GHG, and energy consumption of these two types of pavements according to the methodological framework of Life Cycle Assessment conform to ISO 14040 - 14044. The study boundaries, from the cradle to the pavements construction and its maintenance over fifteen years, do not take traffic into account. The inventory data recorded in Excel 2010 are processed and translated into impact values by PLARCE 1.0, an interface developed in Visual Basic Application language. The results show that the maintenance phase of the HAC pavement has a significant impact on the overall energy consumption, which is 31,24% higher than that of the RCCR. The trend is reversed in terms of GHG emissions. The 65,91% surplus of emissions displayed by the BCCR pavement is largely due to the use of cement, one of the most emissive building materials. Environmental parameters are called upon to broaden the basis of a multi-criteria analysis for decision-making around road infrastructure.

Keywords : Life Cycle Assessment, Hot Asphalt Concrete, Roller Compacted Cement Concrete, GHG Emission, energy consumption.

INTRODUCTION

Le revêtement en Béton Bitumineux (BB) reste encore le plus utilisé à Madagascar (MTPT, 2004). Face aux maigres budgets alloués aux entretiens routiers, l'état des revêtements routiers dépourvus de n'importe quel entretien, s'empirent déplorablement. Les aléas climatiques tropicaux de la grande île ne font qu'accentuer la situation. D'après Rakotomalala J. L. et *al.*, 2013, la technologie du revêtement en Béton de Ciment Compacté au Rouleau (BCCR) pourrait pallier ce problème.

Malgré les fiabilités techniques confirmées du BCCR par rapport au BB, il reste à élucider les questions d'ordre environnemental. En effet, Madagascar, en ratifiant les différents accords internationaux sur le climat, doit faire preuve d'engagement environnemental dans ses projets de chantiers routiers. Cette étude aborde donc les côtés technologiques de revêtements routiers malagasy en les rattachant aux impacts environnementaux, et ce, dans le but de répondre aux questions liées au développement durable. L'hypothèse émise est qu'un revêtement en BCCR n'exige aucun rechargement, sur une quinzaine d'années, mais garde toujours son état de traficabilité. Contrairement au revêtement en BB où un rechargement périodique, tous

les cinq ans, est recommandé (CEBTP, 1984). Ainsi, l'analyse s'appuie sur les inventaires de flux entrant et extrant dans le système de produit en tenant compte de ce contexte temporel.

MATERIELS ET METHODES

Méthodologie d'analyses environnementales

L'analyse environnementale se fait selon la méthodologie d'Analyse de Cycle de Vie (ACV), régie par les références normatives (ISO, 1997, 1998, 2000a, 2000b).

L'objectif est de réaliser une analyse comparative environnementale sur 1 km de revêtements routiers BB et BCCR malagasy. Une frontière du « berceau aux maintenances » des revêtements, sur une quinzaine d'années est choisie et un intérêt particulier est accordé aux phases de cycle de vie " k " suivantes :

- L'acquisition de Matériaux Principaux (MP) routiers pour le chantier neuf ;
- La transformation des MP en Matériaux Intermédiaires (MI) puis en Matériaux Intermédiaires Composés (MIC) pour le chantier neuf ;
- Les travaux de chantier neuf ;
- Les précédentes étapes, mais cette fois, dans le cadre d'un chantier d'Entretien Périodique et ;
- Les différents modes des transports induits (routier et maritime).

Les impacts décomptés sont l'émission de Gaz à Effet de Serre, GES exprimé en $(\text{kgéqCO}_2 / \text{km})$ et une consommation énergétique, CE exprimée en (MJ / km) . Le modèle s'organise autour du concept d'un Système Complexe. Ainsi, chaque revêtement a été choisi comme étant le Système (S), les Sous-Systèmes (SS_i), ils sont représentés par les couches de revêtements. Par ailleurs, on désigne par " M_{ij} " le matériau " j " qui entre dans la composition du Sous-Système (SS_i).

Ainsi, en termes d'impacts I , on a :

$$I = \sum_k \sum_i I_{SS_{ik}} \quad (1)$$

$$I_{SS_{ik}} = \sum_j I_{M_{ij}}^k \quad (2)$$

$$I_{M_{ij}}^k = q_{ij}^k \times FI_j^k \quad (3)$$

Avec :

- I : la valeur d'impact global du Système (S) tout au long du cycle de vie
- $I_{SS_{ik}}$: la matrice colonne d'impact du Sous-Système au cours du cycle de vie " k " ;
- $I_{M_{ij}}^k$: la matrice colonne d'impact du matériau " j " constitutif du Sous-Système " i " au cours du cycle de vie " k " ;
- q_{ij}^k : la matrice rectangulaire du Flux du matériau " j " constitutif du Sous-Système " i " au cours du cycle de vie " k " ;
- FI_j^k : la matrice colonne des Facteurs d'impacts " j " constitutif du Sous-Système " i " relatif cycle de vie " k ".

Les décomptes d'impacts font appel à PLARCE 1.0, outil développé en langage Visual Basic Application (VBA).

Méthodologie d'acquisition des facteurs d'impacts

Madagascar ne dispose pas encore de bases de données d'impacts en matière ses matériaux de construction. Cependant, les contextes énergétiques malagasy liés aux processus de production des matériaux et des services sont traités par SIMAPRO (JIRAMA, 2018 ; OMH, 2019) (Pré consultants, 2016). Par ailleurs, les bases d'Inventaires de Cycle de vie dans le domaine du Génie Civil sont traduites en termes d'impact par SIMAPRO, en mettant en exergue les contextes énergétiques malagasy.

Tableau 1 : les bases d'inventaires de cycle de vie

Matériaux	Bases d'inventaires
Produits pétroliers	OMH
Énergie électrique	JIRAMA
Bitume	EuroBitume (eurobitume, 2012)
Matériaux des gîtes	Ecoinvent (Ecoinvent, 2007)
Matériaux des carrières et granulats	Ecoinvent (Ecoinvent, 2007) / IVL (Hakkan, 2001)
Ciment	Ecoinvent (Ecoinvent, 2007)
Service de transport	Ecoinvent (Ecoinvent, 2007)
Engins	FNTP (FNTP, 2000)

Hypothèses

Zone d'études

L'étude s'intéresse aux revêtements d'un tronçon de la RN2 malagasy. La situation de cette chaussée justifie ce choix. En effet, la RN2, liant Toamasina à la capitale, connaît un grand trafic en poids lourd et constitue un enjeu économique vital pour le pays.

Hypothèses techniques

La largeur de la chaussée est de 5,5m (MTPT, 2004), accotement exclus. Selon (Ratiarison J., 2013), la RN2 a un trafic $T2$ selon le classement de (LCPC / SETRA, 1994). Généralement une épaisseur de revêtement en BB de 4cm est conseillée pour ce cas de trafic (LCPC / SETRA, 1994). Cependant, le mauvais état récurrent de revêtement B.B induit à émettre l'hypothèse selon laquelle la chaussée doit être sous une déflexion nécessitant une épaisseur de 6cm en BB. Un rechargement périodique de 3cm en BB s'opère ensuite, tous les cinq (05) ans, pour garder un bon comportement mécanique de la chaussée (CEBTP, 1984).

En ce qui concerne la variante BCCR, une épaisseur de 15cm est suffisante pour ce cas de trafic (Abdo et al., 1993) avec comme hypothèse une classe de plateforme moyenne. Durant cette période considérée, son Entretien Périodique n'est pas nécessaire.

Quant aux formulations des MIC, celle du BB est consignée par COLAS France (Michel C. and Julian B., 2003) tandis que celle de BCCR suit la référence fournie par (Rakotomalala J. L. et *al.*, 2013).

Hypothèses d'ACV

Les distances de cycle de vie sont représentées sur la Figure 1. Les hypothèses sont basées sur le circuit d'approvisionnement des produits pétroliers malagasy (OMH, 2019) et les zonages des ressources des gîtes et des carrières effectués par le LNTPB (Fanilontsoa J., 2015).

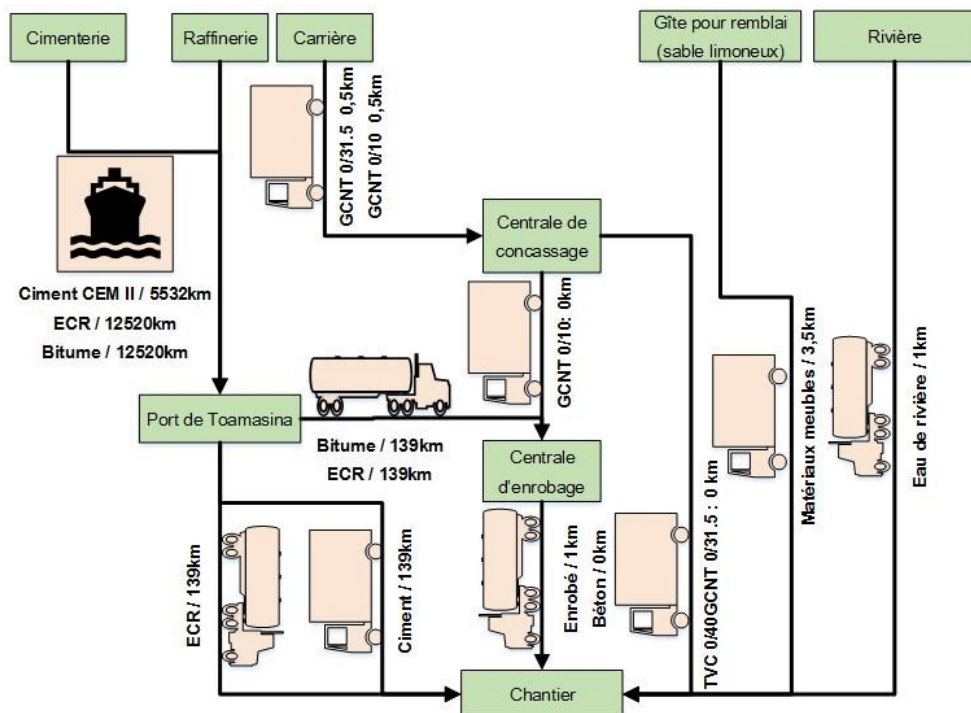
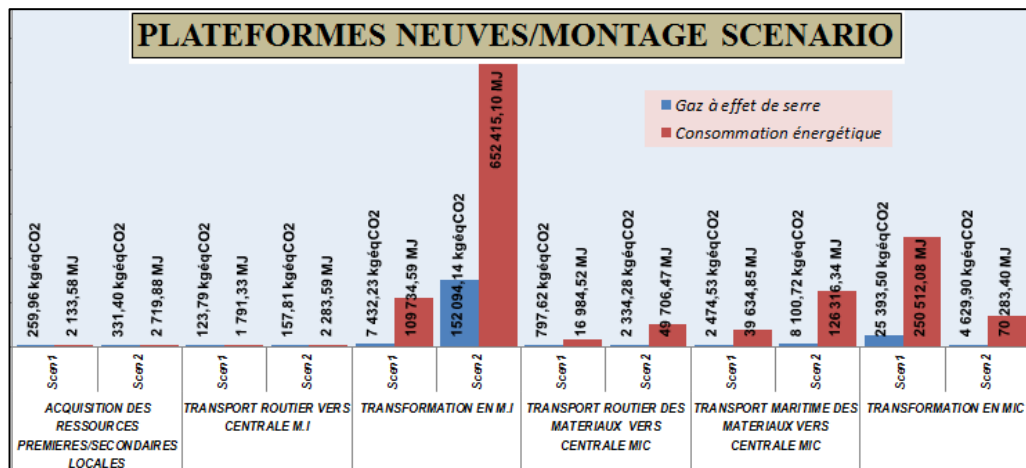


Figure 1 : les distances d'approvisionnement des matériaux

RESULTATS

Bilan d'impact

Dans PLARCE, la structure en BB est modélisée sous scénario 1 (scen 1) et celle en BCCR est sous scénario 2 (scen 2). En stade de construction initiale (Figure 2), les deux scénarios se trouvent sur des écarts d'impacts frappants. Le scénario de revêtement en BCCR est à 3,47 puis à 4,41 fois beaucoup plus pesant que celui de BB, respectivement, en termes d'émission de GES et de consommation énergétique.



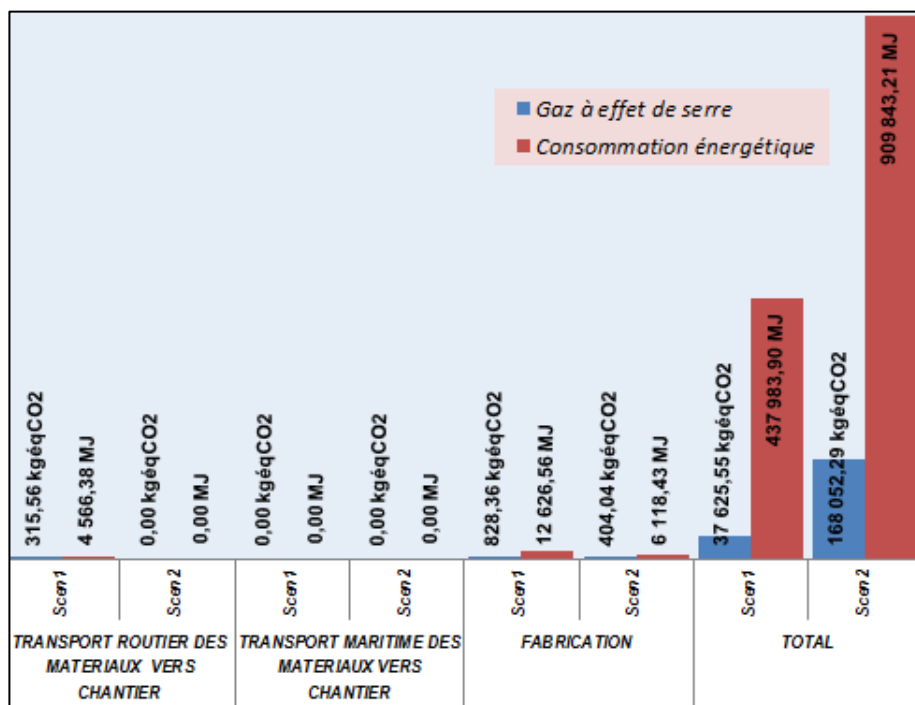
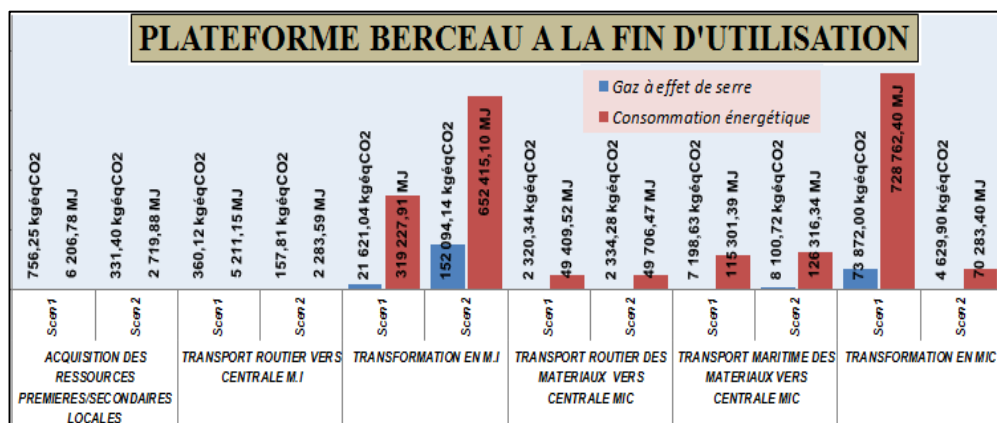


Figure 2 : bilan d'impact des scénarios de revêtements sur une frontière du berceau au portail

Sur la frontière entière (Figure 3), pour le scénario n°1, l'entretien périodique contribue à hauteur de 65,85 % des émissions de GES et 65,92% de consommation énergétique. Les écarts d'impacts se réduisent rapidement et une bonne performance énergétique se bascule en faveur du BCCR. En effet, l'émission en GES du revêtement en BB représente 34,4% de moins que l'émission du BCCR (Figure 3). En outre, le revêtement en BB devance de 41,23% la consommation énergétique du revêtement en BCCR (Figure 3).



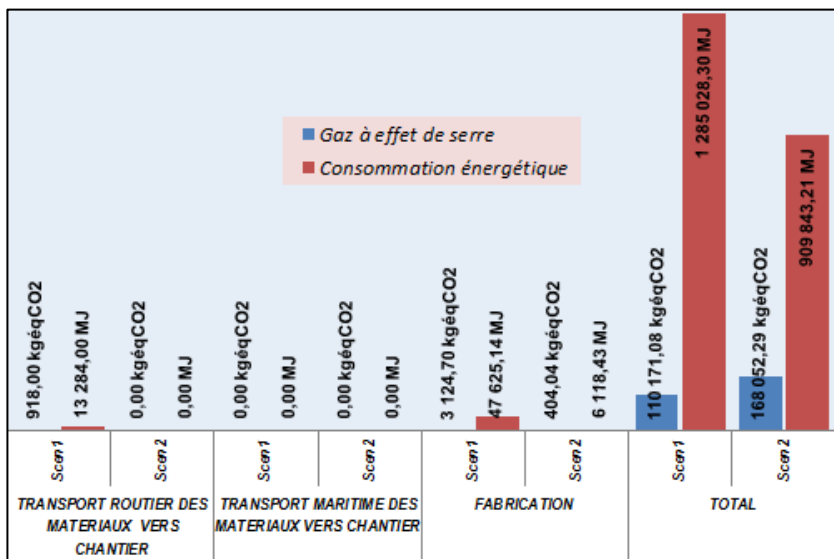


Figure 3 : bilan d'impact des scénarios de revêtements sur une frontière du berceau aux maintenances

Étude de contribution

Les chiffres relatifs aux impacts issus des Figures 4 et 5 ont permis de calculer les valeurs de contribution de chaque processus. Pour cela, deux (02) scénarios ont été adoptés qui n'ont pas tenu compte dans un premier temps du bitume et dans un deuxième temps du ciment lors de la formulation des matériaux composés BB et BCCR. Les Figures 4 et 5 concernent respectivement, les valeurs des indicateurs d'impacts qui ne tiennent pas compte de la production du bitume et du ciment.

On déduit les parts de contribution d'impacts à partir des relations suivantes :

$$I_{\left\{b(C)+E(G)+T_{b(C)}\right\}_f} = I_{\left\{b(C)+E(G)+T_{b(C)+g+E(G)}\right\}_f} - I_{\left\{Sb(C)+SE(G)+T_{g+E(G)}\right\}_f} \quad (4)$$

$$I_{\left\{b(C)+E(G)\right\}_f} = I_{\left\{b(C)+E(G)+T_{b(C)}\right\}_f} - I_{\left\{T_{b(C)}\right\}_f} \quad (5)$$

$$I_{\left\{T_{b(C)}\right\}_f} = I_{\left\{T_{b(C)+g+E(B)}\right\}_f} - I_{\left\{T_{Sb(C)+g+E(B)}\right\}_f} \quad (6)$$

Avec :

- I : valeurs des indicateurs d'impacts attribuées sur une frontière " f " donnée aux entités suivantes :
- $b(C)$: avec du « bitume » ou « ciment » ;
- $Sb(C)$: sans « bitume » ou « ciment » ;
- $E(G)$: enrobé » ou « gâchage de béton de ciment » ;
- T : transport ;
- g : granulats.

Les autres contributions d'impacts peuvent être tirées directement des Figures 2 et 3.

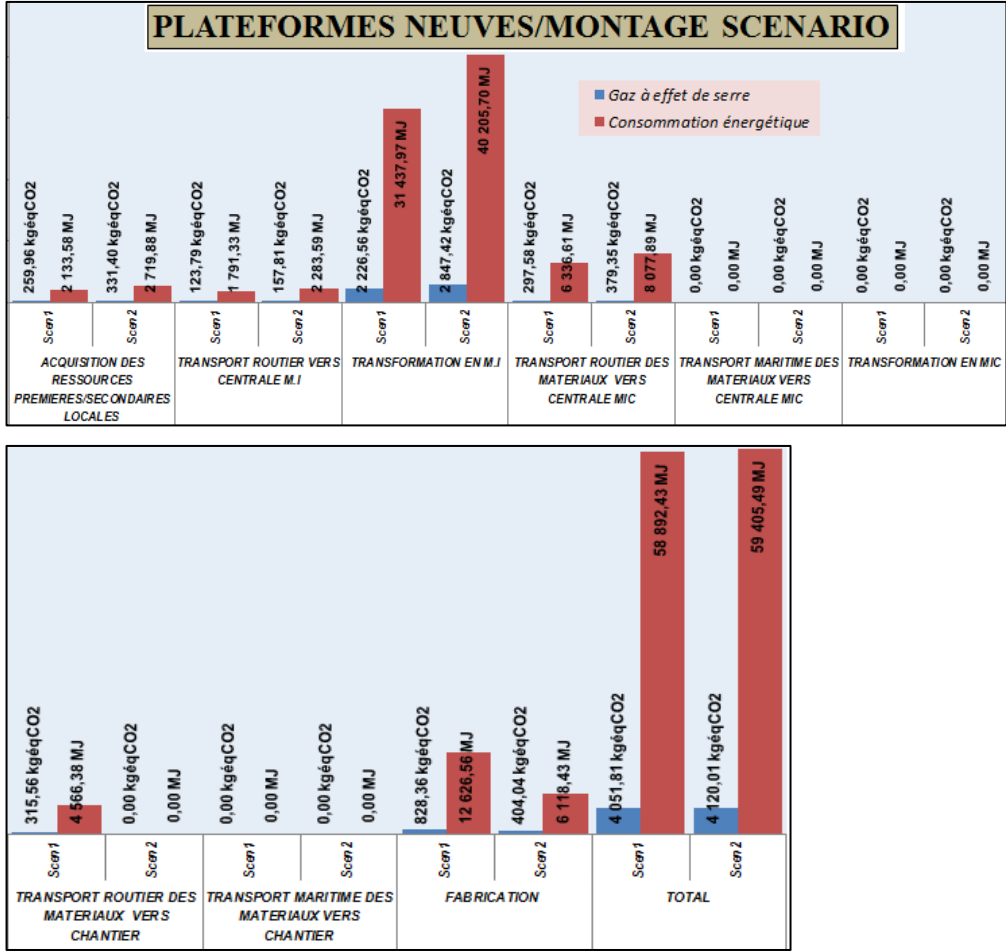


Figure 4 : Bilan d'impact des scénarios de revêtements, sans matériaux bitume et ciment, sur une frontière du berceau au portail

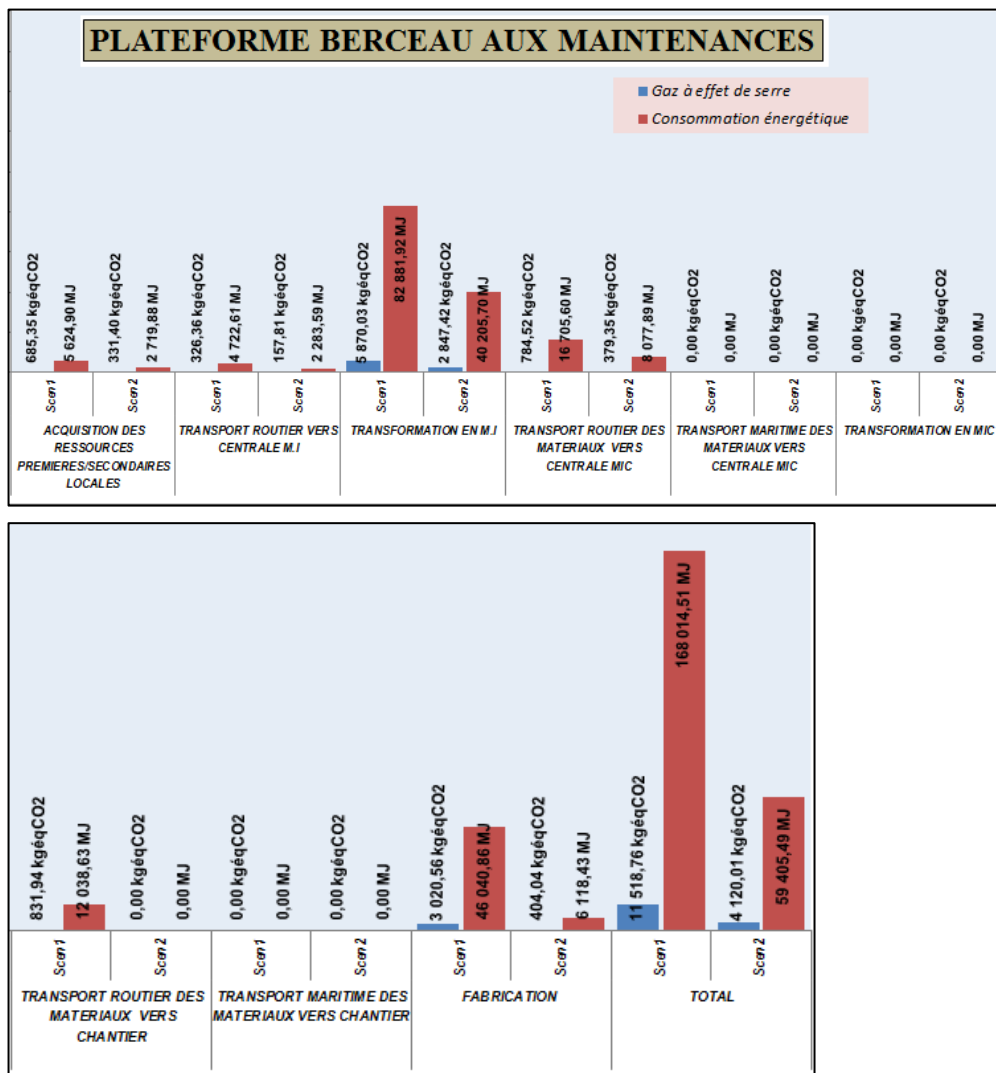


Figure 5 : Bilan d'impact des scénarios de revêtements, sans matériaux bitume et ciment, sur une frontière du berceau aux maintenances

Suivant les frontières de l'étude, les contributions des processus de cycle de vie des deux scénarios sont affichées sur les Graphiques 6, 7 et 8.

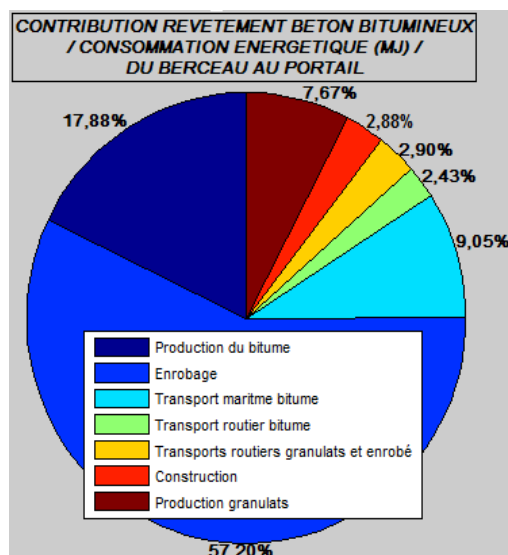
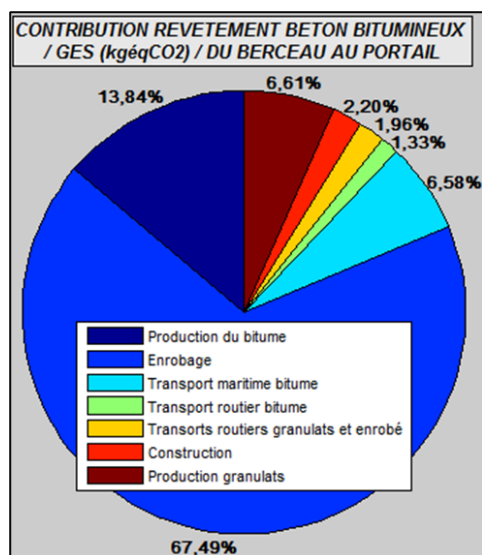


Figure 6 : Contribution des processus « du berceau au portail » du scénario de revêtement en B.B

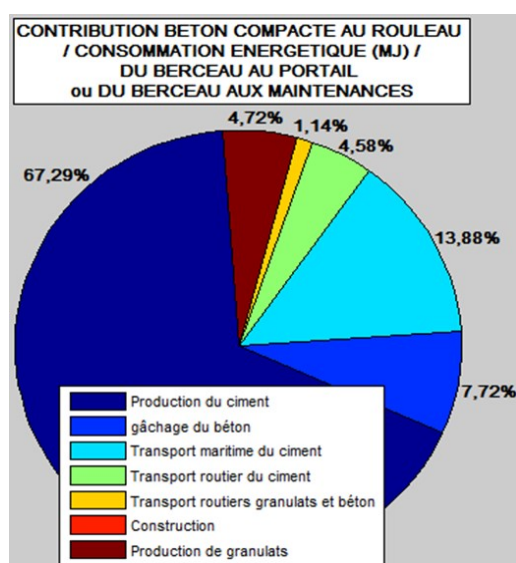
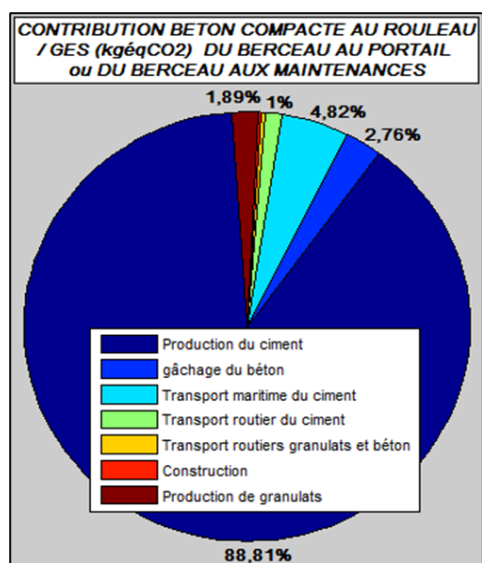


Figure 7 : Contribution des processus « du berceau au portail ou du berceau aux maintenances » du scénario de revêtement en BCCR

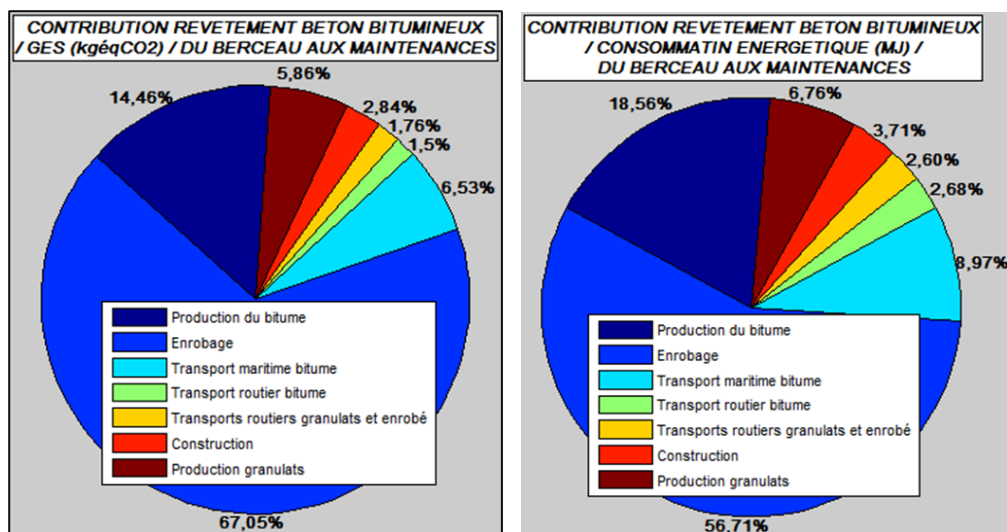


Figure 8 : Contribution des processus « du berceau aux maintenances » du scénario de revêtement en B.B

DISCUSSION

De nombreux travaux s'accordent sur les lourds impacts environnementaux de la phase de construction initiale des chaussées en béton. (Jullien et *al.*, 2014) concluent que la structure des chaussées en béton est 2,95 fois plus émissive de GES et 1,57 plus énergivore par rapport à la structure bitumineuse, et ce, sur une classe de trafic TC6. (The World Bank, 2011) souligne aussi que lors de la phase de construction initiale, le revêtement en béton émet 1,6 à 3 plus de GES comparativement au revêtement bitumineux. (Chen et *al.*, 2017) précisent que l'importance des émissions de GES des deux scénarios de revêtements et leur écart dépend de leur aspect structurel. Selon, toujours ces mêmes auteurs, une épaisseur de revêtement en béton de ciment de 44,44% de plus par rapport au revêtement BB, engendre un surplus d'émission de 64% émanant du revêtement en béton de ciment. De même, une épaisseur de béton de ciment à 2,75fois à celle de BB, met l'émission de GES du béton de ciment à 3fois supérieure à celle du BB. C'est sur ce dernier cas de (Chen et *al.*, 2017) que se situe le contexte d'étude pour Madagascar.

Si l'on considère une frontière allant jusqu'aux maintenances, de nombreuses études confirment l'écart peu important d'impacts par rapport à la construction initiale, de part et d'autre du revêtement en BB et en BCCR. Premièrement, (The World Bank, 2011) précise que selon les politiques d'entretien, les émissions de GES de chaque côté peuvent enregistrer des valeurs très proches. Deuxièmement et conformément à nos résultats, (Weiland and Muench, 2010) stipulent une hausse de consommation énergétique de 44,69% à l'égard du revêtement bitumineux et accusent le revêtement

en béton de ciment d'émettre le plus de GES. Selon une analyse bibliographique effectuée par (Jiang and Wu, 2019), la majorité des cas d'études admet une bonne performance énergétique à l'égard du revêtement en béton du ciment, et une moindre émission de GES à l'issue du revêtement bitumineux. Cependant, un cas d'étude de (Yu and Lu, 2012) mérite de plus ample attention. En effet, en ce qui concerne le revêtement en béton du ciment, ce dernier lui reconnaît une bonne performance environnementale à la fois en matière de consommation énergétique et d'émission de GES. La frontière de l'étude de (Yu and Lu, 2012), allant du berceau à la fin de vie des revêtements pourrait, à priori, expliquer cette autre tendance des résultats.

Concernant les contributions de processus de cycle de vie (Figures 6, 7 et 8), plusieurs auteurs soutiennent nos résultats, en identifiant les phases des productions des enrobés à chaud et du ciment comme étant les plus impactantes. Pour sa part, (Mroueh et *al.*, 2000) attribue 67% du bilan de la consommation énergétique à la phase de production des enrobés à chaud du revêtement bitumineux. Selon (White et *al.*, 2010) le poste d'enrobage à chaud est le plus émissif en GES lors de la production des enrobés. De même, pour (Weiland and Muench, 2010), la phase de production des enrobés à chaud est la plus conséquente non seulement vis-à-vis des émissions de GES mais aussi en consommation énergétique. Particulièrement, les résultats d'ACV du revêtement BB affichés par (Huang et *al.*, 2009), en termes de classement de processus le plus énergivore vers le moins énergivore, sont tout à fait en accord avec ceux que nous avons trouvés. (Huang et *al.*, 2009) attribuent les 62% du bilan de la consommation énergétique du revêtement BB au processus d'enrobage à chaud, 23 % à la production du bitume et les 6% à la production des granulats. Pour le cas du revêtement rigide, (Chen et *al.*, 2017) confirment notre résultat en stipulant que 87% des émissions de GES sont dus seulement à la production du ciment pour le revêtement routier à base de ce matériau.

En gros, l'utilisation de BB, et du Béton de ciment dans le secteur routier est reconnue comme source de problématiques environnementales majeures. Partant de ce constat, des auteurs comme (Huang et *al.*, 2009, Pranav et *al.*, 2020, Santos et *al.*, 2018), préconisent des études d'ACV de matériaux alternatifs de revêtement ayant une efficacité énergétique et un faible bilan de GES.

CONCLUSION

Le choix de la frontière de l'étude influence fortement les résultats. Le revêtement en BCCR a des charges environnementales très imposantes face au revêtement en BB sur une frontière du berceau au portail. Si l'on étend la frontière de l'étude jusqu'aux maintenances, les résultats tendent à se nuancer, et ceci en fonction de la politique de maintenance.

Madagascar ne dispose pas des politiques en vigueur en matière d'entretien périodique de chaussée. Ainsi dans cette étude, l'hypothèse retenue a porté sur les contextes d'un entretien périodique préconisés par (CEBTP, 1984) pour le revêtement en BB et ceci sur une durée de quinze ans. Par ailleurs, sur cette même durée, selon (Abdo et *al.*, 1993) le revêtement en BCCR ne nécessite aucun EP. Sur une frontière « du berceau aux maintenances », la technologie BCCR a une consommation énergétique plus réduite et le revêtement traditionnel en BB est le moins émissif en GES. Une suite logique de cette étude intégrera l'analyse multicritère aux deux alternatives de revêtement dans le cadre d'un bilan environnemental, énergétique et économique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Chen, J., Zhao, F., Liu, Z., Ou, X., Hao, H., (2017). Greenhouse gas emissions from road construction in China : A province-level analysis. In *Journal of Cleaner Production*. 168 : 1039 :1047. Netherlands : Elsevier Ltd.
- 2) Huang, Y., Bird, R., Heidrich, O., (2009). Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavements. In *Journal of Cleaner Production*. 17 : 283–296. Netherlands : Elsevier Ltd.
- 3) Jullien, A., Dauvergne, M., Cerezo, V., (2014). Environmental assessment of road construction and maintenance policies using LCA. In *Transportation Research Part D : Transport and Environment*. 29 : 56–65. United Kingdom : Elsevier Ltd.
- 4) Jiang, R., Wu, P., (2019). Estimation of environmental impacts of roads through life cycle assessment: A critical review and future directions. In *Transportation Research Part D : Transport and Environment*. 77 : 148–163. United Kingdom : Elsevier Ltd.
- 5) Mroueh, U., -M, Laine, Y., (2000). Life Cycle Assessment of Road Construction. Finn. In *The Finnish National Road Administration*. 17 :32. Helsinki : Oy
- 6) Pranav, S., Aggarwal, S., Yang, E.-H., Kumar Sarkar, A., Pratap Singh, A., Lahoti, M., (2020). Alternative materials for wearing course of concrete pavements : A critical review. In *Construction and Building Materials*. 236 : 117609. Netherlands: Elsevier Ltd
- 7) Rakotomalala J.L, Escadeillas G., Ranaivonarivo G., (2013). Chantier expérimental de Béton Compacté au Rouleau à Sabotsy-Namehana. In *Madamines*. 5 : 25. Antananarivo : Madarevue
- 8) Santos, J., Cerezo, V., Soudani, K., Bressi, S., (2018). A Comparative Life Cycle Assessment of Hot Mixes Asphalt Containing Bituminous Binder Modified with Waste and Virgin Polymers. In *Procedia CIRP* 69 : 194–199. Netherlands : Elsevier BV

- 9) Weiland, C., Muench, S.T., (2010). Life-Cycle Assessment of Reconstruction Options for Interstate Highway Pavement in Seattle, Washington. In Transportation Research Record 2170 : 18–27. United States : US National Research Council
- 10) White, P., Golden, J.S., Biligiri, K.P., Kaloush, K., (2010). Modeling climate change impacts of pavement production and construction. In Resources, Conservation and Recycling 54 : 776–782. Netherlands : Elsevier
- 11) Yu, B., Lu, Q., (2012). Life cycle assessment of pavement : Methodology and case study. In Transportation Research Part D : Transport and Environment.17 : 380–388. United Kingdom : Elsevier Ltd.
- 12) Abdo, M.J., ANDERSSON, Bock, B., Galizzi, J.A., (1993). Emploi du béton compacté dans les chaussées. France : PIARC
- 13) CEBTP, 1984. Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. France : SETRA
- 14) Commission du matériel de la FNTP, (2000). Répertoire des principaux matériels de génie civil. France : FNTP
- 15) Ecoinvent, (2007). Life Cycle Inventories of Building Products, Data V.2 Cement Products & Process. Netherlands : Ecoinvent center
- 16) EUROBITUME, (2012). Life cycle inventory : BITUMEN. Brussels : the European Bitumen Association
- 17) Hakan S., (2001). Life Cycle Assessment of Road. Sweden : IVL
- 18) LCPC, (1994). Conception et dimensionnement des structures de chaussée. France: SETRA
- 19) Michel CHAPPAT, Julian BILAL, (2003). La route écologique du future-Analyse du cycle de vie-Consommation d'énergie et émission de gaz à effet de serre. France: COLAS
- 20) The World Bank, (2011). Greenhouse Gas Emissions Mitigation in Road Construction and Rehabilitation. Washington : ASTAE

AJOUTS VEGETAUX ET CONDITIONS DE CUISSON : EFFET SUR LA RESISTANCE DES BRIQUES

par

RANDRIANARISON Mino Patricia⁽¹⁾, RAZAFIARIVONY Nasoloniaina A.^(1, 2)
RANDRIANANDRASANA Ndrianantso^(1, 2), RAFAMANTANANTSOA
Mampionona⁽¹⁾, HAJASOA Martial⁽¹⁾, RAHELIARILALAO Bienvenue^(1, 2)

(1) Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Ecole Doctorale Ingénierie et Géosciences, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

A Madagascar, l'utilisation de briques d'argile cuite prédomine dans la construction de maison d'habitation dans les régions des Hautes Terres de Madagascar comme Analamanga (71,9%) et Vakinankaratra (55,7%). La fabrication, les caractéristiques physiques et mécaniques des briques cuites sont réglementées par l'arrêté 1877-PCH/SAUH/TR du 26 juillet 1963 (NM 2-A-2). Élaborées artisanalement, ces caractéristiques varient d'un fabricant à l'autre et ne sont pas toujours conformes aux spécifications de la norme. L'objectif de notre étude est d'identifier les combinaisons de différents éléments portant sur la composition des briques crues et sur leur cuisson, qui conduisent à des produits présentant des résistances mécaniques optimales. Ainsi, nous avons élaboré des briques à base d'argile mélangée dans différentes proportions à des résidus végétaux. En matière de cuisson, les paramètres de l'étude sont la disposition des briques dans le four ainsi que les combustibles utilisés. Dans cette étude, les effets de ces paramètres sur la résistance mécanique des briques ont été analysés. Quels que soient la composition des briques et le combustible utilisé pendant la cuisson, les briques positionnées dans la zone nommée « Haut Périphérique » présentent la meilleure résistance à la compression. Le meilleur résultat à l'écrasement de 5,85 Mpa est obtenu avec un ajout en bagasse inférieur à 1,25% dans la pâte et comme combustible un mélange de balle de riz et de poussier de charbon. Ces briques sont ainsi classées dans la catégorie « brique pleine de terre cuite naturelle - porteur 2A » (NM 2-A-2).

Mots clés : Ajouts végétaux, Tourbe, Balle de riz, Poussier de charbon, Bagasse, Résistance.

ABSTRACT

In Madagascar, clay bricks' using, predominates in buildings construction mostly in the Central Highland : Analamanga 71.9 % and Vakinankaratra 55.7 %. The method of manufacture, the physical and mechanical characteristics of fired clay bricks are regulated by the Order 1877-PCH/SAUH/TR dated 26 july 1963 bearing Malagasy Standart of handmade clay bricks (NM 2-A-2). Usually maid by hand on small-scale worksites, the products' characteristics vary between manufacturers, and they often are non-compliant with the Standart. The aim of our study is to identify the mud bricks's combinations of different compound and their cooking, to have an optimal mechanical strength. So we developed clay bricks mixed in various proportions with plant residues. And in the cooking's operating, the brick's layout in the oven and the solid fuels used was our study parameters. Then we analyzed the effects of these parameters on the mechanical strength of bricks. Regardless of brick composition and solid fuel used during the cooking, the units positioned in the area called "High Peripheral" had the best compressive strength. The best crushing strength was 5.58 MPa, and it was according with an additional bagasse, less than 1.25% in the raw clay, and as fuel a mixture of rice ball and coal dust . So, these bricks can be classified as "natural full clay bricks - structural wall 2A" (NM 2-A-2).

Key words : Clay, Peat, Rice husks, Coal dust, Bagasse, Strength.

INTRODUCTION

La brique de terre cuite est l'un des matériaux les plus utilisés en maçonnerie dans le monde (Kazmi S.M.S. et *al.*, 2016). A Madagascar, environ trois quart des maisons de la région d'Analamanga sont fabriquées avec ce type de matériau de construction (INSTAT, 2010), apprécié à cause de ses caractéristiques physiques et mécaniques (Fernandes F.M. et *al.*, 2010) (Shakir et Mohammed A.A., 2013) (Dalkiliç N. et Nabikoglu A., 2017). Plusieurs paramètres sont déterminants des caractéristiques mécaniques des briques de terre cuite, tels le processus de production, le type de combustible utilisé ainsi que les compositions des matières premières. Différentes études ont été menées afin de modifier ces caractéristiques (Kazmi S.M.S. et *al.*, 2016) (Bories C. et *al.*, 2014) (Subashi De Silva G. H. M. J. et Perera B. V. A., 2007) (Njeumen Nkayem D.E et *al.*, 2016) tout en ajoutant des résidus végétaux dans la composition des briques pour créer une combustion à l'intérieur des briques.

Notre recherche s'inscrit dans la même direction, tout en considérant d'autres paramètres que la quantité des ajouts :

- le type de combustible utilisé ;
- l'emplacement des briques dans le four pendant la cuisson et ;
- le type et le pourcentage massique des ajouts végétaux dans la composition des briques.

L'étude est effectuée à Sabotsy Namehana, un des principaux sites de production artisanale de matériaux de terre cuite de la région d'Analamanga, qui s'étend sur une superficie de 8ha, regroupant environ 3027 briqueteries. La Commune de Sabotsy Namehana est traversée par la route nationale numéro trois (RN 3) et se situe à 9 km au Nord de la capitale. Elle est limitée par la Commune d'Ambohimanga au Nord, Ankadikely au Sud, Manandriana à l'Est et Antehiroka à l'Ouest (Figure 1 et Cliché 1).

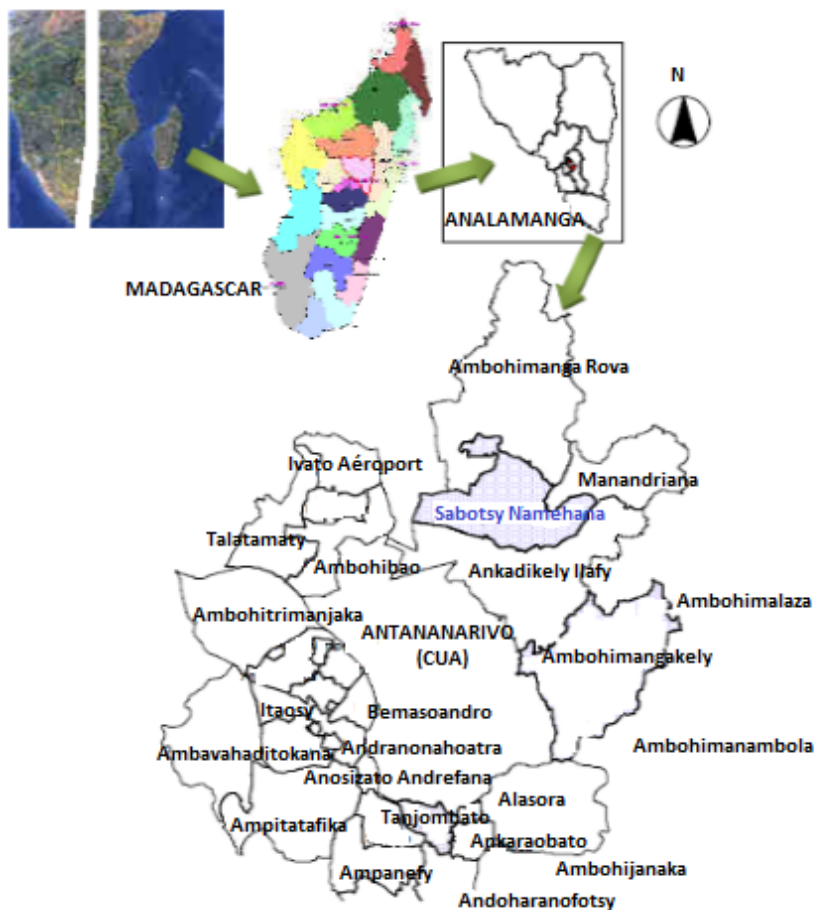


Figure 1 : Localisation de la zone d'étude (Commune de Sabotsy Namehana)



Cliché 1 : Vue aérienne du site de production de briques de terre cuite de Sabotsy Namehana.

MATERIELS ET METHODES

Matière première

D'après les analyses effectuées au dans le laboratoire du Département génie civil de l'Université de Sherbrooke Canada (Andrianarimanana J.C.O., 2005), l'argile de Sabotsy Namehana est constituée de :

- phase argileuse : 68,99% ;
- silt limon : 15,11% ;
- limon fin : 10,12% et
- sable fin : 5,78%.

La matière première a un indice de plasticité de 10,1 et classée argile sablonneuse peu plastique (Andrianarimanana J. C. O., 2005).

Dimensions moyennes des produits finis

Les briques de terre cuite de Sabotsy Namehana ont une masse moyenne de 2,11 kg/brique et ont en moyenne une longueur de 20,8 cm, une largeur de 10,4 cm et une hauteur de 8,8 cm.

Processus de production

Le processus de production de briques de terre cuite du dans le site de Sabotsy Namehana est de type artisanal, non mécanisé, et passe constitué par les principales étapes suivantes :

- gisement et extraction d'argile ;
- préparation de la pâte ;
- moulage ;
- démoulage ;
- séchage et ;
- cuisson.

Combustibles

Deux types de combustible sont utilisés par les producteurs artisanaux de ce site: un mélange de balle de riz et de fine de charbon et la tourbe.

Mélange de balle de riz et de fine de charbon

La balle de riz est collectée auprès de cultivateurs environnants. Pour sa commercialisation, le charbon de bois est emballé dans des sacs de 25 à 35 kg. Le poussier ou fine de charbon est un déchet solide issu de la fabrication du charbon de bois, des effets de son transport et des manipulations des sacs. Il peut représenter 10% à 20% du poids du charbon et est recueillie auprès des fabricants de charbon (FAO, 1983). Les compositions massiques du mélange de balle de riz et fine de charbon varient d'un producteur à un autre (balle de riz : 18% à 52%) (Cliché 2).

La tourbe

C'est une matière extraite dans la plupart des cas dans le milieu environnant et dont le transport est effectué par les artisans eux-mêmes (cliché 3).



Cliché 2 : Four avec du mélange de balle de riz et fine de charbon comme combustible



Cliché 3 : Four avec de la tourbe comme combustible

La quantité de combustible consommée lors de la cuisson varie en fonction du nombre de briques par fournée, la moyenne est donc estimée (Tableau 1).

Tableau 1 : Quantité moyenne de combustible consommée lors de la cuisson des briques

Combustible		Masse moyenne de combustible consommée [kg / 1000 briques]
Balle de riz + fine de charbon	Balle de riz	35
	Fine de charbon	156
Tourbe		651

Type et pourcentage massique de résidus végétaux utilisés comme ajouts

Trois types d'ajouts sont considérés dans cette étude :

- la balle de riz (BdR) ;
- la fine de charbon (FdC) ;
- le mélange de balle de riz et de fine de charbon (BdR+FdC) et
- la bagasse (B).

La balle de riz et la bagasse découpées et broyées sont trempées dans un grand récipient avant de les mélanger à de l'argile. Quant à la fine de charbon, aucun traitement préalable n'est requis.

Tableau 2 : Pouvoirs calorifiques inférieurs des combustibles et ajouts

Combustibles	PCI en GJ/t
Balle de riz (BdR)	15,5 à 16,2 (Mansaray K.G. et Ghaly A.E, 1997)
Fine de charbon (FdC)	32,5 (FAO, 1983)
Tourbe (T)	11,6 (ADEME, 2010)
Bagasse (B)	7,9 (ADEME, 2010)

Après plusieurs essais, deux pourcentages massiques d'ajouts ont été concluants et retenus pour l'étude : 1,25% et 2,5%. Pendant l'expérimentation, des codifications ont été adoptées pour distinguer les produits à la sortie des fours :

- précédé d'un signe < : pour ajout à 1,25% ;
- précédé d'un signe > : pour ajout à 2,5%.

Exemples : B< : brique avec 1,25% de bagasse et C> : brique avec 2,5% de fine de charbon (cliché 4).



Cliché 4 : Briques codifiées

Emplacement des briques dans le four

Quatre emplacements des briques ont été distingués dans le four sont optés dans cette étude (Figure 2) :

- HP : « haut périphérique du four » ;
- HC : « haut centre du four » ;
- BP : « bas périphérique du four » ;
- BC : « bas centre du four ».

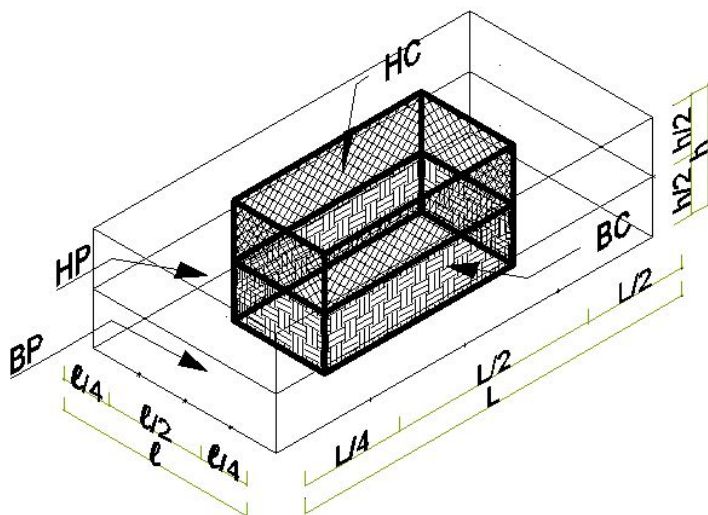


Figure 2 : Emplacement des briques dans le four

Essai de compression à sec

L'essai de compression à sec a été réalisé sur une "machine d'essai universelle TESTWELL" du bloc technique d'Ankatso. Cette machine est constituée d'un bâti portant une traverse fixe sur à laquelle est placé le plateau où la brique est posée et d'une presse mobile qui applique une charge régulière d'une manière continue sur la brique. Le tronc de la machine est relié à un dispositif qui permet de lire, sur un cadran, les charges exercées selon leur progression. Sur la brique une plaque métallique a été posée dont le poids est déterminé la dimension, supérieure à celle de la brique pour que la charge exercée par la presse soit bien répartie sur la section de la brique.



Cliché 5 : Machine d'essai universelle TESTWELL du bloc technique d'Ankatso

RESULTATS ET DISCUSSION

En fonction du combustible

Ajout : bagasse (B)

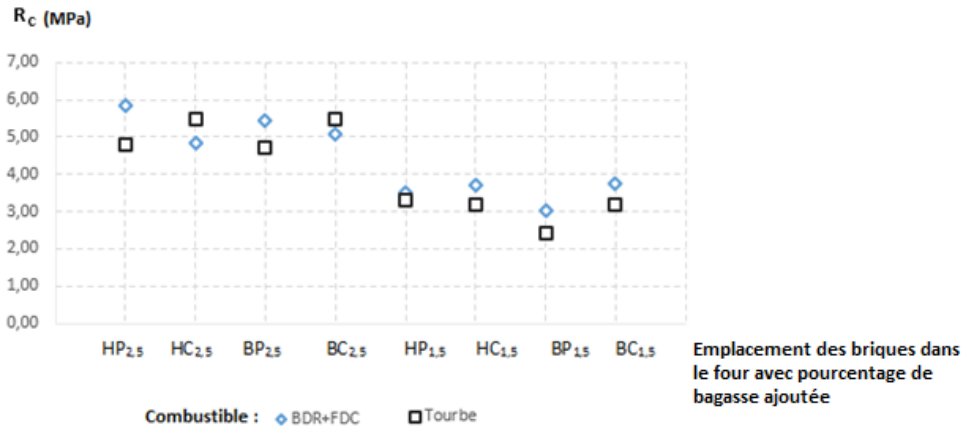


Figure 3 : Résistance à la compression en fonction de l’emplacement des briques dans le four avec pourcentage de bagasse ajoutée

Les briques d’un même emplacement enregistrent dans 75% des cas une résistance à la compression 14,64% meilleure dans les cas de cuisson avec un mélange de balle de riz et fine de charbon que celle avec de la tourbe, et ce, avec la même proportion de bagasse. Il est à noter que la quantité de tourbe utilisée est 8% supérieure à celle du mélange de balle de riz et de fine de charbon.

Ce résultat se traduit par le fait que le pouvoir calorifique inférieur du mélange de balle de riz et de fine de charbon est 22,41% supérieure à celle de la tourbe.

Il est également à remarquer que la résistance à la compression avec 2,5% d’ajout est meilleure que celle avec 1,5%. Ainsi, pour l’emplacement HP à 2,5% d’ajout en bagasse (HP_{2,5}), la résistance est maximale (5,85MPa) alors que pour l’emplacement HP à 1,5% d’ajout (HP_{1,5}), on a une valeur de 3,52Mpa, l’écart est d’environ 40%. L’apport en énergie par la combustion interne de 2,5% d’ajout est plus rationnel, il y a moins de risque de mal-cuisson ou de sur-cuisson.

Ajout : balle de riz (BdR)

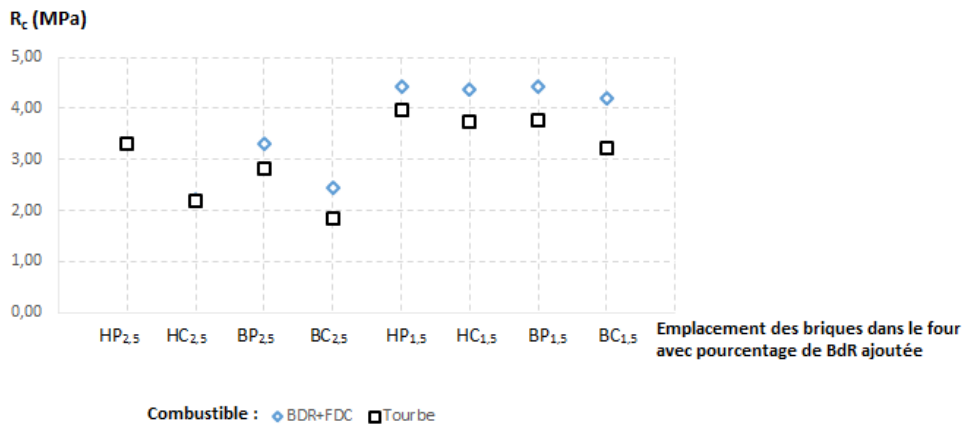


Figure 4 : Résistance à la compression en fonction de l’emplacement des briques dans le four avec pourcentage de balle de riz ajoutée

Quel que soit l’emplacement des briques dans le four et la quantité de balle de riz ajoutée, les résistances à la compression des briques cuites avec un mélange de balle de riz et de fine de charbon sont supérieures ou égales à celles des briques cuites avec de la tourbe. En moyenne, un écart de 12,99% est constaté. Par contre, les résultats avec ajout de 1,5% de BdR, sont nettement meilleurs comparés à ceux avec 2,5% de dopage, et ce, du fait par le fait que la balle de riz est directement incorporée dans l’argile sans broyage au préalable. Les briques sont alors plus poreuses avec 2,5% d’ajout qu’avec 1,5%, d’où la diminution des résistances à la compression. Ce fait ouvre la voie à d’autres voies de recherche comme celle sur l’étude comparative des conductivités thermiques des briques en fonction des divers paramètres choisis.

Ajout : fine de charbon (FdC)

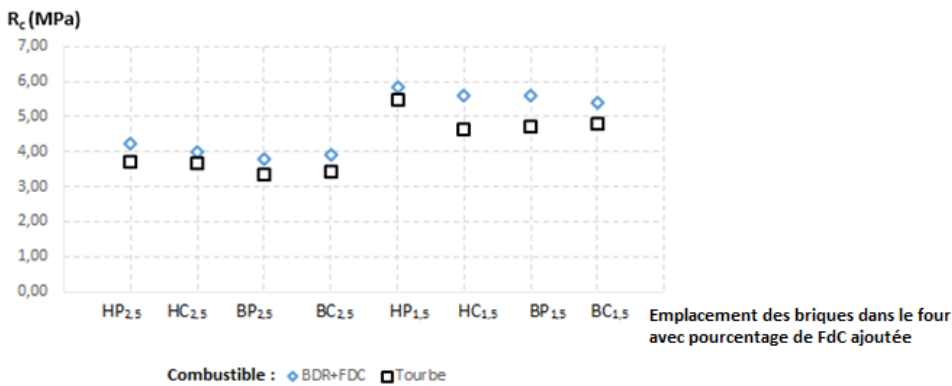


Figure 5 : Résistance à la compression en fonction de l’emplacement des briques dans le four avec pourcentage de fine de charbon ajoutée

Les résistances à la compression des briques cuites avec un mélange de balle de riz et de fine de charbon sont dans tous les cas supérieures à celles des briques cuites avec de la tourbe. En moyenne, on constate un écart de 11,62%. L’ajout en fine de charbon favorise l’apport en énergie à la cuisson des briques. Quel que soit le pourcentage d’ajout, les briques placées dans la partie HP ont une bonne résistance comparée à celles placées à d’autres endroits dans le four. Ce fait peut s’expliquer par une combustion plus poussée à cet endroit apportant davantage de quantité d’énergie pour la cuisson, ce qui rend les briques plus résistantes. Par ailleurs, une sur-cuisson dans la partie centrale du four, peut rendre les briques moins résistantes.

Ajout : mélange de balle de riz et de fine de charbon (Bdr+FdC)

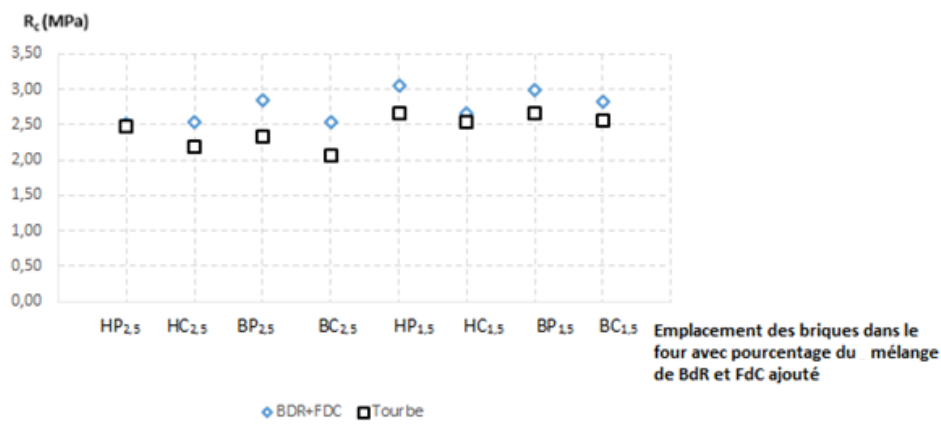


Figure 6 : Résistance à la compression en fonction de l’emplacement des briques dans le four avec pourcentage de de mélange de balle de riz et fine de charbon ajouté

Quelle que soit la disposition des briques dans le four et le pourcentage de mélange de balle de riz et fine de charbon ajoutées pour le dopage des briques, les meilleurs résultats de résistance à la compression sont obtenus avec de mélange de BdR et FdC comme combustible. Les écarts varient de 1,98% à 18,31%. Quel que soit le pourcentage de dopage, la partie HP est la plus favorable pour obtenir des résultats plus intéressants. L’explication est analogue à celle des briques dopées avec de la fine de charbon.

En fonction des ajouts

Combustible : Bdr+FdC

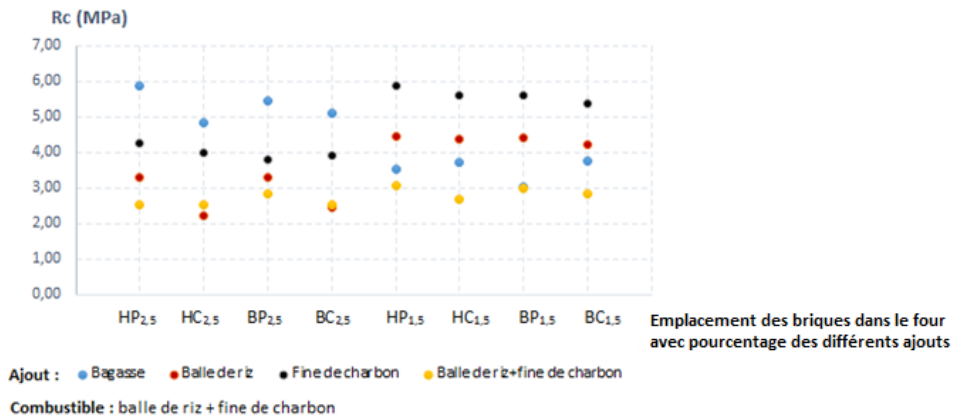


Figure 7 : Résistance à la compression en fonction de l’emplacement des briques dans le four avec pourcentage des différents ajouts (combustible : balle de riz + fine de charbon)

Dans le cas où le mélange de balle de riz et de fine de charbon est utilisé comme combustible et si le pourcentage massique des ajouts est de 2,5%, les briques dopées avec de la bagasse préalablement broyées ont une bonne résistance à la compression comparées aux autres briques dopées avec d’autres ajouts. Cette résistance varie de 4,84Mpa à 5,85Mpa et la partie HP donne le résultat maximal. Par contre, si le dopage est de l’ordre de 1,5%, l’incorporation de fine de charbon donne une résistance à la compression qui varie de 5,38Mpa à 5,85Mpa, valeurs classées parmi les meilleures de cette étude. La partie HP donne la valeur optimale. Ces résultats se traduisent par le pourcentage de balle de riz (50%) dans l’ajout composé de BdR et de FdC. Il y a donc moins de pores dans ce type de briques comparées à celle dopées exclusivement avec la BdR.

Combustible : tourbe

Avec de la tourbe comme combustible pour la cuisson, quels que soient les types et les pourcentages des ajouts, dans 84% des cas, les profils des résultats sont similaires à celles cuites avec un mélange de balle de riz et de fine de charbon.

Du point de vue performance mécanique, si le dopage est de 2,5%, l’ordre d’efficacité des ajouts, quel que soient les emplacements des briques, est le suivant comme suit :

- bagasse ;
- fine de charbon ;
- balle de riz et
- mélange de balle de riz et fine de charbon.

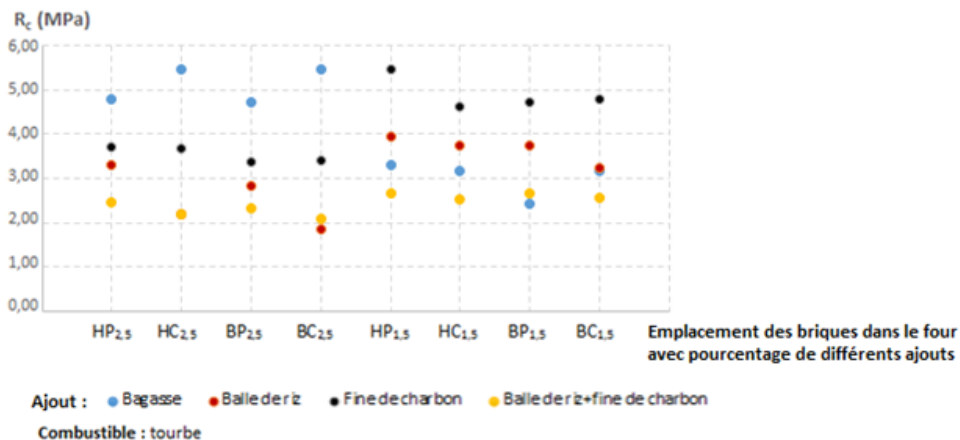


Figure 8 : Résistance à la compression en fonction de l’emplacement des briques dans le four avec pourcentage des différents ajouts (combustible : tourbe)

Si le dopage est de 1,5%, l’ordre d’efficacité des ajouts est le suivant :

- fine de charbon ;
- balle de riz ;
- bagasse et
- fine de charbon.

Comparées à des briques de terre cuite témoins de Sabotsy Namehana, sans ajout et ayant une résistance moyenne de 4,74 Mpa, en utilisant un mélange de BdR et de FdC comme combustible, les dopages de briques avec 1,5% de FdC et avec 2,5% de la bagasse ont permis d’augmenter respectivement les résistances mécaniques de 16% et de 11%.

D’autres études sur la résistance mécanique des briques utilisant de la balle de riz broyée s’avèrent nécessaires pour améliorer les propriétés mécaniques.

CONCLUSION

67,19% des briques dopées dans notre études peuvent être utilisées dans des projets de construction de des bâtiments prévus dans la zone 1 où il n'y pas un d'effet de vent cyclonique très à craindre. Pour des briques dopées avec le même résidu végétal et avec le même pourcentage massique, les résistances à la compression des briques artisanales cuites avec un du mélange de balle de riz et de fine de charbon sont meilleures que celles cuites avec de la tourbe. Il y un écart de 11,27% à 13,31%.

La meilleure résistance à la compression à sec est de 5,85 MPa est obtenue avec les briques :

- cuites avec un mélange de BdR et de FdC ;
- dopées avec de la bagasse (2,5%) et avec FdC (1,25%), situées dans la partie HP.

Ces briques sont de type « Porteuses catégorie 2A » utilisables dans la zone où la vitesse de du vent extrême est de 120km/h.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) ADEME (2010). Guide des facteurs d'émissions. Version 6.1. Calcul des facteurs d'émissions et sources bibliographiques utilisées. Chapitre 2 – Facteurs associés à la consommation directe d'énergie.
- 2) Andrianarimanana J.C.O. (2005). Recherche sur la mise au point de procédés physiques, chimiques, biologiques pour la préparation de matériaux argileux à partir de latérites malgaches.
- 3) Bories C., Borredon M-E, Vedrenne E., Vilarem G. (2014). Development of eco-friendly porous fired clay bricks using pore-forming agents: A review. Journal of Environmental Management, 143 : 186 -196.
- 4) Dalkılıç N., Nabikoglu A. (2017). Traditional manufacturing of clay brick used in the historical buildings of Diyarbakir (Turkey), Frontiers of Architectural Research, 6 : 346 – 359.
- 6) FAO (1983). Techniques simples de carbonisation. Chap.11 : Briquettes de charbon. Département des Forêts.
- 7) Fernandes F.M., Lourenço P.B., Castro F.M. (2010). Ancient Clay Bricks: Manufacture and properties, Materials, Technologies and Practice in Historic Heritage Structures, 29-48.
- 8) INSTAT (Institut National de la Statistique) (2010). Enquête auprès des Ménages, Antananarivo, Madagascar.

- 9) Kazmi S. M.S., Abbas S., Saleem M.A., Munir M.J., Khitab A. (2016). Manufacturing of sustainable clay bricks: utilization of waste sugarcane bagasse and rice husk ashes. *Construction and Buildings Materials*, 120 : 29-41.
- 10) Mansaray K.G, Ghaly A.E (1997). Physical and thermochemical properties of rice husk, *Energy source* 19 : 989-1004
- 11) Njeumen Nkayem D.E., Mbey J.A., Diffo B.B.K., Njopwouo D. (2016). Preliminary study on the use of corn cob as pore forming agent in lightweight clay bricks: physical and mechanical features, *Journal of Buildings Engineering*, 5 : 254-259.
- 12) Shakir, Mohammed A.A. (2013). Manufacturing of bricks in the past, in the present and in the future: a state of the art review. *Int. J. Adv. Appl. Sci.* 2 (3), 145-156.
- 13) Subashi De Silva G.H.M.J., Perera B.V.A. (2007). Effect of waste rice husk ash (RHA) on structural, thermal and acoustic properties of fired clay bricks, *Journal of Building Engineering*, 18 : 252-259.

CARACTERISATION DES MURS ANCESTRAUX DES HAUTES TERRES CENTRALES DE MADAGASCAR

par

ANDRIANIRINA Tsiory⁽¹⁾, KOERA Rasoloniaina⁽²⁾, RANDRIAMALALA Tiana⁽³⁾
ANDRIANARY Philippe⁽¹⁾, RAKOTOSAONA Rijalalaina^(1, 2)

(1) Equipe d'Accueil en Valorisation des Ressources Propres, ED Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Université d'Antananarivo

(2) Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo

(3) Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB) Antananarivo

RESUME

Les *Tamboho gasy*, anciens murs en terre battue, caractérisent les Hautes Terres Centrales de Madagascar. Avec plus de cent ans d'existence, ils se dressent encore, imperturbable, et relèvent d'une conception architecturale particulière. En effet, leur technique de construction assure leur durabilité et sont d'un intérêt certain dans la réduction de l'impact environnemental. Le travail consiste donc à étudier leurs spécifications en termes de valeur historique et conception mais aussi leurs caractéristiques physico-chimiques et mécaniques. Des échantillons de murailles âgées de plus de 100 ans dans quatre sites différents sont analysés par spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif, diffraction des rayons X et analyses thermogravimétriques. La partie externe et le cœur du mur qui paraissent différents sont évalués et comparés ainsi que le sol à leur proximité. Les compositions chimiques et minéralogiques des échantillons sont cohérentes et les deux couches sont semblables. La différence visuelle entre les couches du mur est due au lessivage causé par les intempéries, vu l'inexistence de revêtement externe.

Mots clés : Caractéristiques des murs, Culture Malgache, Mur traditionnel, Spécificité de construction.

ABSTRACT

The so called *Tamboho gasy*, ancient rammed-earth walls, characterize the Central Highlands of Madagascar. At more than a hundred years of existence, they still stand, remain unchanged and are of a different architectural design. Without a detailed understanding of their building technique as well as their original formulation, they will remain undeveloped and abandoned despite their durability and their interest in reducing environmental and social impact. Our work consists in studying their specifications in terms of their historical value and design as well as their

physicochemical and mechanical characteristics. Samples of walls aged more than a hundred years from four different locations are examined by Inductively Coupled Plasma – Atomic Emission Spectrometry, X-ray Diffraction and Thermogravimetric analyses. The outer part and the core of the wall which look different are evaluated and compared, as well as the surrounding soil. The samples' chemical and mineralogical compositions are coherent and the two layers are similar. The visual difference between the layers of the wall is due to washout by weathering over time, given the inexistence of external coatings.

Keywords : Construction specificity, Malagasy culture, Wall Traditional, Wall characteristics.

INTRODUCTION

A Madagascar, particulièrement dans les Hautes Terres Centrales, existent des murs traditionnels appelés « *Tamboho gasy* » ou « *Tambohon'ny Ntaolo* ». Ce sont des murs en terre crue, constituant un patrimoine de grande valeur historique et architecturale (Esoavelomandroso, 1985 ; Nativel, 2005).

Ils sont apparus vers la fin du 18ème et début du 19ème Siècle (Adrien, 1971 ; Ravalisoa, 1986) et furent édifiés par l'union de plusieurs familles et l'aristocratie employant des esclaves (Oberle, 1976). L'apogée de sa construction fut atteint vers la fin du 19ème siècle (Oberle, 1976). Encore aujourd'hui, les vestiges demeurent. Ces murs sont stables et solides mais faute d'exploitation, la valeur des techniques et les formules traditionnelles risquent de se perdre.

L'intérêt de la recherche est ici d'étudier les spécificités de ces murailles tant du point de vue des méthodes de construction que de leurs caractéristiques. Les résultats obtenus contribueront à la caractérisation de ces murs et leur réinsertion dans la société.

Dans un premier temps, la muraille est décrite et ses spécificités de construction sont présentées. La seconde partie présente les différences visibles entre la partie externe et le cœur du mur. Il en est de même pour les sols situés à leur proximité. Enfin, la résistance à la compression sèche et humide et les caractéristiques physiques ont été étudiées.

MATERIELS ET METHODES

Les murs ancestraux

Description des murailles

Les murs de couleur de terre sont composés de blocs empilés à l'horizontal et les pilés de 45 à 60 cm de hauteur sont toujours en nombre impair (cinq, sept ou neuf

couches superposées) (Figure 1). Le nombre de couches constitutives varie selon la hauteur du mur à construire. Leur hauteur de deux à cinq mètres se développe sur plusieurs centaines de mètres de long. Chaque couche constitutive est fissurée verticalement et horizontalement. Ces fissures sont presque régulières de sorte que les murs, ainsi façonnés par la nature, donnent l'impression qu'ils ont été construits avec des éléments constitués de gros moellons de terre en forme de parallélogramme d'environ 0,50 m de longueur, 0,40 à 0,60 m de hauteur et de 0,40 à 0,45 m de largeur et assemblés par une simple maçonnerie comme celle qui prévaut actuellement. La coupe d'un mur apparaît légèrement tronconique. La base de la fondation est plus épaisse. Cette épaisseur décroît très légèrement jusqu'à la couche supérieure (Figure 2). Le faite du mur est en forme de dôme. Il a, en général, une forme de parallélogramme aux angles légèrement arrondis, mais quelques-uns sont circulaires (Figure 3).

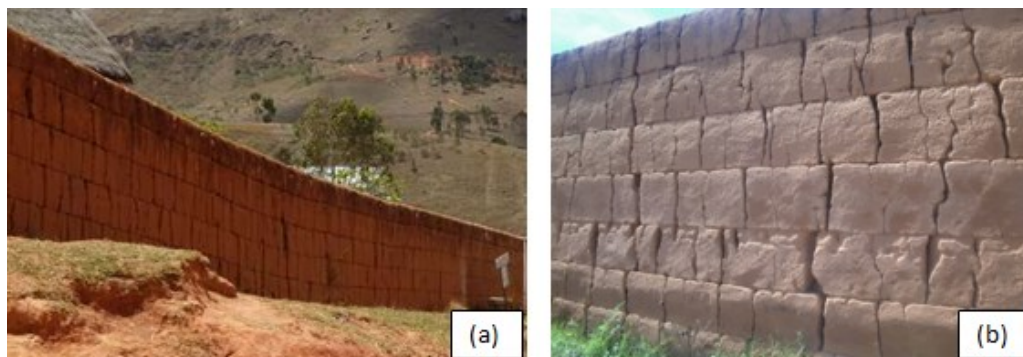


Figure 1 : Différents nombre d'assises des murs ancestraux
 (a) mur à cinq assises de Mahitsy (b) mur à sept assises d'Ambatofotsy



Figure 2 : Vue de profil d'un mur ancestral de Manandriana

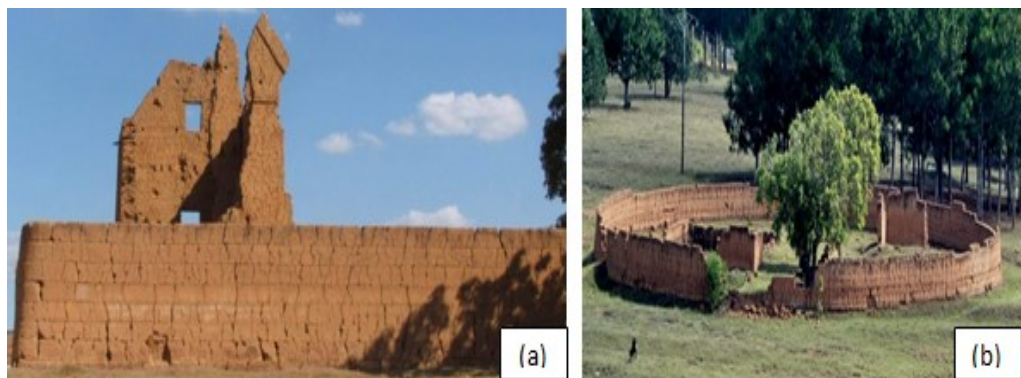


Figure 3 : Différentes formes de murs ancestraux

(a) mur en forme de parallélogramme d'Antsahadita avec une maison en brique à l'intérieur

(b) forme circulaire d'Ambatofotsy Avaradrano

Spécificité de sa construction

Ce type d'architecture ne se rencontre que sur les Hauts plateaux de Madagascar, dont la construction engageait un savoir-faire unique (Esoavelomandroso, 1985). La hauteur des murs marque la puissance et la classe sociale du propriétaire (Adrien, 1970; Oberle, 1976 ; Ravalisoa, 1986 ; Nativel, 2005). Le nombre de couches constitutives, toujours impair, détermine cette hauteur.

Le chiffre impair est symbole du vide et de l'imperfection. Pour les Malgaches, il est préférable de commencer (une construction, une vie) dans l'imperfection pour terminer dans la perfection (Andrianetrazafy, cité par Ravalisoa, 1986). Dans d'autres cas, le choix du chiffre impair dans la construction signifie pour le propriétaire que lui seul est le chef de famille. Car selon la croyance malagasy, on ne peut diviser un chiffre impair (Elma, 2014).

Construction et élévation des murs

Selon la littérature et les enquêtes menée auprès du village, le processus de construction des murs ancestraux comporte quatre étapes élémentaires : la préparation des matières premières, la préparation des pâtes terreuses (malaxage, foulage, macération), la mise en œuvre et le séchage.

Matière première et préparation

Selon la tradition orale, ces édifices ont été construits avec un mélange de terre, d'eau, de bouse de vache et d'herbe ou de pailles de riz. De nombreuses personnes affirment l'existence d'œufs ou de blanc d'œuf dans la composition de cette pâte.

Ils utilisaient la terre latéritique qui recouvre la plupart des collines de l'Imerina (Adrien, 1970). A Madagascar, les latérites recouvrent les 2/3 de la superficie de l'île

(Bourgeat, 1970). D'après les villageois enquêtés, ils mélangeaient le sol de l'horizon A et de l'horizon B. Le sol de l'horizon A est riche en matière organique et celui de l'horizon B est essentiellement minéral. Ce dernier est plus approprié à la construction (Kouka O., 2019).

La terre était prélevée à proximité des emplacements des murs à construire. Cet emplacement du sol signifiait que la muraille porte le destin de son propriétaire qui relève d'une question de bonheur et de malheur, voire de vie ou de mort, selon la tradition et la croyance malgache (Ravalisoa, 1986).

Préparation de la pâte terreuse

Des fosses étaient creusées pour pouvoir traiter à pied d'œuvre la pâte terreuse à utiliser. Après y avoir incorporé une certaine quantité d'eau, la terre était mélangée et piétinée par des hommes ou des bœufs jusqu'à l'obtention d'une matière pâteuse, bien compacte et homogène. La teneur en eau de la terre utilisée dépendait de l'expérience des constructeurs. Ensuite, des herbes ou de la paille de riz ainsi que de la bouse de vache liquéfiée étaient rajoutées dans la pâte obtenue. Le tout était repétri pour avoir la consistance de plasticité requise. Après le dressage en tas, la pâte était couverte de paille et laissée au repos pendant une nuit entière. Le lendemain, elle était progressivement ré humidifiée en la piétinant et cette opération se répétait sur au moins 3 jours ou parfois des mois.

Mise en œuvre et séchage

On commençait par un simple raclage de la partie superficielle du sol qui peut atteindre 0,40 à 0,60 m environ pour la couche de base. Elle avait généralement 40 à 60 cm de hauteur sur 45 à 60 cm d'épaisseur suivant l'importance des murs à construire. Ensuite, un séchage de cinq à sept jours était nécessaire avant la pose d'une deuxième couche de hauteur sensiblement identique à la précédente, et ce jusqu'à la hauteur finale.

L'élévation du mur se faisait à l'air libre. Le bâtisseur se tenait debout, de plein pied, sur la première couche sèche de la fondation. Il y élevait la deuxième couche en prenant bien soin de la tasser, au besoin, par un nouveau battage, pour en assurer une parfaite compacité. La pose et le façonnage de cette couche l'obligeait à travailler à reculons, ce qui le permettait de voir, vérifier et rectifier ce qu'il entreprenait. La hauteur de cette nouvelle couche variait entre 45 et 60 cm. Cette disposition lui permettait de travailler dans de meilleures conditions pour pétrir avec une force maximale soit à la main, soit par battage la couche à poser afin qu'elle soit bien tassée. Il dressait une seule couche sur tous les pourtours. Les coins étaient arrondis (Figure 4).



Figure 4 : Mur avec coin arrondi à Ambatofotsy Avaradrano

Une fois cette deuxième couche terminée, un délai de séchage de cinq à sept jours s'avérait nécessaire avant de continuer l'élévation des autres couches suivant le même processus, jusqu'à la hauteur finale fixée par le propriétaire.

Il semble que le mur ne soit pas revêtu d'enduit qui constitue une opération postérieure, et est destinée à colmater les fissures dues au rétrécissement volumique du mur lors du séchage. Ceci s'explique par les fissures longitudinales qui suivent les couches horizontales superposées et par les fissures verticales qui se produisent assez régulièrement, tous les 50 cm environ. Cette contraction se produit vraisemblablement bien longtemps après la fin des travaux, après que le vent et le soleil aient desséchés le bloc de terre au point de lui donner cette apparence de blocs juxtaposés à texture compact.

Caractérisation des murs

Matériaux étudiés et stratégie d'échantillonnage

Quatre échantillons de mur âgés de plus de 100 ans (Figure 5) de quatre endroits différents ont été collectés et caractérisés en laboratoire. Le choix a été basé sur la qualité, l'état des murs et la spécificité de l'endroit.

- Trois échantillons (AMB, MAN, RAD) dans les villages de Manandriana, Miadapahonina et Ambohitrabiby, situés à environ 25 km au Nord Est de la ville d'Antananarivo. Ces villages font partie des localités qui forment l'Imérina (Oberl, 1976). L'un d'entre eux est le célèbre mur ancestral appelé « *TambohondRadama* » (muraille du Roi Radama I) structurellement différent des autres qui fut construit vers les années 1820 (Ravalisoa, 1986).
- Un échantillon (MAH) à Ambohimananndray qui se situe à 35 km au Nord-Ouest de la ville d'Antananarivo (Figure 6).

Etant dans l'impossibilité d'appliquer la méthode de carottage sur place, des grands blocs de muraille, de différentes formes, ont été détachés à l'aide d'une bêche et d'une scie avec lame diamantée.

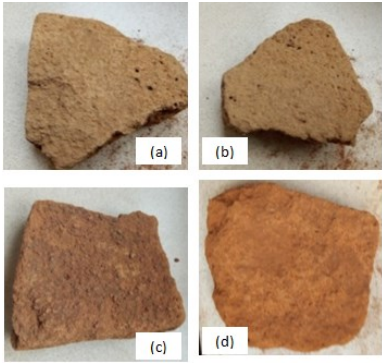


Figure 5 : Echantillons étudiés : (a)RAD, (b) MAN, (c) AMB, (d) MAH

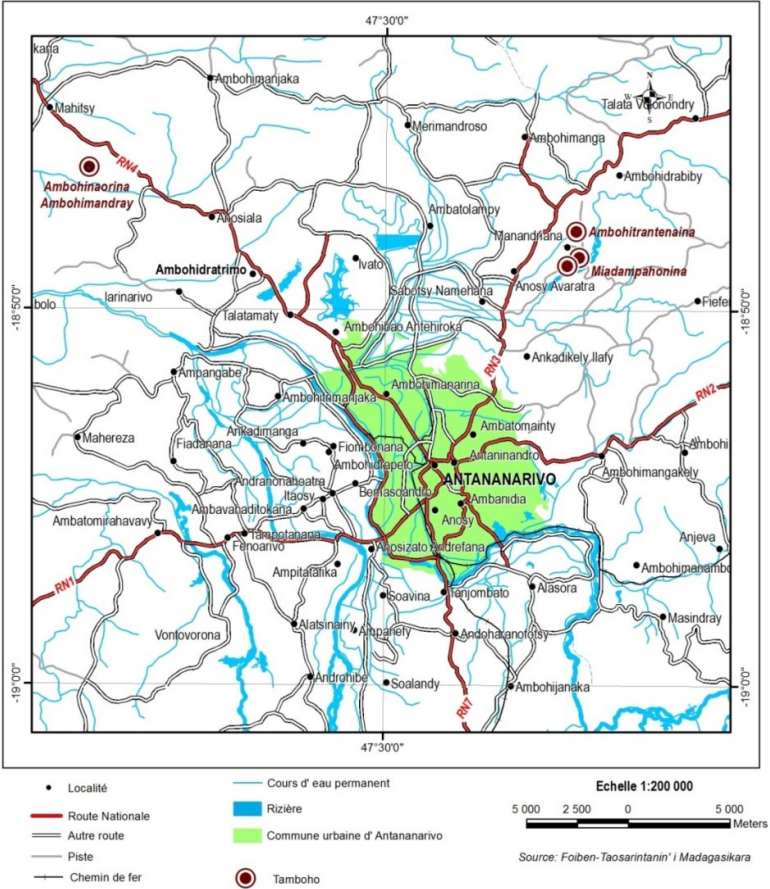


Figure 6 : Localisation des sites de prélèvement des échantillons des murailles

Procédures expérimentales

Caractérisation chimique et minéralogique

L'échantillon des murs a été divisé en deux catégories : la partie externe et le cœur du mur. Visuellement les deux sortes de couches ne sont pas identiques, ce qui laisse supposer que la couche externe forme une sorte de croute, d'environ 2mm d'épaisseur, qui protège le mur (Figure 7). Des échantillons de terre à proximité de ces murs ont été prélevés pour pouvoir faire la comparaison chimique et minéralogique.



Figure 7 : Blocs de muraille brute : (a) partie extérieure ; (b) partie intérieure

Nous avons analysé, pour chacun des quatre sites : Manandriana (MAN), Miadapahonina (RAD), Ambohitrantenaina (AMB) et Ambohinaorina (MAH), trois types d'échantillons (sol, couche interne et externe des murs), soit 12 échantillons au total. Les échantillons ont été broyés à l'aide d'un mortier d'agate jusqu'à l'obtention d'une poudre passant au tamis à 80 μm .

La composition chimique a été identifiée par spectrométrie d'émission atomique à plasma à couplage inductif (ICP-AES). La perte au feu a été évaluée après une calcination de l'échantillon au-dessus de 1000°C.

La diffraction des rayons X (DRX) et l'analyse thermogravimétrique (ATG) ont été utilisés pour évaluer la composition minéralogique. L'appareil DRX utilisé était un Brucker D8-Advance équipé d'un monochromateur arrière SOLLER et d'une anticathode au cobalt ($\text{CoK}\alpha$). L'identification des minéraux a été réalisée avec le logiciel EVA et sa quantification avec la méthode de Rietveld. L'équipement ATG est composé d'un four (METLER TOLEDO) couplé d'un système d'acquisition HP 34970A associé au logiciel STAR ev.15.

Caractéristique physique et mécanique

La teneur en eau a été déterminée par la méthode de la dessiccation à l'étuve, suivant la norme (NF P94-050, 1995). Le poids spécifique a été mesuré à l'aide d'un pycnomètre. Les échantillons ont été concassés pour obtenir des grains de matériaux de tailles inférieures à 0,2 mm. La densité apparente a été mesurée en utilisant une pesée hydrostatique des échantillons après les avoir recouverts de paraffine.

La répartition granulométrique des échantillons a été analysée à l'aide de deux techniques : la fraction la plus grosse ($> 80 \mu\text{m}$) par tamisage humide (NF P94-041, 1995, pp.94–041) et la fraction la plus fine par analyse à la méthode basée sur la mesure du temps de sédimentation de particules solides en suspension dans une solution d'eau mélangée avec de l'hexamétaphosphate de sodium ($\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6 \cdot 10\text{H}_2\text{O}$) comme agent défloculant (NF P94-050, 1995).

Les essais de compression simple ont été réalisés à l'aide d'une presse à béton de type Labotest sur des échantillons $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$ (Figure 8) sciés dans le bloc de muraille. La résistance à la compression simple à l'état humide a été déterminée selon la norme (XP P 13-901, 2001, pp 16-901).

La valeur indiquée pour l'essai représente la valeur moyenne pour trois échantillons testés.



Figure 1 : Echantillon en cube de dimension $10 \times 10 \times 10 \text{ cm}^3$

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Composition chimique et minéralogique

Le Tableau 1 présente les compositions chimiques ainsi que la perte au feu (LOI) des échantillons. Globalement, les compositions chimiques des différents échantillons sont assez proches. Les oxydes les plus abondants dans tous les échantillons sont la silice (SiO_2 : 45-60 %), l'alumine (Al_2O_3 : 14-23 %) et les oxydes de fer (Fe_2O_3 : 5-12%) tandis que les autres oxydes (CaO ; K_2O ; Na_2O ; MgO ; Mn_2O_3 ; TiO_2 ; SO_3 ; P_2O_5 ; Cr_2O_3) ne sont présents qu'à l'état de trace. Les teneurs en fer sont assez proches les unes des autres malgré la différence de couleur marquée entre l'échantillon MAH et les autres. En fait, la couleur des sols est essentiellement liée à la nature des phases minéralogiques qui contiennent ces oxydes de fer et pas forcément à la proportion de ces derniers (Aubert, 2013).

Tableau 1 : Composition chimiques des échantillons

Oxydes	Sol				Mur Intérieur				Mur extérieur			
	MAN	RAD	AMB	MAH	MAN	RAD	AMB	MAH	MAN	RAD	AMB	MAH
SiO₂	53,54	49,79	46,95	53,88	59,53	52,38	62,15	64,63	53,93	50,76	56,29	60,10
Al₂O₃	20,26	23,19	22,41	18,27	18,88	22,77	19,79	14,09	21,14	22,45	20,21	16,22
Fe₂O₃	9,18	11,93	11,39	9,78	9,83	7,91	5,06	8,41	8,60	10,84	8,38	9,00
TiO₂	1,69	1,40	1,22	1,75	1,65	1,24	0,74	1,82	1,39	1,73	1,15	1,31
CaO	0,54	0,06	0,08	0,11	0,07	0,09	0,07	0,06	0,21	0,07	0,08	0,16
P₂O₅	0,11	0,15	0,10	0,09	0,10	0,07	0,05	0,13	0,10	0,10	0,09	0,14
K₂O	0,06	0,03	0,04	0,09	0,06	0,01	0,02	0,08	0,05	0,02	0,03	0,10
Na₂O	0,02	0,02	0,03	0,04	0,03	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,03	0,03
MgO	0,08	0,05	0,04	0,05	0,09	0,10	0,03	0,08	0,04	0,04	0,04	0,08
Mn₂O₃	0,05	0,04	0,04	0,06	0,06	0,03	0,03	0,04	0,04	0,05	0,04	0,04
SO₃	0,03	0,11	0,00	0,04	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Cr₂O₃	0,02	0,03	0,04	0,03	0,02	0,03	0,01	0,03	0,01	0,01	0,01	0,01
Perte au feu	14,03	13,19	17,66	15,82	9,67	15,36	12,02	10,60	14,48	13,90	13,66	12,80
Total	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100

Concernant, la perte au feu, elle présente la perte de poids de l'échantillon sec, après une calcination à 1000°C. Elle englobe toutes transformations possibles (départ d'eau libre, eau de constitution, ...) à une température inférieure à 1000°C. Pour les échantillons, elle reste assez faible (8-14 %).

Les diffractogrammes montrent que tous les échantillons sont composés de Quartz (SiO_2) ; Gibbsite ($\text{Al}(\text{OH})_3$) ; Kaolinite ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) ; Hématite (Fe_2O_3) et quelques traces d'Albite ($\text{NaSi}_3\text{AlO}_8$) sur les échantillons de MAN ; AMB et RAD.

Ces diffractogrammes sont semblables, il n'existe alors pas d'apparition ou de disparition de pic. Cela permet de dire que qualitativement les minéraux présents dans la couche extérieure ou le cœur du mur et dans le sol sont les mêmes. Il n'y a pas de formation ou de disparition de minéraux. Ces murs ancestraux sont donc dépourvus de couche externe qui protège contre les intempéries (orage, vent, ...).

Un autre constat porte sur la diminution de la quantité de quartz et une augmentation de la kaolinite et gibbsite entre la couche externe et le cœur du mur. Cette constatation correspond aux analyses obtenues par ICP. En effectuant un bilan matière des espèces chimiques présentes au cœur du mur et sa couche externe, et en prenant l'hypothèse qu'au cours de la construction, la composition chimique du cœur du mur et sa couche externe est la même, ces différences visuelles sont causées par le lessivage c'est-à-dire la perte de minéraux (sable par exemple) par des eaux de pluies au cours des années.

Le Tableau 2 montre les compositions minéralogiques des échantillons calculés par la méthode de Rietveld et les diffractogrammes des différents échantillons sont présentés (Figure 9, 10, 11 et 12).

Tableau 2 : Composition minéralogique des échantillons par méthode de Rietveld

Minéraux	MAN			RAD			AMB			MAH		
	SOL	EXT	INT	SOL	EXT	INT	SOL	EXT	INT	SOL	EXT	INT
Quartz	50,19	30,00	34,80	46,80	39,18	39,06	41,29	45,25	48,23	33,81	46,28	60,46
Gibbsite	26,89	35,97	33,36	26,33	29,96	34,25	35,18	30,29	29,69	25,59	15,93	10,81
Kaolinite	19,12	29,49	27,57	23,47	27,80	23,20	18,16	21,12	18,43	35,65	33,74	25,31
Hématite	2,49	3,66	3,49	2,13	2,21	2,54	4,23	1,99	2,17	4,95	4,05	3,42
Albite	1,30	0,88	0,78	1,27	0,84	0,94	1,14	1,36	1,48	-	-	-

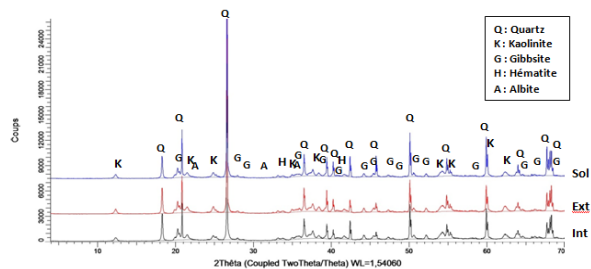


Figure 2 : Diagramme de rayon X des échantillons AMB (sol ; mur extérieur et intérieur)

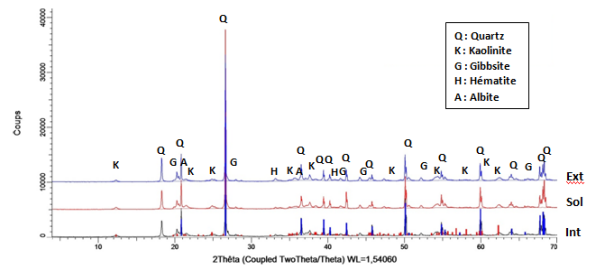


Figure 3 : Diagramme de rayon X des échantillons RAD (sol ; mur extérieur et intérieur)

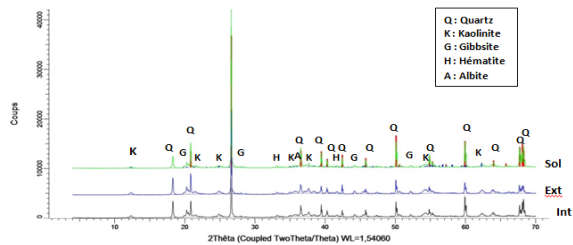


Figure 4 : Diagramme de rayon X des échantillons MAN (sol ; mur extérieur et intérieur)

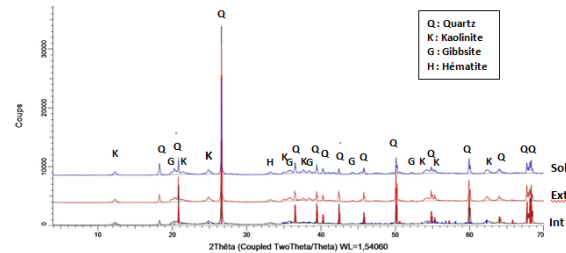


Figure 5 : Diagramme de rayon X des échantillons MAH (sol ; mur extérieur et intérieur)

La présence des minéraux identifiés par DRX a été confirmée par les résultats d'ATG. Les courbes ont montré trois pics principaux sur les échantillons RAD, AMB et MAN et quatre pics sur celui de MAH (Figure 13, 14, 15 et 16). Les couches externes et internes sont semblables. Nous avons constaté les pics endothermiques classiques de la latérite : aux alentours de 100°C en raison de la perte d'eau hygroscopique, vers 300°C la dégradation de matière organique ou déshydroxylation des certains oxydes, vers 500°C la déshydroxylation de la kaolinite pour former de la métakaolinite (une phase amorphe) et vers 900°C la réorganisation structurale de métakaolinite. Ces résultats confirment encore ceux de Ndiaye, 2013.

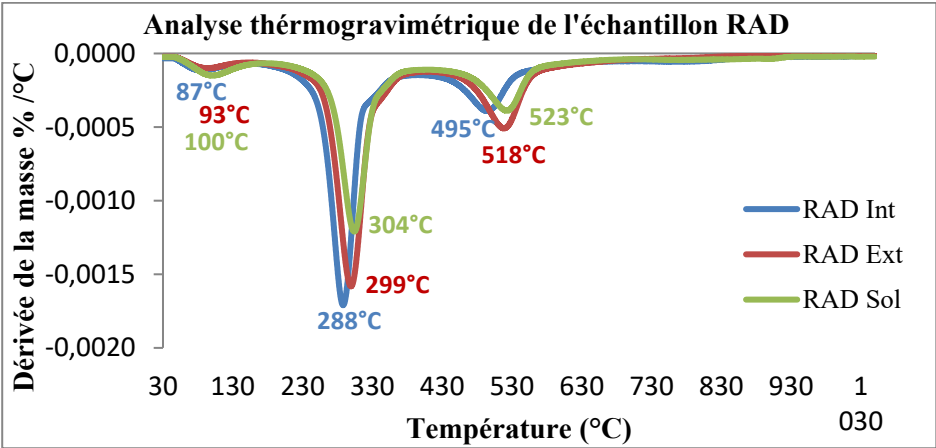


Figure 13 : Analyse thermogravimétrique des échantillons RAD (sol ; mur extérieur et intérieur)

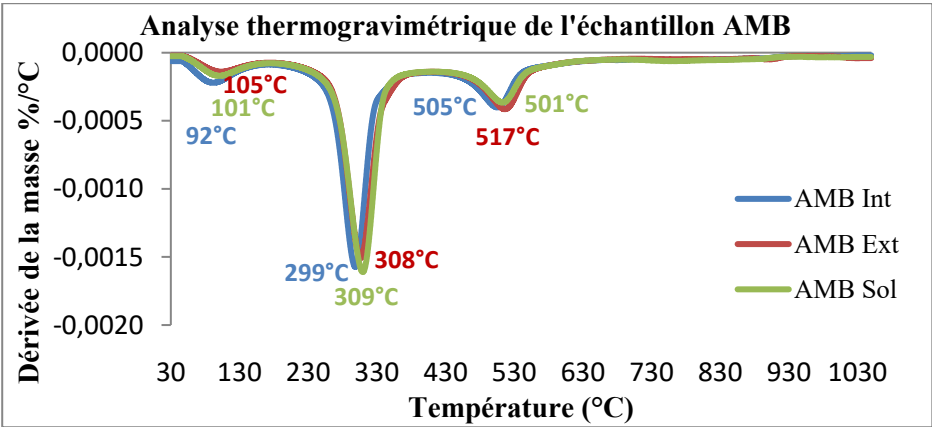


Figure 14 : Analyse thermogravimétrique des échantillons AMB (sol ; mur extérieur et intérieur)

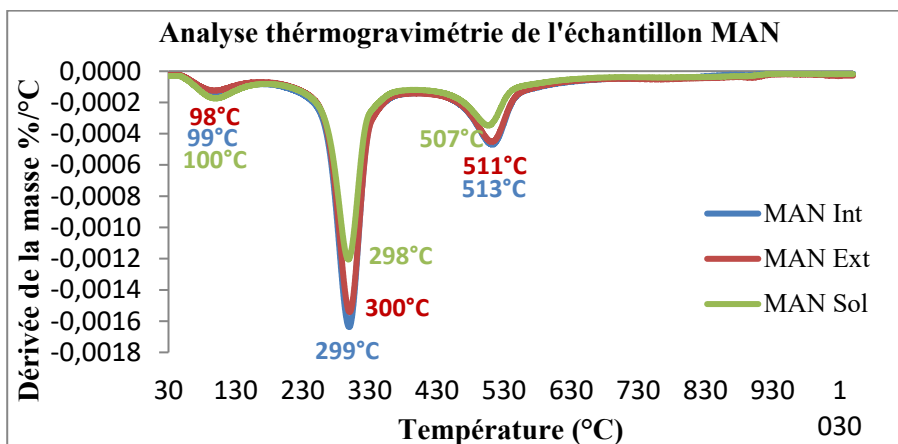


Figure 15 : Analyse thermogravimétrique des échantillons MAN (sol ; mur extérieur et intérieur)

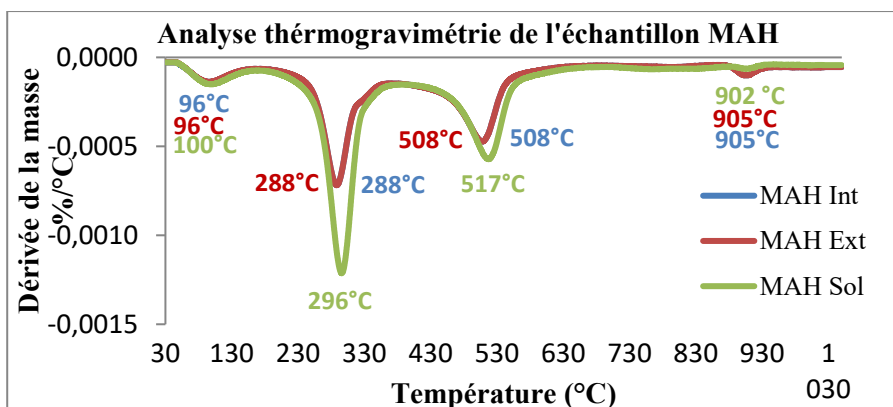


Figure 16 : Analyse thermogravimétrique des échantillons MAN (sol ; mur extérieur et intérieur)

Caractéristiques physiques et mécaniques

La Figure 17 présente les courbes granulométriques des quatre échantillons de murailles obtenues par tamisage humide pour les particules supérieures à 80 µm et par sédimentométrie pour les particules inférieures à 80 µm.

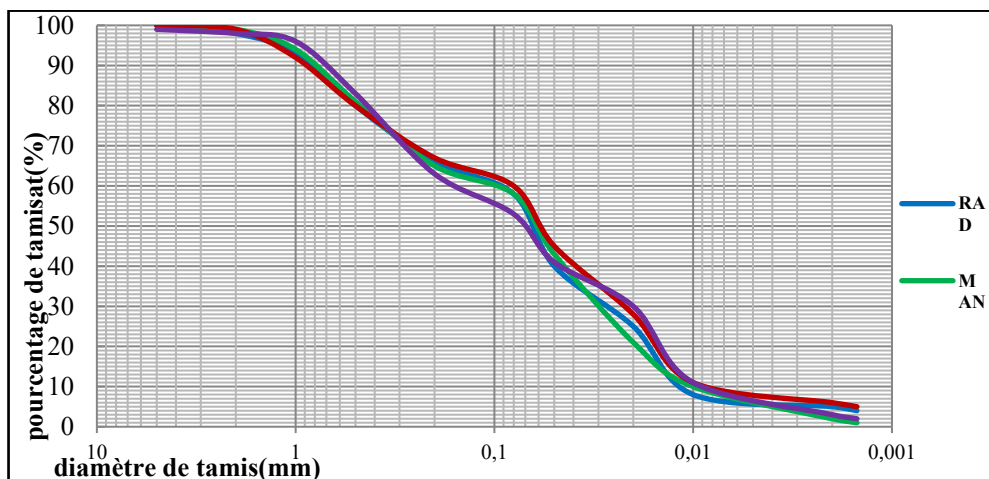


Figure 17 : Courbe granulométrique des échantillons des murs

Les caractéristiques granulaires des quatre échantillons sont similaires. Les quantités des particules fines ($< 80 \mu\text{m}$) varient entre 60 et 53 %. La taille maximale des grains est de 2 mm. Globalement, les échantillons sont constitués de sols limoneux argileux et légèrement sableux.

Les caractéristiques mécaniques et physiques des échantillons (résistance à la compression sèche et humide, teneur en eau, densité, porosité) sont illustrées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Propriétés physique et mécanique des échantillons de mur

Caractéristiques	MAN	RAD	MAH	AMB
Couleur	Marron gris	Marron gris	Rouge brique	Marron rouge
Teneur en eau W (%)	1,82	7,59	2,89	3,92
Poids spécifique γ_s (T /m ³)	2,62	2,63	2,61	2,63
Densité apparente γ_d (T /m ³)	1,79	1,87	1,68	1,85
Porosité (%)	17,38	15,85	18,65	16,08
Resistance mécanique à sec (MPa)	1,5	2,7	1,2	1,8
Resistance mécanique humide (MPa)	0 ,8	1,8	0,5	1,1
Variation de la résistance sec-humides (%)	46,66	33,33	58,33	38,88
Rapport R_c sec et R_c humide	1,88	1,50	2,40	1,64

La résistance à la compression sèche des murs est aux alentours de 1,7 Mpa (entre 1,2 et 2,7 Mpa). Sa résistance à la compression est faible mais comparable à celles trouvées sur les anciens murs en bauges (0,6 – 1,59 Mpa ; Thuan, 2018 ; Rohlen et *al.*, 2013), pisés et adobes (1 – 3 MPa ; Fratini et *al.*, 2011 ; Elisa Adorni et *al.*, 2013 ; Aubert et *al.*, 2015). Sa résistance à la compression est proportionnelle à sa densité sèche. Plus la densité augmente, plus la résistance mécanique augmente et elle varie de 1,68 à 1,87. L'absorption d'eau de chaque échantillon est en moyenne de 17 % (entre 15,85 et 18,65 %). Il a également été constaté une corrélation directe entre la résistance à la compression et l'absorption d'eau de chaque échantillon. Plus la résistance mécanique est élevée, plus l'absorption d'eau est faible.

La résistance à la compression reflète la cohésion des grains de matériaux terre. Plus elle est grande, plus la force de cohésion entre les particules de latérite est élevée. La variation de la résistance à l'état sec et à l'état humide permet alors d'apprécier les effets de l'eau sur les échantillons. D'après le Tableau 3, on peut dire qu'en moyenne, il est observé une diminution de la force de cohésion de l'ordre de 43,8 %.

Les échantillons résistent à l'humidité. De plus, le fait de les immerger dans l'eau pendant sept jours ne les détruit pas. Une nouvelle méthode simple peut alors être proposée pour caractériser un mur en terre crue, il s'agit de la résistance en immersion dans l'eau.

CONCLUSION

Ce travail présente les spécificités et les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des murs ancestraux malgaches. Ces murailles, qui datent du 19^{ème} Siècle, ne sont observées que dans les Hautes Terres Centrales de Madagascar. Elles sont originales du point de vue esthétique et elles représentent également un indicateur important de la culture et du savoir faire malagasy.

Les résultats montrent que les couches externe et interne de ces murs sont quasiment identiques, ce qui permet de dire que ces murs ancestraux sont dépourvus de revêtement externe de protection contre les intempéries (orage, vent, ...). La différence visuelle entre le cœur du mur et sa couche externe est due au lessivage de la partie externe causé par les effets du temps. Le durcissement de ces murs ancestraux est en masse mais pas en couche.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) A. M. Forster, G. M. Medero, T. Morton, J. Buckman (2008). Traditional cob wall: response to flooding. In *StructuralSurvey*. 26 : 302-321.
- 2) A. Ravalisoa (1986). Les tamboho de la région d'Ambatofotsy - Manandriana (Avaradrano). Mémoire de maîtrise d'histoire, Centre d'Art et d'Archéologie, Antananarivo. 230 pages.
- 3) D. Nativel (2005). Maisons royales, demeures des grands à Madagascar : l'inscription de la réussite sociale dans l'espace urbain de Tananarive au XIXe siècle. In Karthala Editions.
- 4) E. Hamard, B. Cazacliu, A.Razakamanantsoa, J-C. Morel (2016). Cob, a vernacular earth construction process in the context of modern sustainable building. In *Building and Environment* .106 : 103-119.
- 5) E. Ralinirina (2014). Les enclos en terre battue ou " Tamboho " du vieux Antananarivo : le cas des deuxièmes et troisièmes arrondissements. Mémoire de Maîtrise, Archéologie et Histoire d'Art, Faculté des Lettres et Sciences Humaines. Université d'Antananarivo. 80 pages.
- 6) F. Bourgeat ; G. Aubert (1970). Les sols ferralitiques à Madagascar. C.R. Semaine Géol., Tananarive.
- 7) F.V. Esoavelomandroso (1985). Aménagement et occupation de l'espace dans la ville moyenne d'Antananarivo pendant la colonisation (l'exemple du quartier d'Ankadifotsy) (Spacial layout and Occupation in Antananarivo Mid-Town during the colonial period the case of Ankadifotsy Neighbourhood). In *Cahiers d'études africaines*, 337-361.
- 8) J. E. Aubert (2013). Caractérisation des briques de terre crue de Midi-Pyrénées. Rapport final du projet TERCRUSO.
- 9) J. E. Aubert, A.Marcomb, P.Oliva, P. Segui (2015). Chequered earth construction in South-western France. In *Journal of Cultural Heritage*,16 : 293-298.
- 10) K. A. J. Ouedraogo (2019). Stabilisation de matériaux de construction durables et écologiques à base de terre crue par les liants organiques et /ou minéraux à faibles impacts environnementaux. Thèse doctorat, Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier). 167 pages.
- 11) M. Adrien (1970). Contribution à l'étude des villages fortifiés de l'Imerina Ancien (Madagascar). Thèse doctorat, Faculté de Lettres et Sciences Humaines, Université de Clermond Ferrand. 246- 255.

- 12) M. Ndiaye (2013). Contribution à l'étude de sols latéritiques du Sénégal et du Brésil. Thèse doctorat, Université Paris Est et de l'université Cheikh Anta Diop de Dakar. 160 pages.
- 13) NF P94-041 (1995). Reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide. 14.
- 14) NF P94-050 (1995). Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage. AFNOR 10.
- 15) NF P94-057 (1992). Analyse granulométrique des sols, Méthode par sédimentation 17.
- 16) P. Oberl (1976). Antananarivo et l'Imerina, description historique et touristique, Librairie de Madagascar, Antananarivo.
- 17) U. Rohlen, C. Ziegert (2013). Construire en terre crue - construction - renovation - finition, le moniteur, Paris.
- 18) XP P13-901 (2001). Blocs de terre comprimée pour murs et cloisons : Définitions - Spécifications - Méthodes d'essais - Conditions de réception. AFNOR 37.

ANALYSE MULTICRITERE DE TECHNOLOGIES ROUTIERES EN BETON DE CIMENT ET BITUMINEUX MALAGASY

par

RANDRIANANDRASANA N.⁽¹⁾, RANDRIANARISON M.P.⁽¹⁾

RAHELIARILALAO B.⁽¹⁾

(1) Equipe d'Accueil Doctorale de Géosciences, Technologie des Poudres, Matériaux Divisés et Habitat Economique,
ÉD Ingénierie et Géoscience Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo

RESUME

Cet article s'appuie sur une analyse de cycle de coût en complément d'une analyse de cycle de vie menée sur du Béton de Ciment Compacté au Rouleau (BCCR) et du Béton Bitumineux (BB). Le champ d'étude du « berceau à l'utilisation sur une période de 15 ans dans le contexte de Madagascar » exclut le trafic routier. Cette analyse multicritère reposant sur la méthode d'agrégation totale hiérarchique de Saaty, se focalise sur deux principaux critères jugés d'égale importance. Le premier s'inscrit dans le cadre des Objectifs du Développement Durable comporte deux sous-critères, les émissions de gaz à effet de serre (GES) et la consommation énergétique. Le second, d'ordre économique, est structuré en coûts de construction et en coûts d'entretiens périodiques (EP). L'objectif est d'identifier la technologie réalisant la meilleure évaluation de leur agrégation suivant l'importance accordée à chacun d'entre-deux. La modélisation fait appel à l'outil PLARCE créé sous environnement VBA et EXCEL. Le coût de la construction du BCCR excède de 9,86% ceux du BB. Au niveau du champ d'étude, face au BCCR, le BB accuse un surcoût total de 165,17% dû aux EP et présente une consommation énergétique plus élevée. Le BCCR lui se distingue par des émissions de GES plus conséquentes. Le choix technologique issu des simulations dépend de l'importance accordée à chacun de ces résultats, traduite par des coefficients de pondération. Dans ce sens, l'analyse multicritère constitue un outil de décision flexible.

Mots clés : Agrégation, Consommation d'énergie, Coûts, Émissions de GES, Revêtements routiers.

ABSTRACT

This article is based on a cost cycle analysis as a complement to a life cycle analysis conducted on Roller Compacted Cement Concrete (RCCC) and Bituminous Concrete (BC) road pavements. The field of study « from cradle to the use over a 15 year period in the context of Madagascar », excludes road traffic. This multi-criteria analysis, based on Saaty's hierarchical total aggregation method, focuses on two main criteria considered to be of equal importance. The first one, in line with the Sustainable Development Objectives, includes two sub-criteria: Greenhouse Gas (GHG) emissions and energy consumption. The second, of an economic nature, is structured into construction costs and Periodic Maintenance (PM) costs. The objective is to identify the technology that performs the best assessment of their aggregation according to the importance given to each of them. The modeling uses the PLARCE tool created in Visual Basic Application and Excel environments. The construction costs of the RCCC exceed those of the BC by 9.86%. At the level of the field of study, the BC has a total cost overrun of 165.17% due to the PM and has a higher energy consumption. The RCCC is distinguished by its higher GHG emissions. The technological choice and decision from Saaty's simulations differ according to the importance given to each of these results, which is translated by weighting coefficients. In this sense, multi-criteria analysis is a flexible decision-making tool.

Keywords : Aggregation, Costs, Energy consumption, GHG emissions, Road pavements.

INTRODUCTION

L'allure contradictoire des résultats obtenus dans l'étude d'impacts environnementaux de revêtements routiers malagasy (RANDRIANANDRASANA et *al.*, 2020 / observations non publiées) ne permet pas de ressortir une alternative de revêtement particulièrement évidente, face aux objectifs du développement durable. En effet, le BCCR ayant une meilleure performance énergétique est désormais plus émissif en GES par rapport au revêtement traditionnel en BB. Par ailleurs, (Giustozzi et al., 2012; Mohod and Kadam, 2016; Thiel et al., 2014) constatent que le choix des projeteurs routiers repose de temps en temps sur la seule question « coût initial ». Cet agissement est loin d'être objectif si on se réfère aux visées du développement durable. Il est dès lors reconnu qu'une analyse conçue à partir des critères coûts et environnementaux constitue un choix à la fois plus rationnel et optimal (Giustozzi et *al.*, 2012).

L'inventaire des flux entrant et sortant, repose sur l'hypothèse, basée sur une durée d'une quinzaine d'années. Ces flux sont traduits en termes d'impacts économiques. C'est ainsi que cette analyse économique vient en appui à l'étude d'impacts environnementaux, et ce, (RANDRIANANDRASANA et *al.*, 2020 /

observations non publiées), dans le cadre d'une démarche d'analyse multicritère appliquée aux alternatives de revêtements routiers malagasy.

Cette analyse multicritère est établie en vue de faciliter le choix dans la prise de décision parmi les différentes alternatives (Keeney and Raiffa, 1976. En revanche, le choix résultant de la modélisation est en étroite relation avec les jugements parfois subjectifs, apportés aux critères. En d'autres termes, il dépend et varie selon le degré d'importance qu'on accorde aux critères (Enrique and Milagros, 2018).

MATERIELS ET METHODES

Zone d'étude

Elle concerne la Route Nationale n°2 (RN2), le plus grand réseau d'exportation et d'importation de Madagascar.

L'analyse économique

L'analyse économique exclut le trafic routier et exploite, selon les directives d'ACV (ISO, 1997, 1998, 2000a, 2000b), le flux monétaire lié aux phases de cycle de vie. La frontière de l'étude va « du berceau aux maintenances ». Le modèle s'organise autour du concept matriciel et évalue les indicateurs d'impacts économiques de chaque cycle de vie selon la démarche d'un système complexe dans l'étude de (RANDRIANANDRASANA et al., 2020 / observations non publiées). Les coûts unitaires s'obtiennent après actualisation des séries de prix dans le secteur du BTP malagasy (MTP, 1962) et/ou à partir des enquêtes.

L'analyse multicritère

L'Analyse Multicritère Hiérarchique, AMH, a été retenue. En effet, le recours à l'AMH permet de résoudre les problèmes liés à une décision gouvernementale, gestion du risque et des catastrophes et même gestion des ressources naturelles et de l'environnement (Enrique and Milagros, 2018; Navneet and Kanwal, 2004). (Cafiso et al., 2002) soutiennent l'utilisation de cette méthode dans la prise de décision stratégique sur la gestion des infrastructures routières.

Les contextes environnementaux (C_1) et économiques (C_2) sont choisis comme critères principaux, jugés sur un même degré de préférence selon l'échelle de Saaty. L'émission en Gaz à Effet de Serre ($SC_{1.1}$) puis la consommation énergétique ($SC_{1.2}$) sont les Sous-Critères liés aux critères principaux (C_1). Le coût initial ($SC_{2.1}$) et le coût d'Entretien Périodique ($SC_{2.2}$) sont les Sous-Critères liés à (C_2). Les alternatives de choix sont les scénarios de revêtements. Le modèle d'analyse

multicritère simule les scores des alternatives en fonction de l'importance accordée à chaque sous-critère (S.C) si on place les critères principaux (C) au même pied d'égalité de préférence.

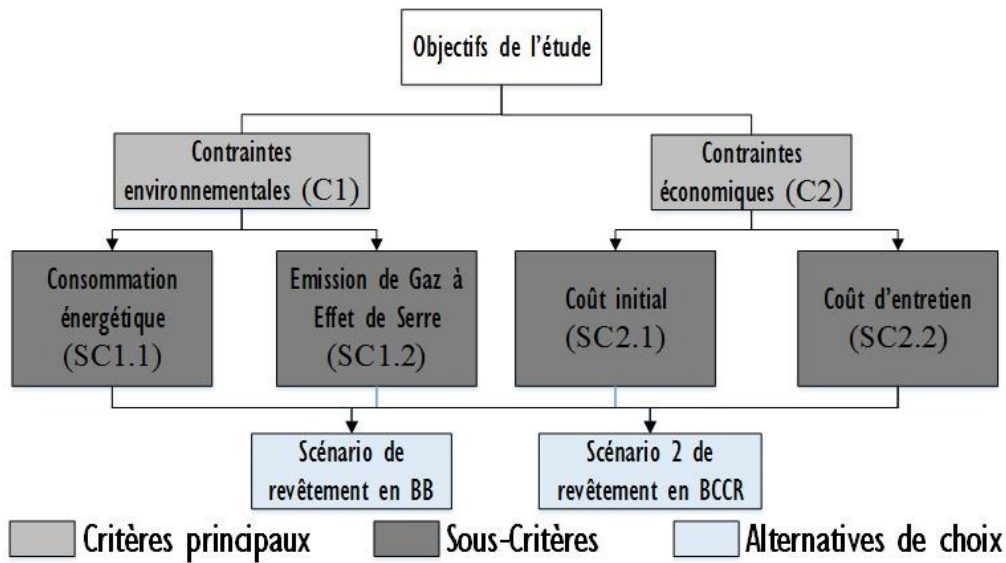


Figure 1 : L'Analyse Multicritère Hiérarchique de SAATY des alternatives de revêtements

Soit J_C^N , $J_{SC_1}^N$ et $J_{SC_2}^N$ les matrices de comparaison normalisées entre critères (C_1 et C_2) et entre sous critères ($SC_{1.1}$ et $SC_{1.2}$ puis $SC_{2.1}$ et $SC_{2.2}$).

$$J_C^N = \begin{pmatrix} & c_1 & c_1 \\ & \downarrow & \downarrow \\ c_1 \rightarrow & 1 & \frac{1}{j_{21}^N} \\ c_2 \rightarrow & j_{21}^N & 1 \end{pmatrix}_{(j_{ij}^N)_{2 \times 2} > 0}$$

$$J_{SC_1}^N = \begin{pmatrix} & SC_{1.1} & SC_{1.2} \\ & \downarrow & \downarrow \\ SC_{1.1} \rightarrow & 1 & \frac{1}{j_{21}^N} \\ SC_{1.2} \rightarrow & j_{21}^N & 1 \end{pmatrix}_{(j_{ij}^N)_{2 \times 2} > 0}$$

$$J_{SC_2}^N = \begin{pmatrix} & SC_{2.1} & SC_{2.2} \\ & \downarrow & \downarrow \\ SC_{2.1} \rightarrow & 1 & \frac{1}{j_{21}^N} \\ SC_{2.2} \rightarrow & j_{21}^N & 1 \end{pmatrix}_{(j_{ij}^N)_{2 \times 2} > 0}$$

Où, j_{ij} représente le degré d'appréciation apportée par les décideurs de l'entité "i" face à l'entité "j", en suivant l'échelle de Saaty (Bruce L. et al., 2016).

De la même manière que la relation **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, il est aussi possible d'écrire les quatre matrices carrées normalisées A_{ij}^N de comparaison des décideurs par parité des alternatives.

La méthode de moyenne géométrique (Matteo, 2015) est choisie, pour évaluer les matrices colonnes des poids des critères et sous-critères puis des alternatives issues des matrices J^N et des matrices A^N . Il est inutile de procéder aux vérifications des cohérences dans le cas où les nombres de critères " n " à comparer est égale à 2 (Enrique and Milagros, 2018).

Selon SAATY (Matteo, 2015), la matrice colonne d'agrégation finale des alternatives " $W_{a_f(n)}$ " est la combinaison linéaire des matrices colonnes poids $W_{(n)}$

des alternatives suivant chaque critère dont les coefficients sont les poids $\hat{w}_i$ de ce critère.

$$\begin{pmatrix} \omega_{a_f}^1 \\ \vdots \\ \omega_{a_f}^n \end{pmatrix} = \hat{\omega}_{c_1} \times \begin{pmatrix} \omega_{a_1}^1 \\ \vdots \\ \omega_{a_1}^n \end{pmatrix} + \dots + \hat{\omega}_{c_n} \times \begin{pmatrix} \omega_{a_n}^1 \\ \vdots \\ \omega_{a_n}^n \end{pmatrix} \quad (7)$$

Où :

- $\omega_{a_f}^i$ représente le score d'agrégation de l'alternatif " i " où $1 \leq i \leq 2$;
- $\hat{\omega}_{c_j}$: le poids du critère " j " où $1 \leq j \leq 2$;
- $\omega_{a_i}^j$: le poids de l'alternatif " i " selon le critère " j " seul où $\begin{cases} 1 \leq i \leq 2 \\ 1 \leq j \leq 2 \end{cases}$.

Ainsi pour $\forall(i, k)$, on dit que l'alternatif " i " est plus décisif par rapport à l'alternatif " k " et cela face à l'objectif fixé, si est seulement si :

$$\omega_{a_f}^i > \omega_{a_f}^k \quad \text{si} \quad \begin{cases} 1 \leq i \leq n \\ 1 \leq k \leq n \end{cases} \quad (8)$$

Particulièrement, pour $n = 2$, le choix favorise l'alternatif " k " si :

$$\omega_{a_f}^k > 0,5 \quad (9)$$

Pour (Matteo, 2015) :

$$\sum_{k=1}^n \omega_{a_f}^k = 1 \tag{10}$$

RESULTATS

Bilan de GES–consommation énergétique et coût des alternatives

Bilan de GES–consommation énergétique et coût des alternatives sur une frontière « du berceau aux portails »

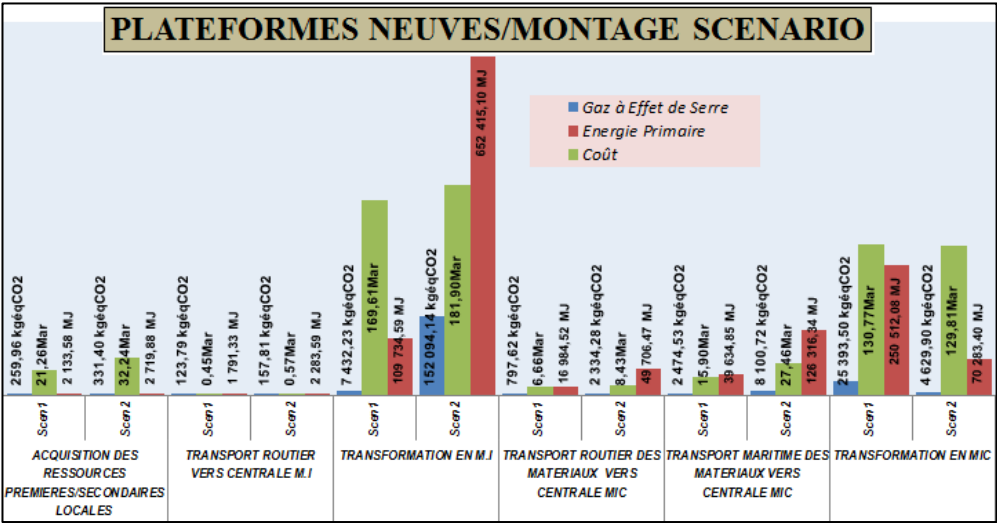
En termes de coût de construction, le revêtement BCCR devance de 9,86% celui de BB (Figure 2).

Bilan de GES–consommation énergétique et coût de maintenance des alternatives

Sur une période de 15ans, aucun EP n’est pas nécessaire pour le revêtement en BCCR, tandis que celui en BB cumule un coût d’EP de 664,49Mar (Figure 3).

Bilan de GES–consommation énergétique et coût des alternatives sur une frontière « du berceau aux maintenances »

En termes de coût et environnement, le bilan d’impact des alternatives est présenté dans la Figure 4 et résumé dans le Tableau 1.



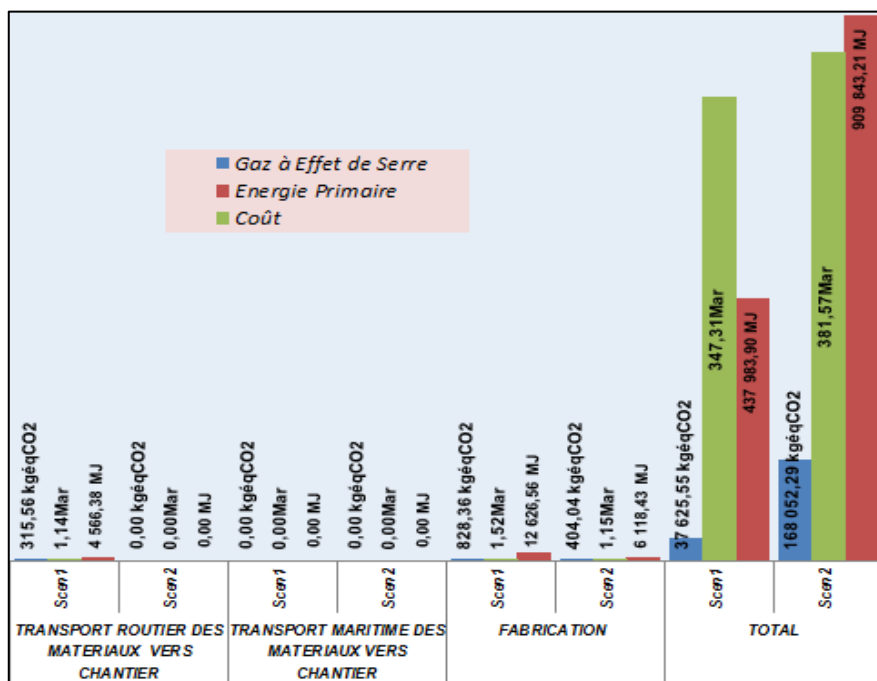
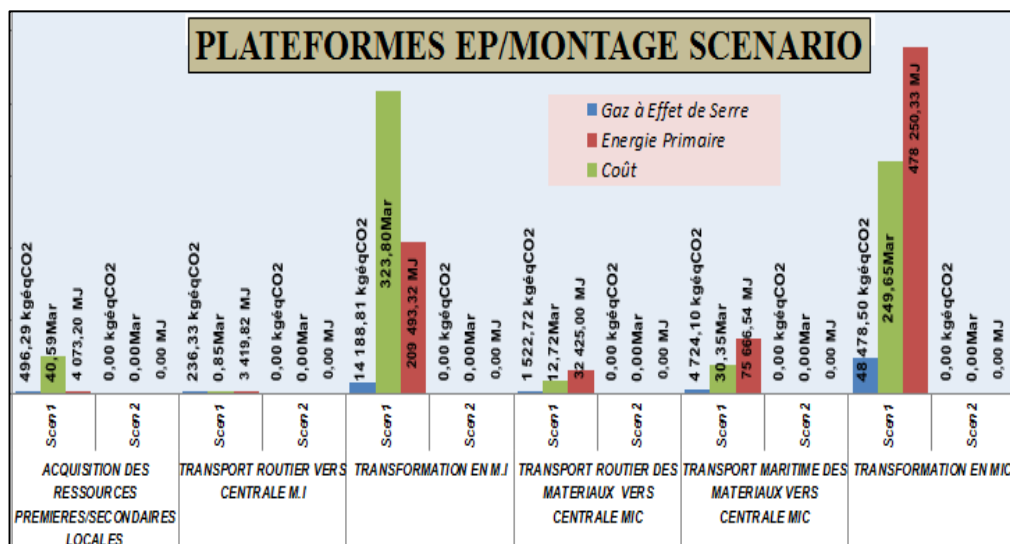


Figure 2 : Bilan de GES –consommation énergétique et coût des alternatives sur une frontière « du berceau aux portails »



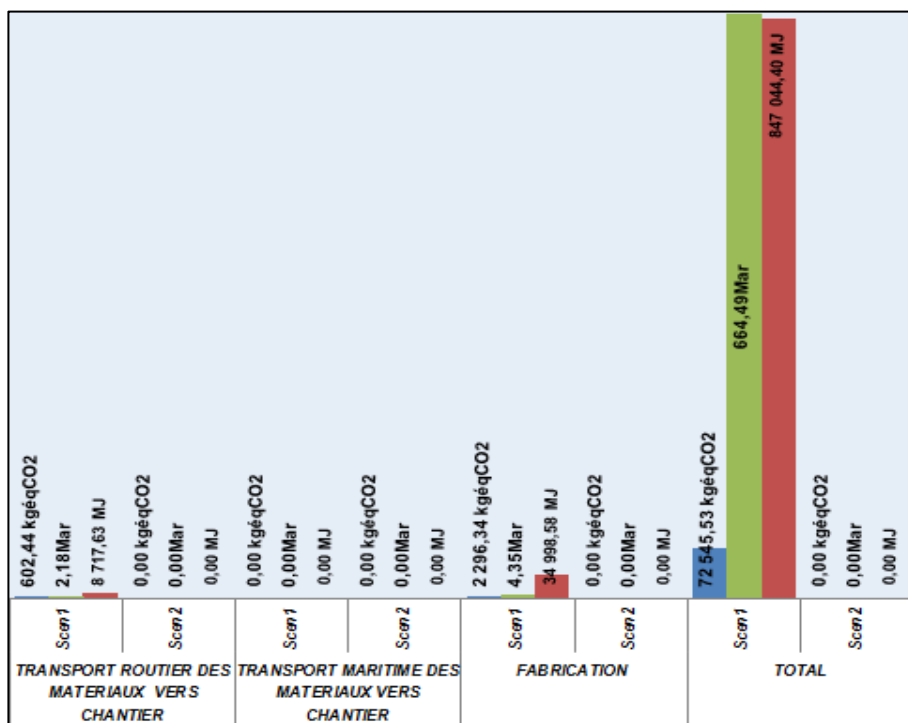
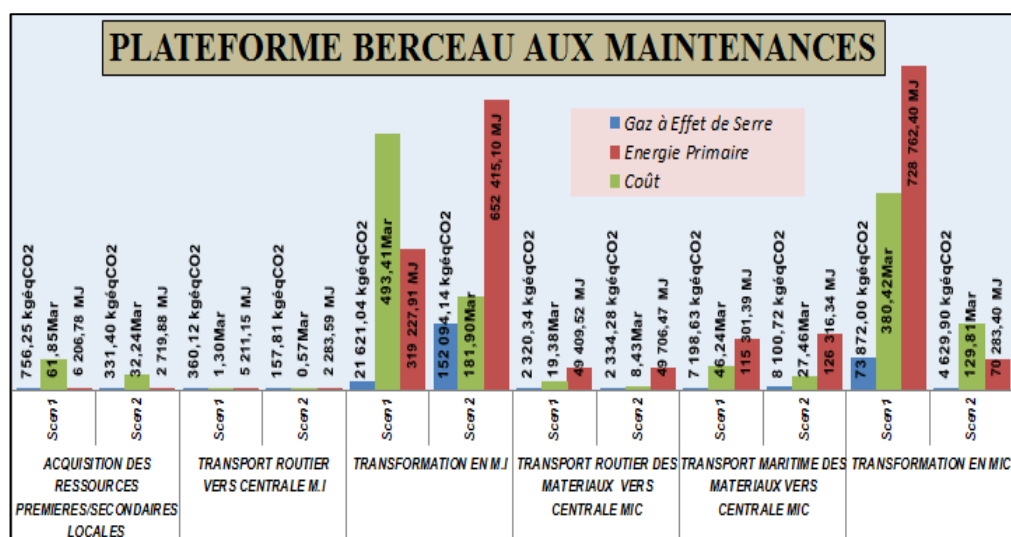


Figure 3 : Bilan de GES –consommation énergétique et coût de maintenance des alternatives



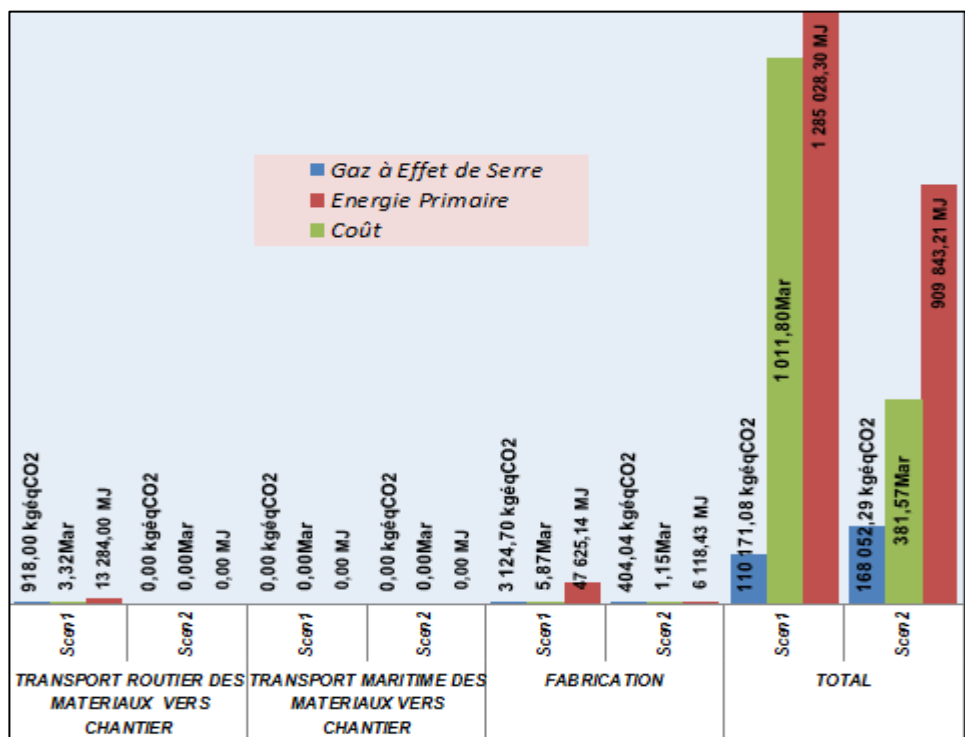


Figure 4 : Bilan de GES –consommation énergétique et coût des alternatives sur une frontière « du berceau aux maintenances »

Tableau 1 : Tableau de bilan d’impact des alternatives de revêtement

Frontières	Construction			Entretien Périodique		
Indicateurs d’impacts	GES (<i>kgéqCO₂</i>)	CE (<i>MJ</i>)	Coût (<i>10⁶ ar</i>)	GES (<i>kgéqCO₂</i>)	CE (<i>MJ</i>)	Coût (<i>10⁶ ar</i>)
B.B	37625,55	437983,9	347,31	72545,53	847044	664,49
BCCR	168052,29	909843,23	381,57	-	-	-

Frontières	« du berceau aux maintenances sur 15 ans »		
Indicateurs d’impacts	GES (<i>kgéqCO₂</i>)	CE (<i>MJ</i>)	Coût (<i>10⁶ ar</i>)
B.B (structure 1)	110171,08 (0%)	1285028,3 (+41,24%)	1011,80 (+165,17%)
BCCR (structure 2)	168052,29 (+52,54%)	909843,21 (0%)	381,57 (0%)

L'Analyse Multicritère Hiérarchique

Le scénario BB présente un coût de construction légèrement supérieur de l'ordre de 9,86% par rapport au revêtement en BCCR (Figure 2). Sur la frontière entière (Figure 4), ce scénario n°1 marqué par son coût d'EP élevé, cumule un coût global évalué à 2,65 fois par rapport au second scénario. Toutefois, ce coût titanesque du scénario 1 est rapidement compensé par son bilan d'impact en GES moins émissif de 34,4% par rapport au scénario 2. Au niveau de la consommation énergétique, le scénario n°1 devance de 41,23% le scénario n°2.

Partant des précédents constats et selon l'échelle de SAATY, les matrices A_{ij}^N à chaque sous-critère "SC" s'écrivent ainsi :

$$A_{ij}^N|_{(SC1.1)} = \begin{pmatrix} & BB & BCCR \\ & \downarrow & \downarrow \\ BB \rightarrow & 1 & 3 \\ BCR \rightarrow & 0,333 & 1 \end{pmatrix} \quad A_{ij}^N|_{(SC1.2)} = \begin{pmatrix} & BB & BCCR \\ & \downarrow & \downarrow \\ BB \rightarrow & 1 & 0,2 \\ BCR \rightarrow & 5 & 1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

$$A_{ij}^N|_{(SC2.1)} = \begin{pmatrix} & BB & BCCR \\ & \downarrow & \downarrow \\ BB \rightarrow & 1 & 3 \\ BCR \rightarrow & 0,3333 & 1 \end{pmatrix} \quad A_{ij}^N|_{(SC2.2)} = \begin{pmatrix} & BB & BCCR \\ & \downarrow & \downarrow \\ BB \rightarrow & 1 & 0,1438 \\ BCR \rightarrow & 7 & 1 \end{pmatrix}$$

où la composante a_{ij}^N de chaque matrice A_{ij}^N représente le degré d'importance (selon l'échelle de Satty) de l'alternative de revêtement en BB face à l'alternative en BCCR sous un S.C donné.

A chaque degré de préférence opté entre les S.C Energie et G.E.S, quatre cas de figure se dessinent. Le premier cas où les décideurs situent les SC de coût initial et entretien sur un même pied d'égalité d'importance. Le second cas où les décideurs donnent un peu plus d'importance au S.C coût entretien par rapport au S.C coût initial. Les décideurs accentuent l'importance du S.C coût entretien, constitue le troisième cas. Le quatrième et dernier cas accorde au S.C coût d'entretien à moins d'importance face au S.C coût de construction.

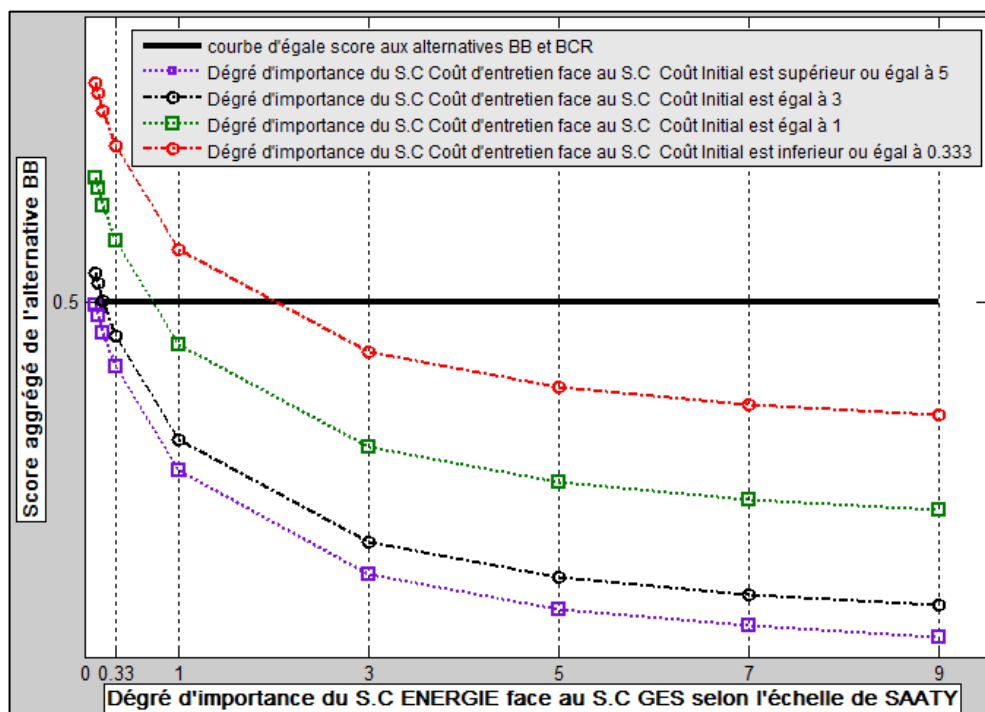


Figure 5 : courbes de simulation de l'AMH des alternatives de revêtements

La simulation de SAATY met en évidence les points suivants :

- Plus le S.C Energie est important, plus l'orientation du choix tend progressivement vers l'alternative BCCR et inversement ;
- le S.C coût d'entretien est important, alors l'alternative BCCR représente est le choix optimal ;
- Des résultats relatant une situation particulière de préférence entre chaque sous-critère peuvent être tirés du graphe ci-dessus.

DISCUSSION

En termes de coût, l'analyse comparative de (Calis and Yıldız, 2019; Mohod and Kadam, 2016) entre le revêtement souple BB et le revêtement rigide en Béton de ciment confirment les résultats obtenus au cours de cette étude. En effet, (Calis and Yıldız, 2019; Mohod and Kadam, 2016) concluent que le revêtement en BB, face au BCCR, connaît un coût de construction modéré contre un coût de maintenance élevé. Cependant et particulièrement (Tarig O. et *al.*, 2014), ne font pas l'unanimité en stipulant que les chaussées en revêtement rigide ont des coûts de construction bien moins chers par rapport aux structures souples. (Tarig O. et *al.*, 2014) intègrent dans leur étude les couches d'assises donc la structure entière des chaussées. Les autres

auteurs partagent le même avis que les résultats de l'étude, ils se concentrent uniquement sur la couche de revêtement. Cela pourrait expliquer les différents résultats issus de ces points de vue.

Malgré ces allégations, diversifiées en termes de coût initial, le choix d'un revêtement rigide est économiquement bien fondé, selon des auteurs comme (Abbasianjahromi et al., 2020; Calis and Yildizel, 2019; Mohod and Kadam, 2016; Pranav et al., 2020), si l'on considère une frontière « du berceau aux maintenances ».

En matière de coût et environnement (Giustozzi et al., 2012) stipulent que l'alternative favorisant l'EP est incontestablement le meilleur choix dans une étude de multicritère. En effet, (Giustozzi et al., 2012) considèrent une durée de vie, où les alternatives de revêtements, en absence d'E.P, peuvent se trouver non seulement sur un état de dégradation élevée mais aussi dans une médiocrité de performance. Ce niveau de dégradation généralisée nécessite ainsi une lourde intervention et accumule des charges environnementales et économiques très importantes.

La présente étude a pris en considération un champ d'étude sur une durée de vie d'une quinzaine d'année où le BCCR, qui constitue l'une des alternatives, garde sa bonne performance initiale, donc ne nécessite aucune intervention (Abdo et al., 1993). Tandis que, l'autre alternative qui est le BB a besoin d'E.P pour garder sa bonne performance (CEBTP, 1984). De l'étude, émerge des résultats plutôt contradictoires et qui ne permettent pas de ressortir un choix d'alternative certain. Seule l'attribution de degré de préférence des S.C émanant des décideurs pourra accréditer l'alternative à retenir.

CONCLUSION

Visiblement, vis-à-vis du seul S.C coût, le choix tourne est en la faveur du BCCR. Du côté de la consommation énergétique, le choix se porte sur le revêtement en béton de ciment. Dans le contexte d'émission de GES, le revêtement BB est plus favorisé. A l'échelle multicritère coût et environnement, des résultats simulés en fonction des degrés de performance des sous critères imposés par les décideurs ont eu lieu.

L'adoption d'un modèle d'analyse multicritère constitue, ainsi, une partie intégrante et indissociable de l'épreuve de choix, plus objectif, sur le revêtement routier malagasy.

Des innovations technologiques environnementalement moins impactantes ont été adoptées aussi bien pour le revêtement en BB que pour le revêtement en BCCR. (Pranav et al., 2020) stipulent que le revêtement rigide pourrait être une bonne alternative de revêtement si on adopte le type de liant hydraulique moins émissif de GES à base de cendres volantes. (Vidal et al., 2013) pensent que le revêtement enrobé à chaud reste la meilleure solution par ajout des divers additifs conduisant à une

énergie calorifique de malaxage plus basse. Devant ces innovations technologiques, il est évident que seule l'analyse multicritère pourrait orienter le choix vers l'alternative la plus rationnelle. En conséquence, la prochaine étude évoluera sur l'analyse multicritère de revêtements à bases des matériaux alternatifs.

REFERENCES

- 1) Abbasianjahromi, H., Aghevli, S., Ravanshadnia, M., (2020). Economic risk assessment of concrete and asphaltic pavements in freeways and highways. In Case Study Construction Materials 12 :346. Netherlands : Elsevier Ltd.
- 2) Cafiso, S., Di Graziano, A., Kerali, H.R., Odoki, J.B., (2002). Multicriteria Analysis Method for Pavement Maintenance Management. In Transportation Research Record 1816 : 73–84. Netherlands : Elsevier Ltd.
- 3) Calis, G., Yıldız, S.A., (2019). Investigation of roller compacted concrete: Literature review. In Challenge Journal of Concrete Research Letters 10 :63. Turkey : Tulpar
- 4) Giustozzi, F., Crispino, M., Flintsch, G., (2012). Multi-attribute life cycle assessment of preventive maintenance treatments on road pavements for achieving environmental sustainability. In The International Journal of Life Cycle Assessment. 17 : 409–419. Germany : Springer
- 5) Mohod, M.V., Kadam, K.N., (2016). A comparative study on rigid and flexible pavement: a review. In IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering 13 : 84–88. India : IOSR-JMCE.
- 6) Pranav, S., Aggarwal, S., Yang, E.-H., Kumar Sarkar, A., Pratap Singh, A., Lahoti, M., (2020). Alternative materials for wearing course of concrete pavements: A critical review. In Construction and Building Materials 236 : 117609. Netherlands: Elsevier Ltd.
- 7) Tarig O., M., Abubakr S., Z., Ahmed G., H., (2014). Initial Cost Comparison of Rigid and Flexible Pavements Case Study: Khartoum State. In Universite Of Khartoum Engineering Journal 4 : 25–32. Sudan : UofKEJ.
- 8) Thiel, C., Stengel, T., Gehlen, C., (2014). Life cycle assessment (LCA) of road pavement materials. In Eco-Efficient Construction and Building Materials 2014 : 368–403. Netherlands : Elsevier Ltd.
- 9) Vidal, R., Moliner, E., Martínez, G., Rubio, M.C., (2013). Life cycle assessment of hot mix asphalt and zeolite-based warm mix asphalt with reclaimed asphalt pavement. In Resources, Conservation and Recycling. 74 : 101–114. Netherlands: Elsevier.

- 10) Abdo, M.J., ANDERSSON, Bock, B., Galizzi, J.A., (1993). Emploi du béton compacté dans les chaussées. France : PIARC.
- 11) Bruce L., G., Edward A., W., Patrick T., H., (2016). The Analytic Hierarchy Process Applications and Studies. USA : Springer.
- 12) CEBTP, (1984). Guide pratique de dimensionnement des chaussées pour les pays tropicaux. France : SETRA.
- 13) Enrique, M., Milagros, P.-R., (2018). Practical Decision Making using Super Decisions : An Introduction to the Analytic Hierarchy Process. USA : Springer.
- 14) Keeney, R.L., Raiffa, H., (1976). Decisions with Multiple Objectives : Preferences and Value Tradeoffs. USA : Springer.
- 15) Matteo, B., (2015). Introduction to the Analytic Hierarchy Process. Finland : Springer.
- 16) MTPTCPT, (1962). Série des prix applicable aux travaux de bâtiment à Madagascar. Antananarivo : MTPTCPT.
- 17) Navneet, B., Kanwal, R., (2004). Strategic Decision Making Applying the Analytic Hierarchy Process. India : Springer.

FERME D'HYDROLIENNES, COTE OUEST DE MADAGASCAR

par

RANDRIATEFISON Nirilalaina⁽¹⁾, ANDRIANAHARISON Yvon⁽²⁾

RAHELIARILALAO B.⁽¹⁾

(1) Laboratoire des Sciences expérimentales et Mathématiques, Ecole Normale Supérieure, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Laboratoire d'Electricité, Signaux et Automatique, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

La production énergétique reste très faible, très chère et polluante à Madagascar. Pour pallier cette défaillance une des alternatives serait d'exploiter, la zone marine de la côte ouest, et plus particulièrement dans la région de Morondava, qui possède des courants de grande vitesse, des profondeurs et des coefficients de marée appropriés pour l'implantation d'hydroliennes. L'agencement de machines peut également y être développé sous forme de ferme intercalée, pour plus de puissance et de rendement. Le rayon de sillage et la vitesse de marée en entrée à la turbine sont analysés en fonction de la taille de la machine pour avoir la puissance totale produite par un parc de N hydroliennes. L'analyse a également consisté à déterminer l'écoulement en estuaire ou de débouché en mer dans le site de Bombetoka, et ce, dans le but d'installer une ferme alignée (rideau) d'hydroliennes moyennes mais fiables. La surface du disque d'une turbine a été simulée par l'utilisation du modèle de disque poreux D de rangée alignée ou décalée. Pour résoudre l'équation de Navier Stokes, la méthode des éléments finis a été utilisée. La zone marine de Morondava peut donc installer de un parc d'hydroliennes pouvant aller jusqu'à un diamètre de 10 à 20 m et d'une puissance pouvant atteindre 1000 kW au à 7800 kW. Il en est de même pour la zone estuaire de Betsiboka qui peut aussi planter des fermes hydroliennes d'une capacité minimale de 5 m, et d'une puissance de 330 kW.

Mots clés : Agrégation, Consommation d'énergie, Coûts, Émissions de GES, Revêtements routiers.

ABSTRACT

Energy production remains very low, very expensive and polluting in Madagascar. To compensate for this failure, one of the alternatives would be to exploit the marine area of the west coast, and more particularly in the Morondava region, which has high-speed currents, depths and tidal coefficients suitable for the installation

of tidal turbines. The machine layout can also be developed in the form of an intercropped farm, for more power and efficiency. The wake radius and the tidal velocity at the turbine entrance are analyzed according to the size of the machine to have the total power produced by a fleet of T TNs. The analysis also consisted of determining the flow in estuary or outlet at sea in the Bombetoka site, with the aim of installing an aligned farm (curtain) of medium but reliable tidal turbines. The disc surface of a turbine was simulated by the use of the D porous disk model of aligned or offset row. To solve the Navier Stokes equation, the finite element method was used. The Morondava marine area can therefore install a fleet of tidal turbines up to a diameter of 10 to 20 m and a power of up to 1000 kW to 7800 kW. The same applies to the Betsiboka estuary area, which can also set up tidal farms with a minimum capacity of 5 m and a power of 330 kW.

Keywords : Aggregation, Costs, Energy consumption, GHG emissions, Road pavements.

INTRODUCTION

Sur la le cote-ouest malagasy, la majorité de la production d'électricité est assurée par des groupes électrogènes qui sont de surcroît très vieux. Ces groupes électrogènes sont alimentés en carburant acheminés par voie maritime ou terrestre. La production de dioxyde de carbone qui en découle menace la planète qui tend aujourd'hui à réduire les émissions de CO₂.

Par ailleurs, la mer est un fluide riche en flux énergétiques qui peuvent être exploités sous diverses formes et l'énergie cinétique des courants de marée présente l'avantage d'être plus propre et totalement prévisible. C'est dans ce cadre qu'intervient l'étude d'une nouvelle filière de production d'énergie verte, tout en préservant l'environnement marin, encore inexploitée dans l'île : l'énergie hydrolienne. Cette source d'énergie fonctionne à partir de l'énergie cinétique des masses d'eau mises en mouvement par les courants marins dont Madagascar dispose tout au long de la côte ouest. Plus le courant est fort, plus la vitesse est élevée. Les hydroliennes pourraient être organisées dans des fermes afin d'exploiter le maximum de puissance d'un site. Du fait des sillages des machines positionnées en amont, les turbines en aval extraient moins d'énergie que celles situées en amont, ce qui induit la nécessité d'analyser ce phénomène

Notre objectif étant d'assurer la puissance maximum énergétique dans le site, il est évident qu'une seule hydrolienne ne sera pas suffisante. Le nombre de machines, fixé par la puissance globale à produire et l'agencement des hydroliennes au sein même du parc doivent être étudié avec soin. En effet, grâce à l'étude faite par d'autres chercheurs, nous pouvons modéliser le nombre et l'agencement d'hydroliennes par simulation.

MATERIELS ET METHODES

Les sites au large de la côte ouest de Madagascar notent les critères suivants :

(1) existence de zones de courants de marée importants supérieurs à 4 ou 5 nœuds (pleine puissance de l'énergie hydrolienne) ceci est dû à la présence du Courant des Aiguilles (un des plus violents courants océaniques du canal de Mozambique), (2) une amplitude de marée située entre 110 et 120cm (Figure 1) provoquant de forts courants, (3) une profondeur (bathymétrie) de l'ordre de 30 à 40 mètres, et finalement (4) de grandes villes à proximité des côtes.

Le courant marin dont la vitesse atteint 2 m/s, explique l'intérêt de certains promoteurs du développement des hydroliennes dans des sites où les courants de marée peuvent atteindre des vitesses supérieures à 4 m/s à cause de l'amplitude très élevée des marées (Figure 1) et par conséquent peuvent fournir plusieurs dizaines de kW/m².

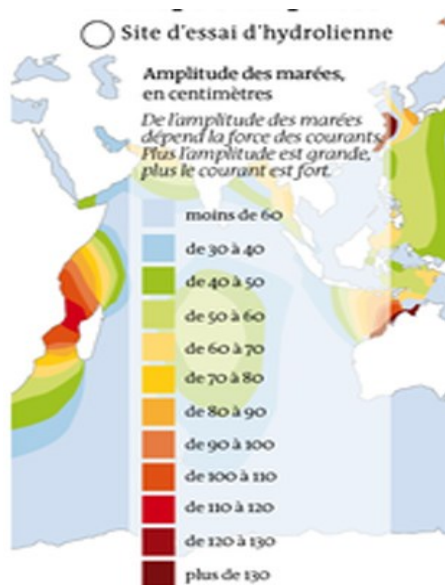


Figure 1 : Amplitude des marées dans le canal de Mozambique (Medde, 2013)

Il existe deux grands types de courants : les *courants marins* situés plus ou moins au large des côtes et les *courants de marée* (ou de marnage) que l'on rencontre dans les embouchures des fleuves et près des côtes.

Bathymétrie

Les figures 2 et 3, présentent les bathymétries au large Madagascar.

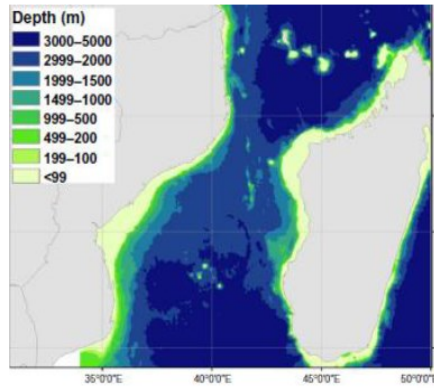


Figure 2 : Bathymétrie du canal de Mozambique et Madagascar (Obura D., *al.*,2018)

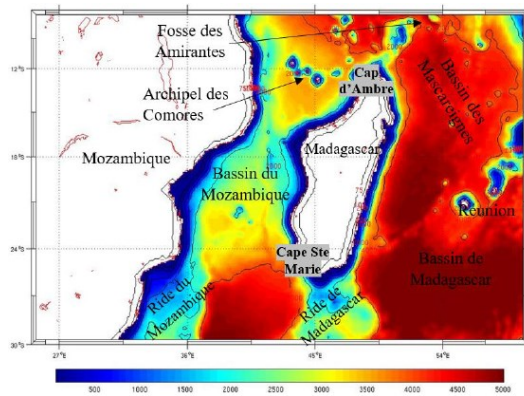


Figure 3 : Bathymétrie de la zone modélisée autour de Madagascar avec une résolution de 1/7. (Doglioli M., 2018)

La bathymétrie (10m-50m) et le profil des fonds marins (Figures 1 et 2) offrent des perspectives très diversifiées et peuvent présenter différentes profondeurs et largeurs dans le cas d'implantation de ferme sur la côte ouest.

Morondava

Pour observer la vitesse du courant au large de Morondava, le niveau littoral a été tracé, à partir de Google maps (Figure 4).

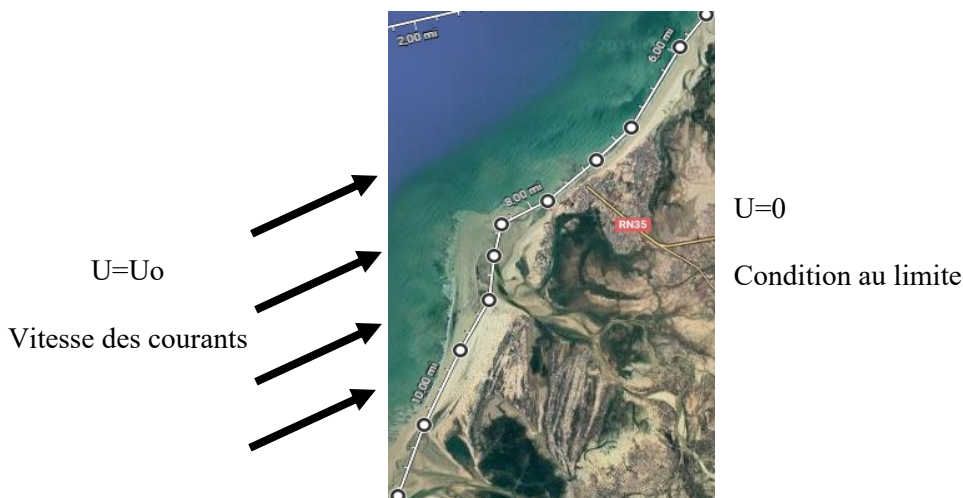


Figure 4 : Littoral de Morondava (Morondava Map-Satellite Images, Google maps)

La vitesse d'écoulement, plus importante, dans la région de Morondava (cycle à coefficient de marée très élevé, de l'ordre de 100 à 109), convient à des conversions d'énergie hydraulique qui peuvent également être développées sous la forme d'une ferme intercalée de grande envergure et de plus grande puissance. Le rayon r de sillage de la turbine hydrolienne et la vitesse de marée en entrée à cette turbine en fonction de la taille de la machine ont été considérés pour avoir la puissance totale produite par un parc de N_t hydroliennes.

Un exemple de parc au large de Brest et de Cherbourg est montré à la Figure 5. La vitesse des courants est souvent supérieure à 12 km/h. Selon Hervé Majastre, l'un des deux fondateurs d'Hydrohélix, les courants littoraux bretons et normands sont capables de fournir une puissance de 3 gigawatts (GW), soit environ l'équivalent de trois réacteurs nucléaires (Majastre H., Daviau J.2006).



Figure 5 : Vue d'artiste du parc Meygen (Écosse), production : 398 MW, Crédit : Atlantis Resources (Newsletter 2015)

Embouchure du fleuve Betsiboka

Le cas du fleuve de Betsiboka a ici été étudié. Son embouchure se situe sur le canal de Mozambique (Figure 6) ou la baie de Majunga (Basse-Betsiboka), les eaux sont relativement claires en période de mortes eaux.



Figure 6 : Vue aérienne de la baie de Bombetoka en période de morte eau (Ravinandrasana P. V., 2015)

Le fleuve Betsiboka est le plus important de Madagascar, tant par sa longueur et celle de ses affluents que par la surface de son bassin versant (58 871 km²). En face de son embouchure située dans le canal de Mozambique, le plateau continental, dont la largeur est comprise entre 10 et 20 miles marins, est festonné de « bancs » qui sont de formations d’origine corallienne, à vie très ralentie, immergés sous 7 à 10 m d’eau. Les courbes de la Figure 7 représentent la vitesse d’écoulement de l’eau développée durant 24 heures (Marées haute et basse).

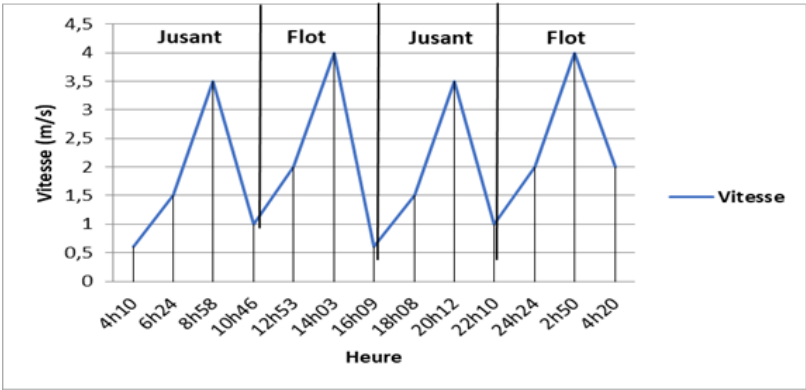


Figure 7 : Vitesse de Marée Mahajanga (Rajoeliso M., 2013)

Il est possible d'installer une chaîne d'hydroliennes (Figure 8) constituées d'un enchainement d'hélices placées dans les fonds marins. Elles ne dépassent pas la surface de l'eau, ne gênent donc pas la navigation. Elles sont souvent situées à l'embouchure des fleuves.



Figure 8 : une rangée d'hydroliennes pour capter la force des courants de marée dans l'embouchure des fleuves (Majastre H., Daviau J., 2006)

D'autres projets opérationnels existent, tel est le cas du site d'essais SEENEOH Bordeaux qui est situé sur la partie fluviale du plus grand estuaire européen, à savoir, l'estuaire de la Gironde. *Les courants sont accélérés et peuvent atteindre 3,5 m/s avec un marnage dépassant les 5 m en période de vives-eaux.* La profondeur du site, de 5 à 17 m, autorise le test d'hydroliennes à pleine échelle et à échelle intermédiaire, permettant d'adresser *les marchés du fluvial, de l'estuarien et de l'océanique.* (Hydroquest, 2018)

Equation de Navier Stokes (Violeau D.)

Pour étudier les écoulements, les équations de Navier-Stokes instationnaires sont résolues par éléments finis. Le modèle de turbulence k-ε est utilisé.

- Equations de quantité de mouvement :

$$\rho \frac{\partial u}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)u = \nabla \cdot \left[-pl + (\mu + \mu_T)(\nabla u + (\nabla u)^T) \right] + F$$

- Equation de continuité :

$$\rho \nabla \cdot (u) = 0$$

- Modèle k-ε :

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)k = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k - \rho \varepsilon$$

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho(u \cdot \nabla)\varepsilon = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k}$$

- L'énergie cinétique turbulente : $k = \frac{3}{2} (U_{ref} l_T)^2$

- Le taux de dissipation d'énergie cinétique fluctuante : $\varepsilon = C_\mu^{\frac{3}{4}} \frac{k^{\frac{3}{2}}}{L_T}$

- La vitesse d'écoulement initiale : $U_{ref} = U_0$

L'énergie produite par une hydrolienne est alors (Ottavio A., Thiébot J., Guillou S., Gualous H., 2016) :

$$P_m = \frac{1}{2} \rho C_p S V^3 .$$

où :

u : vecteur vitesse et p : la pression

F : densité volumique des forces extérieures

μ : viscosité turbulente

L_T : intensité de l'énergie cinétique turbulente

L_T : échelle de longueur turbulente

C_μ : constante à une valeur de 0,09

σ_k : constante à une valeur de 1 ; σ_ε : constante à une valeur de 1,3

ρ : masse volumique de l'eau

C_p : coefficient de puissance hydrodynamique de la turbine

S : la section de l'aire balayée par les turbines

V : vitesse du fluide en m/s

Simulations des configurations des rangées d'hydrolienne

Pour étudier les rangées d'hydroliennes et pour prévoir la disposition optimale des machines et maximiser les performances d'une ferme d'hydroliennes, l'étude de l'aspect du sillage (Figure 9) est nécessaire. Il s'agit d'une zone située derrière la turbine caractérisée par des valeurs accrues de turbulence et par une vitesse d'écoulement réduite.



Figure 9 : Sillage laissé par l'hydrolienne

Ainsi, Harrison et *al.* (2009) ont réalisés, par expérience, des essais en bassin pour déterminer le sillage de l'hydrolienne en disque poreux (Figure 10)

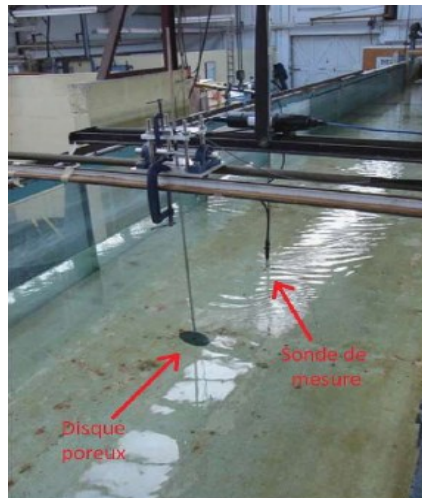


Figure 10 : Installation expérimentale utilisée par Harrison et al. et Myers et Bahaj à l'Université de Southampton (2010)

L'étude a effectué une simulation numérique pour valider le modèle considérant une configuration avec un disque poreux unique $D = 0,1$ m (rayon $r = 5$ cm), porosité =

0.45, placé dans un canal assimilé à un rectangle de 5m de largeur et 4,5m de hauteur (Figure 11), de vitesse initiale à l’entrée où $U_0=2\text{m/s}$. Les profils de vitesse mesurés qui coupent verticalement le disque ont été utilisés pour l’étude des effets de sillages du modèle.

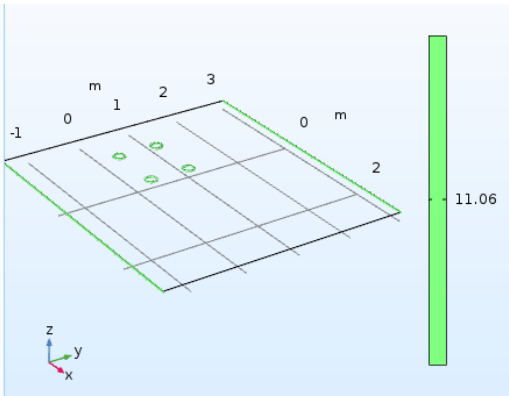


Figure 11 : Configuration de modèle

Il est possible de changer le système des rangées suivant la configuration de rangement suivante : rangée alignée ou rangée décalée (Figure 12).

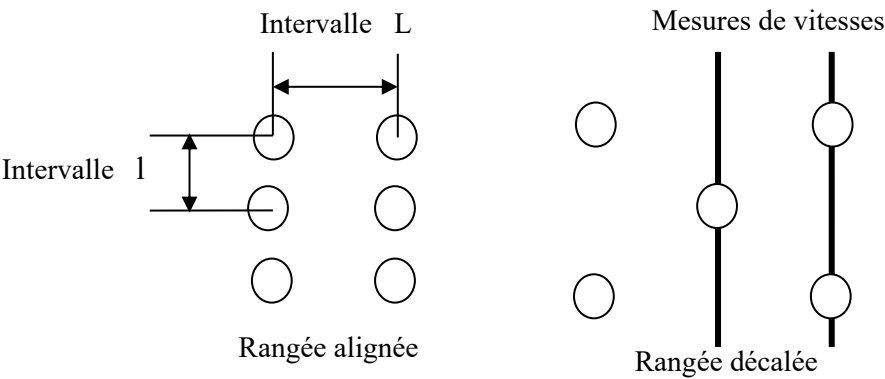


Figure 12 : Configuration de rangements de l’hydrolienne dans la ferme

Le rendement de tours en rangée alignée à partir de notre modèle est présenté sur à la Figure 13.

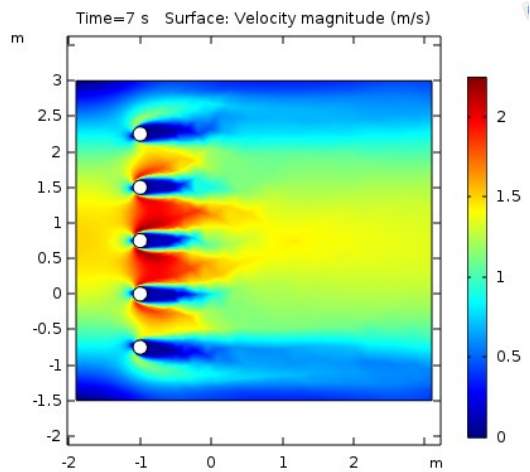


Figure 13 : Rendement des tours et lignes de courant à partir de notre modèle

Un des paramètres les plus importants et ayant un impact sur le rendement final du parc réside dans l’agencement des machines. En effet, la turbulence générée par la première rangée de machines, peut être à l’origine de la perte de 40% du potentiel énergétique pour la suivante

RESULTATS

La Figure14 présente l’écoulement autour du littoral de Morondava, et ce suivant les calculs qui ont pris en compte la géométrie et les conditions aux limites appropriées.

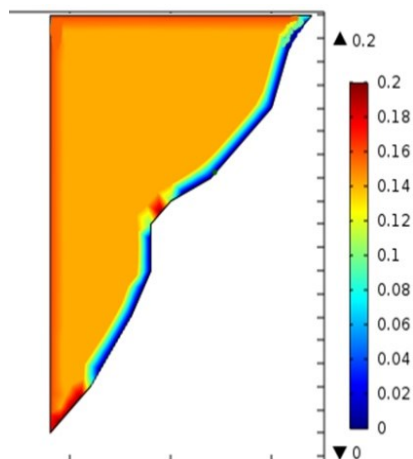


Figure 14 : Ecoulement autour de littoral de Morondava

L'analyse commence par la configuration la plus simple qui consiste à effectuer une rangée alignée des machines

Les résultats obtenus, en considérant 4 cas, sont rendus par la Figure 15.

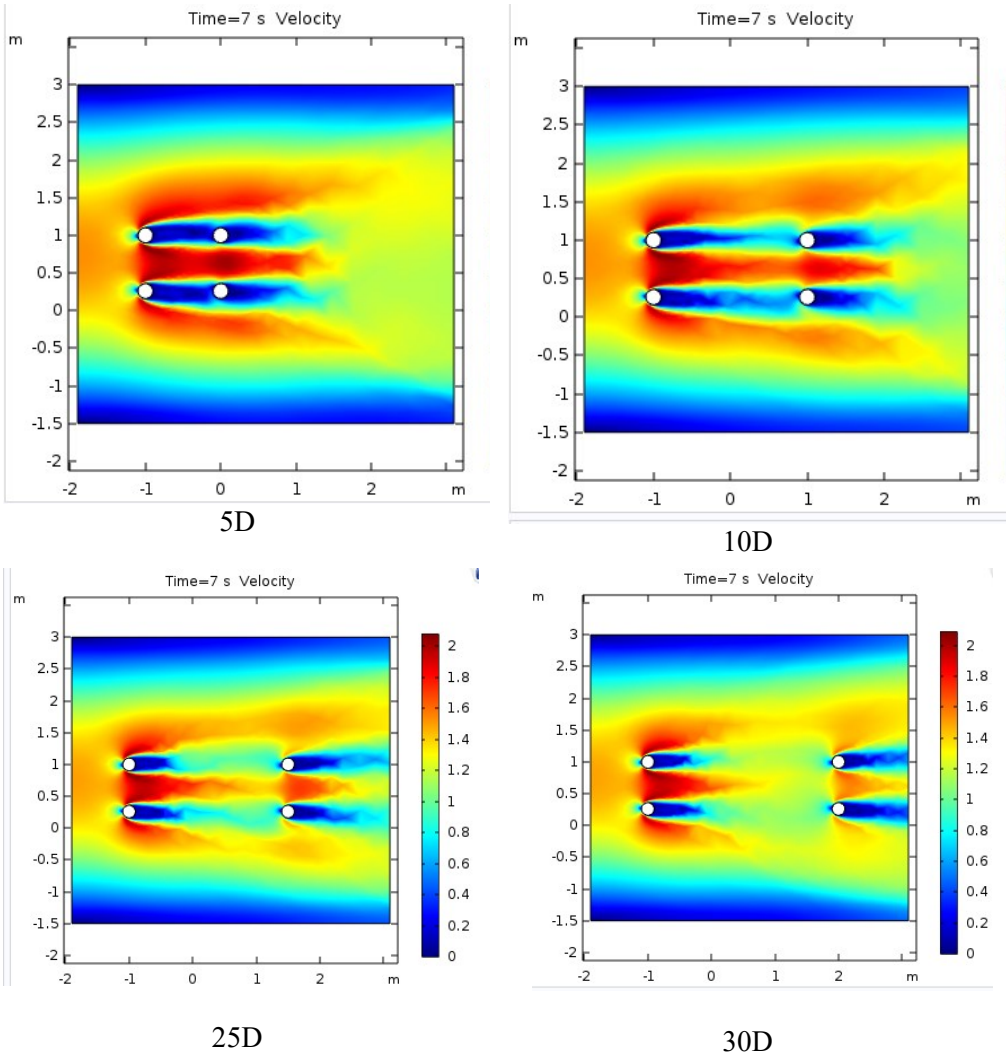


Figure 15 : Espacement entre les hydroliennes, rangée alignée

Le Tableau 1 suivant présente l'impact de la première rangée d'hydroliennes sur la puissance extraite de la seconde par les changements de distance D.

Tableau 1 : Impact de la première rangée d'hydroliennes sur la puissance extraite de la seconde

Distance (m)	D	5D	10D	25D	30D
Vitesse (m/s)	1,8	0,8	1,4	1,7	1,75
Puissance (W)	13,36	1,17	6,28	11,25	12,27

La configuration la plus appropriée, relative à l’exploitation du parc, combine la rangée alignée et la rangée décalée. Le résultat est donné à la Figure 16.

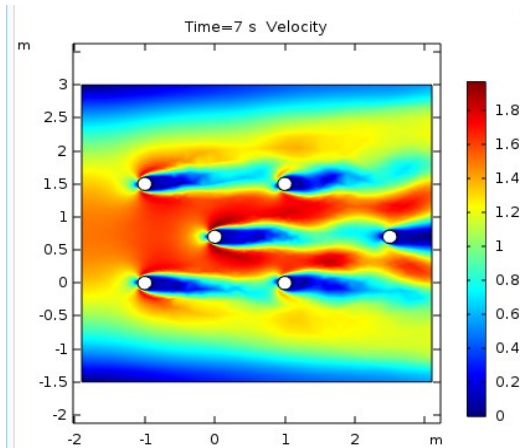


Figure 16 : Ecoulement entre les hydroliennes de rangée décalée et alignée

Le Tableau 2 affiche les résultats obtenus après la prise en considération des sillages et des vitesses correspondantes.

Tableau 2 : Impact de la première rangée d'hydroliennes sur la puissance extraite des rangées décalées et alignées

Distance (m)	D	10D (rangée décalée 1)	20D (rangée alignée 2)	35D (rangée décalée 2)
Vitesse (m/s)	1,8	1,8	1,7	1,4
Puissance (W)	13,36	13,36	11,25	6,28

La Figure 17 représente la validation du modèle numérique qui peut prédire les résultats expérimentaux, effectués par d’autres chercheurs.

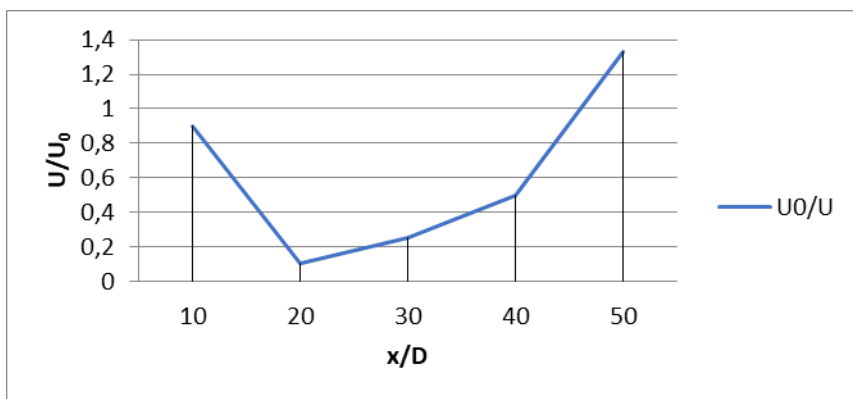


Figure 17 : Courbe de validation du modèle numérique par la simulation considérée

Applications :

En ce qui concerne l'écoulement du littoral de Morondava, plusieurs configurations sont possibles et ceci en fonction de la taille de la machine hydraulique. Dans le cas du courant ($\approx 2\text{m/s}$) qui correspond à celui de la côte de Morondava, l'hydrolienne *Alstom Hydro* (qui a acquis la société Tidal Generation Ltd en 2013) peut s'y adapter. Elle présente une turbine à 3 pales de 1,4 MW de puissance avec un rotor de 18 m de diamètre (Maitre T., 2015).

Tableau 3 : Répartition de la puissance de l'hydrolienne *Alstom Hydro* suivant la rangée alignée et décalée

Distance (m)	D	10D (rangée décalée 1)	20D (rangée alignée 2)	35D (rangée décalée 2)
Vitesse (m/s)	1,8	1,8	1,7	1,4
Puissance (MW)	1,4	1,4	1,14 (84,2%)	0,66 (47,05%)

Donc la puissance totale produite par un parc de N_t hydroliennes (6 hydroliennes) est donnée par :

$$P_t = 2 * 1,4 + 1 * 1,4 + 2 * 1,14 + 1 * 0,6$$

$$P_t = 7,8 \text{ MW}$$

Pour le cas de l'embouchure de Mahajanga, la rangée de la Figure 11 est considérée, comme de rideau de ferme d'hydroliennes.

Tableau 4 : Impact de la première rangée d'hydroliennes sur la puissance extraite de rangée alignée

Distance (m)	D(centre)	D(gauche)	D(droite)	D (Extrême G)	D (Extrême D)
Vitesse (m/s)	2	1,8	1,8	1,5	1,5
Puissance (W)	18,32	13,36	13,36	7,73	7,73

Type d'hydrolienne de Puissance 100kW du prototype

Tableau 5 : Répartition de la puissance de l'hydrolienne en rideau Puissance 100kW suivant la rangée alignée

Distance (m)	D (centre)	D (gauche)	D (droite)	D (Extrême G)	D (Extrême D)
Vitesse (m/s)	2	1,8	1,8	1,5	1,5
Puissance (kW)	100	72,9	72,9	42,18	42,18

Donc la puissance totale produite par un parc de Nt hydroliennes (5 hydroliennes en rideau) est donnée par :

$$P_t = 100 + 2*72,9 + 2*42,18$$

$$P_t = 330 \text{ kw}$$

DISCUSSION

Les résultats montrent que le sillage a un impact significatif sur la densité de machines dans le parc. Ils montrent également que le sillage créé par une première rangée d'hydroliennes réduit considérablement la puissance cinétique récupérable par la seconde rangée en aval. Plus les rangées sont rapprochées, plus les pertes sont grandes. En effet, les rangées en aval étant dans le sillage des rangées en amont, elles reçoivent moins d'énergie cinétique et ont donc un rendement plus faible.

En ce qui concerne les pertes d'énergies des lignes arrières, il est possible de décaler une ligne en rangée décalée sur 2 pour que la rangée en aval ne soit pas dans le sillage direct de la rangée juste en amont. C'est la configuration rangée alignée et décalée.

Quand le sillage augmente, même les distances longitudinales entre les turbines diminuent, elles reçoivent de l'énergie. Cette différence est due au fait que les

turbulences élevées permettent d'accélérer la récupération de vitesse dans les sillages (Hydrolienne de grande taille).

Par ailleurs, plus on approche les turbines verticalement, plus ce rendement est élevé mais la taille et la fixation de l'hydrolienne empêchent leur réalisation pratique. La rangée alignée est donc très pratique en estuaire du fait de sa dimension qui est de 5m, par contre la rangée décalée pourrait s'implanter en mer, avec une taille d'hydrolienne pouvant aller jusqu'à 20m.

CONCLUSION

Les résultats obtenus pour la puissance totale P_t sont respectivement de 7800kW dans le parc de Morondava et 330 kW à l'estuaire de Mahajanga. Il est donc nécessaire d'implanter plusieurs hydroliennes pour pouvoir pallier aux besoins énergétiques des populations de la côte ouest de Madagascar.

Mais, cette étude a été effectuée par simulation numérique du phénomène réel donc les résultats représentent des estimations rapprochées. L'ajout d'autres paramètres et des études expérimentales seraient un atout qui permettrait de conforter cette étude. En outre, l'analyse du sillage d'une hydrolienne pourrait être améliorée en considérant l'impact des effets du fond, et en réalisant l'étude en 3 dimensions (cas réel). L'étude du sillage d'une turbine est importante car elle constitue le fondement de l'analyse de l'interaction de plusieurs sillages dans une ferme d'hydroliennes

L'hydrolienne apparaît donc comme étant une bonne alternative. Malgré son coût d'implantation élevé, elle demeure plus rentable en termes de ferme.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Antheaume S., Maître T & Achard J. (2007). *Optimisation d'une ferme d'hydrolienne à axe de rotation transverse*, 18ème Congrès Français de Mécanique. 6 : 4. Grenoble.
- 2) Doglioli M. (2018). *Projet de modélisation 3d de la circulation océanique de Madagascar : application du modèle ROMS*. 15 : 4. Aix-Marseille Université et Institut OSU Pythéas.
- 3) Hydroquest (2018). *Des hydroliennes dans la Garonne bordelaise*, SEENEHO.
- 4) Maître T. (2015). *Les Hydroliennes*. Encyclopédie de l'Energie.
- 5) Majastre H., Daviau J. (2006). *L'énergie hydrolienne, une énergie qu'il ne faudrait pas négliger*. HYDROHELIX ENERGIES 140 bd de Creach Gwen 29561 Quimper cedex.
- 6) Medde. (2013). *Dossier de presse*. Conférence Institut Coriolis, 2010.

- 7) Mycek P.,GaurierB.,Germain G., Lothodé C., Pinon G., Rivoalen E. (2013), *Caractérisation Numérique et Expérimentale des Interactions entre deux Hydroliennes*, 12 : 2. Paralia.
- 8) Newsletter (2015). *Hydrolien - Marine Current Turbines change de main*. Journal des Energies Renouvelables.
- 9) Obura D., al. (2018). *The Northern Mozambique Channel*, Chapter 4 : 77. World Seas : An Environmental Evaluation.
- 10) Ottavio A., Thiébot J., Guillou S., Gualous H. (2016). *A semi-analytic method to optimize tidal farm layouts – Application to the Alderney Race* (Raz Blanchard), France.13: 2. Elsevier.
- 11) Rajoelisololo M. (2013). *Conception d'un système de pivotement automatique pour une hydrolienne non réversible*, 164 : 139, Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo.
- 12) Ravinandrasana P. V. (2015). *Contribution à l'étude du courant de marée sur la rade de Mahajanga*, 134 : 93, Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo.
- 13) Violeau D. *Les fondements de la turbulence*. 75 : 39,72. Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.

CONTROLE STRUCTURAL DE LA CIRCULATION DES FLUIDES AURIFERES DANS LE SECTEUR D'AMBODILAFA

par

RATEFIARIMINO Anick⁽¹⁾, RAKOTONANAHARY Serge M. A.⁽²⁾
RAKOTOMANANA Dominique⁽¹⁾

(1) Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Le secteur d'Ambodilafa est connue pour sa production d'or extrait des placers et des veines et lentilles conformes de quartz dans les encaissantes métamorphiques ainsi qu'aux zones de contact avec les intrusions ultrabasiques et granitiques. La minéralisation primaire d'or résulterait de la circulation des fluides mésothermaux. Le but est de modéliser les conduites de fluides et le mécanisme de piégeage. L'utilisation du Système d'Information Géographique a permis la juxtaposition de diverses couches de données géologiques, de géophysiques pour comprendre le rôle des événements de déformation pour rendre disponibles des conduits aux liquides et les modalités de piégeage de l'or.

Le secteur d'Ambodilafa est polydéformé. La conjugaison des effets des déformations successives aurait modelé sa structuration géologique. Deux domaines juxtaposés de déformations sont connus et qui sont successivement DM1, associé au cisaillement majeur d'Ifanadiana-Angavo avec une foliation pénétrative NNW-SSE à N-S et DM2, associé aux déformations majeures de Maroala avec une foliation NNE-SSW à E-W. Il en résultait une structure de repli causant des ouvertures de fentes aux plans de foliation des formations métamorphiques. La coalescence des Gondwana Occidental et Oriental aurait généré une zone collisionnelle qui aurait été responsable de l'arquage des formations géologiques de la partie Sud du secteur et de la verticalisation des structures antérieures. Deux réseaux sécants de failles en seraient alors été associés. Ces formes de rupture des roches métamorphiques et des zones de contact ont permis la circulation des fluides et l'or aurait été déposé dans les fentes et aux intersections des failles.

Mots clés : Ambodilafa, Circulation, Failles, Fentes, Fluides, Or, Piégeage.

ABSTRACT

The Ambodilafa area is known for its production of gold mined from placers and conformal veins and lenses of quartz in metamorphic rocks as well as in contact zones with ultrabasic and granitic intrusions. Primary gold mineralization would result from the circulation of mesothermal fluids. The study aims to model the fluid pipes and the gold trapping mechanism. The use of the Geographic Information System software allowed the juxtaposition of various layers of geological data, geophysics to understand the role of deformation events in making available pipes to liquids and the modalities of gold trapping.

The Ambodilafa area is polydeformed. The combination of the effects of successive deformations would have shaped its geological structure. Two juxtaposed domains of deformations are known and which are successively DM1, associated with the major Ifanadiana-Angavo shear to which is associated a penetrative foliation NNW-SSE at N-S and DM2, associated with the major deformation of Maroala with a foliation NNE-SSW at E-W. This resulted in a fold structure causing slit openings at the foliation planes of the metamorphic formations. The coalescence of Western and Eastern Gondwana would have generated a collisional zone which would have been responsible for the curving of the geological formations in the southern part of the area and for the verticalization of the former structures. Two secant fault networks would then be associated. These forms of physical weakness of the metamorphic rocks and contact zones would allow the flow of fluids and then gold would have been deposited in the splits and at the intersections of faults.

Keywords : Ambodilafa, Circulation, Faults, Fluids, Gold, Slits, Trapping.

INTRODUCTION

L'or est omniprésent dans les formations géologiques du socle cristallin précambrien de Madagascar (Rambeloson, 1999). La minéralisation y est alors du type primaire. L'or est également dans les placers, généralement étroits, constitués sur ledit socle cristallin. Les plus récentes descriptions des formations porteuses de la minéralisation en or (Andrianjakavah, 2007 ; Ramiandrisoa, 2010) ont été orientées vers la compréhension de la lithologie des formations encaissantes et ont systématiquement confirmé le potentiel en or des secteurs dont Maevatanana, Dabolava, Antananarivo, Ampasary-Mananjary (Peters *et al.*, 2003 ; PGRM, 2012). Le socle cristallin précambrien de Madagascar a été structuré par la superposition des événements orogéniques et tectono-métamorphiques successifs et dont les effets se seraient conjugués. Cette superposition des événements de déformations a favorisé la formation puis la circulation des fluides dont ceux de nature hydrothermale. Les corps magmatiques intrusifs basiques – ultrabasiques et granitiques ont catalysé à leurs contacts, la formation de zones pouvant être favorables à la concentration de l'or. Dans

les différents contextes géologiques précités, l'or peut être disséminé ou en des concentrations significatives dans les formations métamorphiques d'âge allant de l'Archéen au Protérozoïque : schistes, gneiss, amphibolites et quartzites à magnétite. La couverture sédimentaire du Phanérozoïque est également minéralisée en or qui sont sous – forme d'imprégnation aux épontes ou en remplissages des faiblesses physiques des roches comme dans le cas des gîtes d'Andavakoera (PGRM, 2012).

Le Sud – Est de Madagascar est l'une des zones réputées aurifères. La zone d'Ambodilafa, dans la Région de Vatovavy – Fitovinany, fait partie du district aurifère d'Ampasary-Mananjary. A l'instar de sa gîtologie régionale, l'or d'Ambodilafa est dans divers contextes : magmatiques, métamorphiques, hydrothermaux et de placer (PGRM, 2012 ; Peters *et al.*, 2003). La zone d'Ambodilafa aurait été affecté par les effets de la conjugaison des déformations associées à la zone de cisaillement majeur d'Angavo – Ifanadiana qui aurait été responsable de la verticalisation de la foliation tout en la rendant méridienne à subméridienne d'une part, et celles associées aux déformations majeures curviplanaires de Maroala, de direction axiale E – W (PGRM, 2012 ; DeWaele, 2011) d'autre part. Ce contexte structural aurait contrôlé la mise en place de la minéralisation primaire de l'or. La compréhension de la structuration de la zone d'Ambodilafa est primordiale pour y rendre la prospection de l'or primaire plus performante.

Notre étude vise à modéliser la circulation des fluides qui auraient contrôlé la mise en place des veines de quartz qui constituent les phases lithologiques essentielles de la minéralisation en or.

Contextes généraux

Madagascar est constitué de deux entités géologiques majeures qui sont (i) le socle cristallin précambrien, polydéformé par les événements orogéniques et tectono-métamorphiques successifs et généralement métamorphique et (ii) la couverture sédimentaire et volcano-sédimentaire du Phanérozoïque. Les deux entités ont été recoupées par des formations plutoniques acides et basiques, d'âge paléoarchéen à néoproterozoïque ainsi-que par des épisodes volcaniques récentes (du Paléozoïque à l'Actuel). Si le socle cristallin précambrien affleure sur les deux – tiers orientaux de l'Ile, le tiers occidental et du Sud restant est occupé par les formations sédimentaires. Le socle cristallin précambrien affleure sur les deux-tiers orientaux de l'Ile et est formé par six Domaines tectono-métamorphiques stables à savoir le Domaine de Bemarivo, de l'Antongil – Masora, d'Antananarivo, d'Ikalamavony, du Vohibory et le Domaine Anosyen - Androyen. Chaque Domaine est lié à une séquence majeure de l'histoire géologique du socle cristallin précambrien (PGRM, 2012).

La Zone d'étude appartient au Domaine de l'Antongil-Masora, et plus particulièrement le Sous-Domaine de la Masora. Le Sous-Domaine de la Masora est

la zone d’affleurement de la Sous-Suite de Befody (essentiellement des orthogneiss migmatitiques qui seraient l’équivalent de la Sous – Suite de Nosy Boraha dans le Sous-Domaine d’Antongil ; les deux Sous – Suites étant les composantes de la Suite de Nosy Boraha datée de 3,2 à 3,1 Ga (Tucker et al., 1999; Schofield et *al.*, 2010) et les paragneiss de Vohilava. Ces formations géologiques sont structuralement disposées sous des paragneiss, eux – mêmes recoupés par de nombreuses Suites et des formations volcaniques plus tardives.

Les événements tectono-métamorphiques gondwanéens auraient été responsables des déformations majeures du socle cristallin précambrien de Madagascar : le cisaillement d’Angavo – Ifanadiana qui s’étend du nord au sud, la mégazone de flexion de Ranotsara, la virgation d’Antananarivo et des déformations curviplanaires de Maroala. La zone d’Ambodilafa est affectée par les effets conjugués et juxtaposés du cisaillement majeur d’Angavo - Ifanadiana et des déformations curviplanaires de Maroala (DeWaele, 2011 ; PGRM, 2012).

Contextes géologiques de la zone d’Ambodilafa

La zone d’Ambodilafa appartient au Sous-Domaine de la Masora où affleurent différentes unités lithologiques. En soubassement, les orthogneiss paléoarchéens de Befody (PGRM, 2008) : orthogneiss quartzo-feldspathique à biotite ± hornblende, migmatitique, principalement tonalitique à granodioritique. Au – dessus est le groupe de Vohilava d’âge Mésoarchéen (3,2 Ga) qui est essentiellement constitué par des paragneiss à biotite ± hornblende et des micaschistes à biotite ± grenat ± graphite, renfermant également des unités mineures de quartzites, de quartzites ferrugineux, de formation de fer rubané, des talcschistes, de gneiss à grenat, de roche graphitique et des metabasalts. Faisant suite à une large lacune allant du Néoarchéen au Mésoproterozoïque, des formations du Néoproterozoïque affleurent avec le groupe de Maha qui est constitué par la formation de Nosivolo (Bésairie, 1969a) dont des micaschistes et paragneiss à biotite et grenat ± disthène avec des unités de quartzite avec ou sans grenat, de l’amphibolite et de métagabbro amphibolitisé. L’ensemble (Befody, Vohilava, Maha) est recoupé au Néoproterozoïque par (1) la suite bimodale d’Imorona –Itsindro, d’âge 840–760 Ma (Tucker et *al.*, 2011) dont le pôle acide est formé par le granite de la sub-suite d’Andohalobe tandis-que le pôle basique est constitué des harzburgites et actino-trémolitites. Des intrusions plus récentes avec (i) les formations basiques – ultrabasiques du complexe de Vohipaha [gabbro, gabbrobronite, périclase et pyroxénite d’âge 810-790 Ma (Rakotomanana, 1996)] et, (2) la suite d’Ambalavao – Kiangara – Maevarano datée de 660–630 Ma (Tucker et *al.*, 2011) avec des granites alcalins et des syénites gneissiques stratifié. Des activités volcaniques acides (rhyolites et dacites) et basiques, le volcanisme bimodal (mafique et felsique) de Sakaleona ainsi-que des épanchements basaltiques auraient été venus en recouvrement de l’ensemble.

Contexte structural

La zone d'Ambodilafa, à l'instar du sous-domaine de Masora, aurait été structurée par la conjugaison des déformations majeures gondwanéennes (cisaillement majeur d'Angavo – Ifanadiana et déformation majeure curviplanaire de Maroala). Elle aurait été ultérieurement affectée par une intense phase de métamorphisme au Néoprotérozoïque terminal vers 560 à 520 Ma (PGRM, 2012 ; PGRM, 2008).

MATERIELS ET METHODES

L'étude a été basée sur la juxtaposition des données (i) de la carte géologique N°R.51 - Vohitrandriana au 1/100.000 (PGRM, 2008), (ii) des images de la géophysique aéroportée du PGRM par Fugro Airborne Surveys (2004) : magnétométrie (champ total) et gamma-spectrométrie (K-U-Th).

- La carte géologique a permis de relever et de numériser (i) les diverses composantes de la lithologie, (ii) les trajectoires de la foliation afin de dégager les grandes lignes de déformation et leur consécutivité. L'objectif est de comprendre l'agencement spatial des diverses composantes de la lithologie et leurs probables affectations structurales. En outre, la carte géologique permet de repérer les indices de la minéralisation aurifère.
- L'image du champ magnétique total est utilisée pour l'obtention de la trajectoire des signaux magnétiques de haute et de basse intensité. Il est alors possible de tracer les trajectoires de la foliation magnétique (expressions hautes et basses intensités du champ magnétique total) ainsi-que leurs discontinuités. L'objectif est d'identifier les couloirs favorables aux circulations des fluides minéralisateurs.
- L'image de la gamma-spectrométrie, par le relèvement de la distribution de l'équivalent en concentrations relatives de chacun des trois radionucléides (potassium [K], uranium [U] et thorium [Th]) a permis de dessiner la carte radiométrique qui informe sur les effets des modifications chimiques du milieu supergène, tel que l'aurait façonné l'altération en climat tropical. K est un élément chimique résiduel et son exceptionnelle concentration serait compatible à des liquides magmatiques fortement différenciés. Th et U sont fortement hygromagmatophiles. Leurs exceptionnelles concentrations pourraient indiquer des liquides tardi-magmatiques. L'analyse de la répartition de la distribution de leurs espaces de prévalence respectifs permet d'apprécier le mouvement des fluides.

La juxtaposition des données ci-dessus énumérées permet d'identifier d'abord, les conduits empruntés par les fluides et ensuite, les conduits au sein desquels le piégeage de l'or aurait été rendu possible.

RESULTATS

La carte Géologique

Les informations tectoniques (les déformations imprimées par chaque lithologie et les relations structurales de ces dernières) qui découlent de la compréhension des données de la carte géologique de la zone d'Ambodilafa (Figure 1) ont autorisé l'identification de deux événements tectono-métamorphiques DM1 et DM2. DM1 résulterait de la superposition de deux phases plicatives F1 et F2 dont les déformations finies résultantes auraient généré un replissement de type 2 de Ramsay (pli en forme de croissant ou pli déraciné) ainsi-que des plis à épaissement aux charnières (Figure 2).

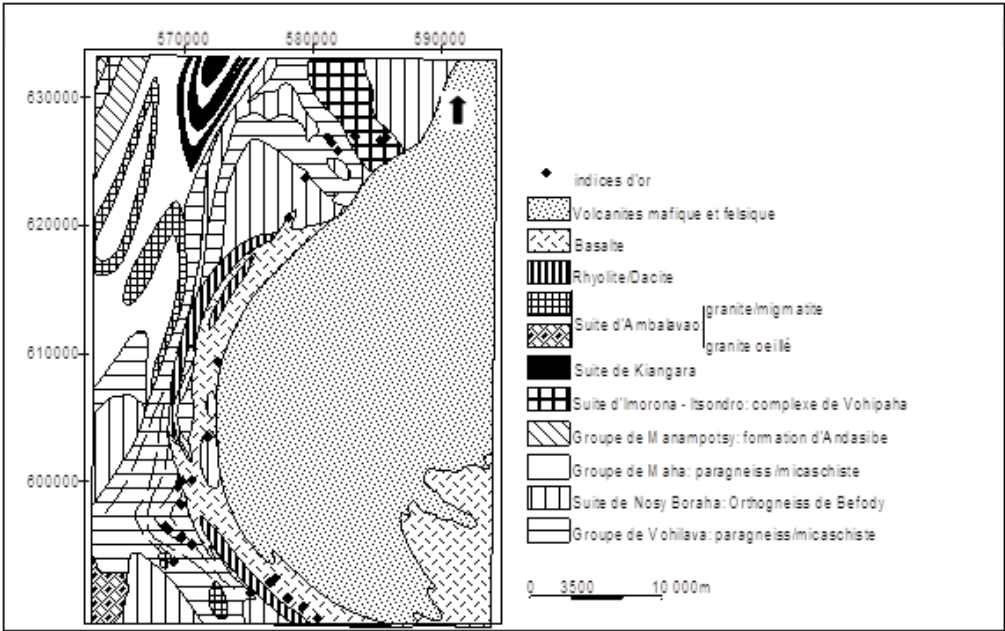


Figure 1 : Carte Géologique montrant les occurrences lithologiques majeures et la localisation des indices d'or inventoriés de la zone d'Ambodilafa.
Extraite de la synthèse de bloc au 1/500.000 par GAF et col. (2008) pour PGRM

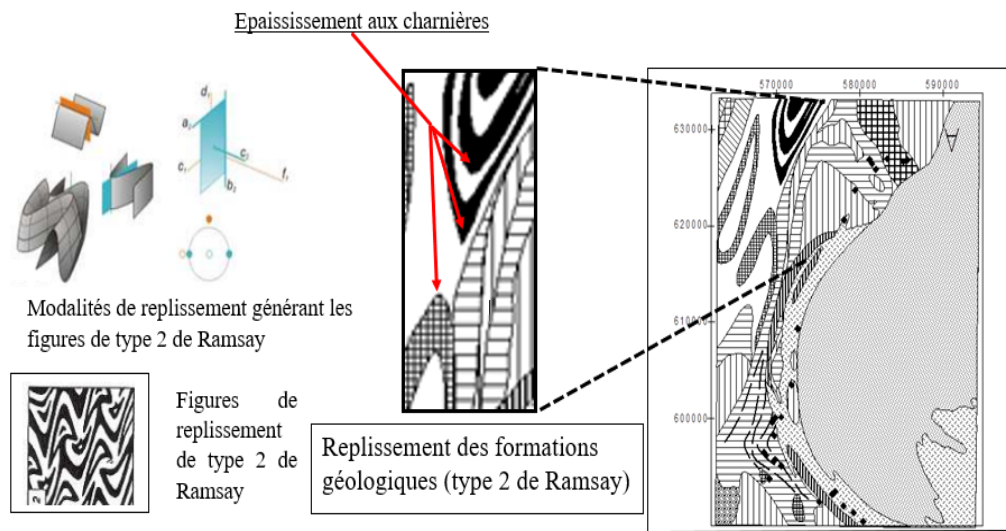


Figure 2 : Montrant les figures de replissement de type 2 de Ramsay et les plis à épaississement aux charnières

La déformation finie (Figure 3) présente deux directions axiales, identifiées de part et d'autre de la faille chevauchante P3, la plus à l'Est. A l'Ouest de P3, les tracées axiales ainsi que la foliation associée ont une direction N-S, tournant légèrement vers le NNE-SSW ($N5^{\circ}$ à $N10^{\circ}$) plongeant 45 à 60° W. A l'Est de P3, la foliation ainsi que la direction axiale est de NNW-SSE plongeant 50 à 70° WSW à W (PGRM par BRGM-USGS, 2008) (Figure 3).

DM2 est une troisième phase plicative isoclinale (Figure 3). Elle aurait tardivement affecté la région. Elle est de direction axiale E-W.

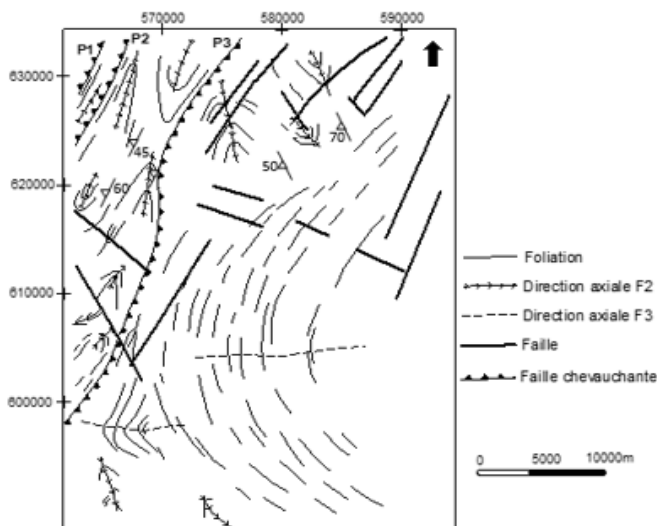


Figure 3 : Carte montrant la trajectoire de foliation et les phases cassantes affectant la zone d'Ambodilafa

Deux autres phases cassantes ont été identifiées comprend un réseau de failles indifférenciées de direction NW-SE à NNW-SSE et un autre de direction NNE-SSW. Des failles chevauchantes de direction NNW-SSE ont également affecté la partie à l'Ouest de P3 (Figure 3).

L’Image aéromagnétique (Figure 4)

L’image aéromagnétique met en évidence trois zones et ce, par la répartition des intensités du champ magnétique total. La partie NE et la partie centrale de la zone d’Ambodilafa sont caractérisés respectivement par les intensités moyennes (34364 nT : intensités du CMT) et par les fortes intensités du champ magnétique total (> 34935 nT). Leur juxtaposition aux lithologies permet de proposer qu’elles correspondraient aux intrusions mafiques – ultramafiques de Vohipaha, de la suite d’Imorona-Itsindro et au volcanisme mafique de la formation de Sakaleona ainsi que les coulées de basalte du groupe de Mananjary. La partie NW est à faible intensité du champ magnétique total magnétique (33890 nT).

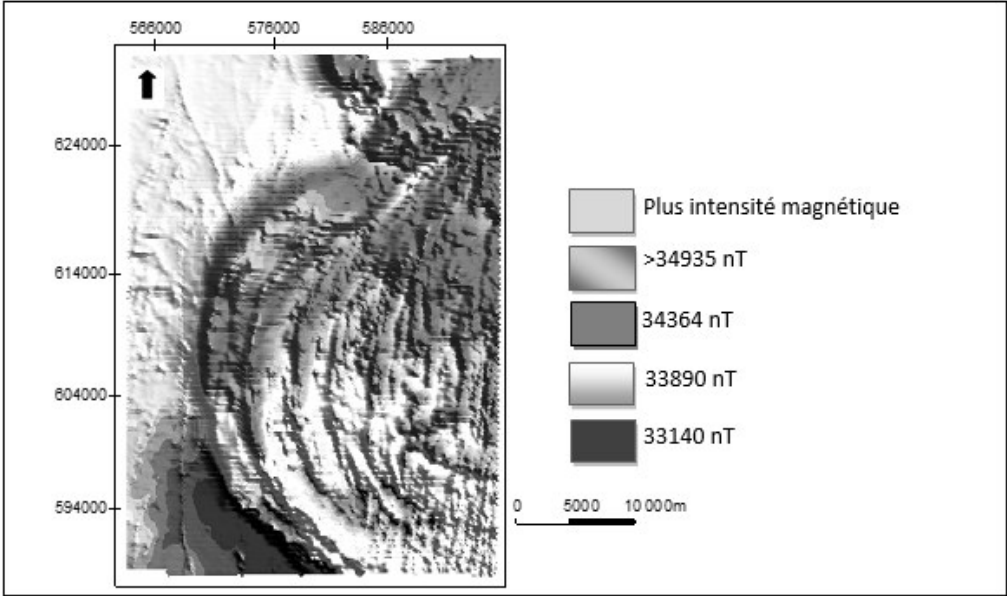


Figure 4 : Carte du champ magnétique total (CMT)

Elle est la zone d’affleurement des paragneiss et des micaschistes du groupe de Vohilava, aux orthogneiss de Befody, la suite de Nosy Boraha, aux paragneiss et micaschistes du groupe de Maha, aux micaschistes et paragneiss du groupe de Manampotsy ainsi qu’aux intrusions granitiques des suites d’Ambalavao et de Kiangara. Les parties SW et Sud de la zone d’Ambodilafa sont de prédominance des intensités très faibles du CMT (33140 nT du CMT) et qui correspondraient aux orthogneiss de Befody ainsi qu’aux paragneiss et micaschistes du groupe de Vohilava encaissant les intrusions granitiques de la suite d’Ambalavao – Kiangara–Maevarano.

Les intensités très faibles du CMT constituent les discontinuités du champ magnétique total et soulignent deux directions générales : NW-SE et NNE-SSW (figure 4).

Des figures de replissement ont été mises en évidence par les tracés des trajectoires de la foliation magnétique relative aux valeurs hautes du CMT (> 34935 nT). Les linéaments magnétiques ont une direction générale NNE-SSW tournant vers le NNW-SSE dans la partie Sud de la zone d'Ambodilafa mettant en évidence une grande virgation de direction axiale E-W (Figure 5).

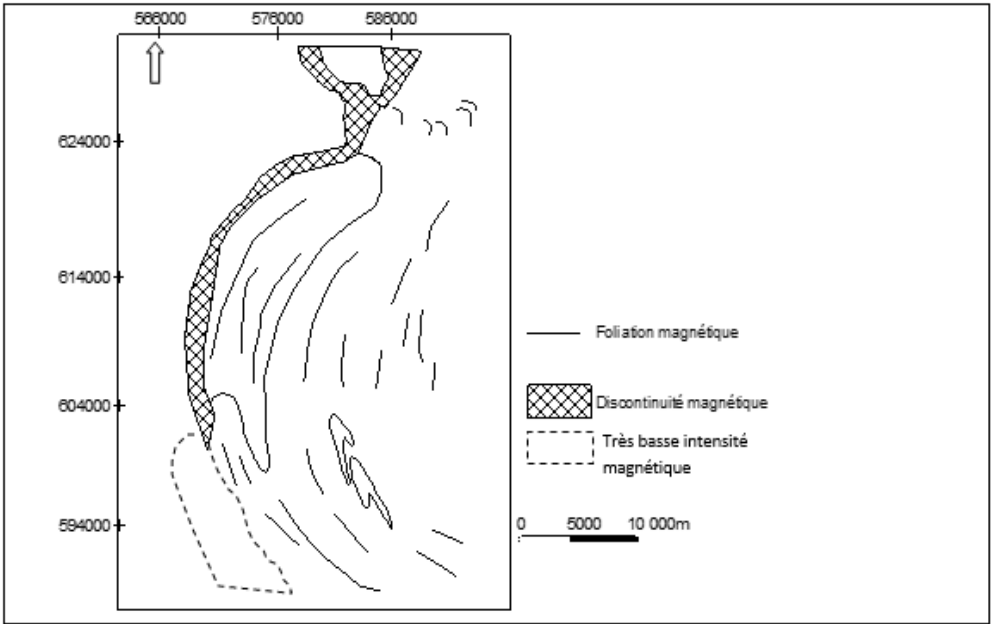


Figure 5 : Carte de la trajectoire de foliation magnétique

La Carte de l'image spectrométrique

La carte de l'image spectrométrique montre que les intrusions mafiques-ultramafiques litées de Vohipaha s'enrichissent en potassium (Figure 1 et 6). Il serait alors à comprendre que ces intrusions ont subi une intense altération et elles auraient ultérieurement été envahies par des fluides riches en potassium. La zone centrale correspond aux plages des valeurs hautes des équivalents U et Th. Elle est alors comprise comme indiquant une circulation de fluides particulièrement enrichis en ces deux radioéléments. En outre, les enrichissements en U et Th soulignent particulièrement les espaces plissés et replissés (Figure 7), faisant ainsi comprendre que les fluides enrichis en uranium et en thorium auraient emprunté les plis et les replis des roches et qu'ils s'y seraient faits piéger. La partie NW et la partie E montrent, en général, un enrichissement en U et Th et, un appauvrissement en K et la partie W présente une teneur en (K+U+Th) élevé (Figure 6).

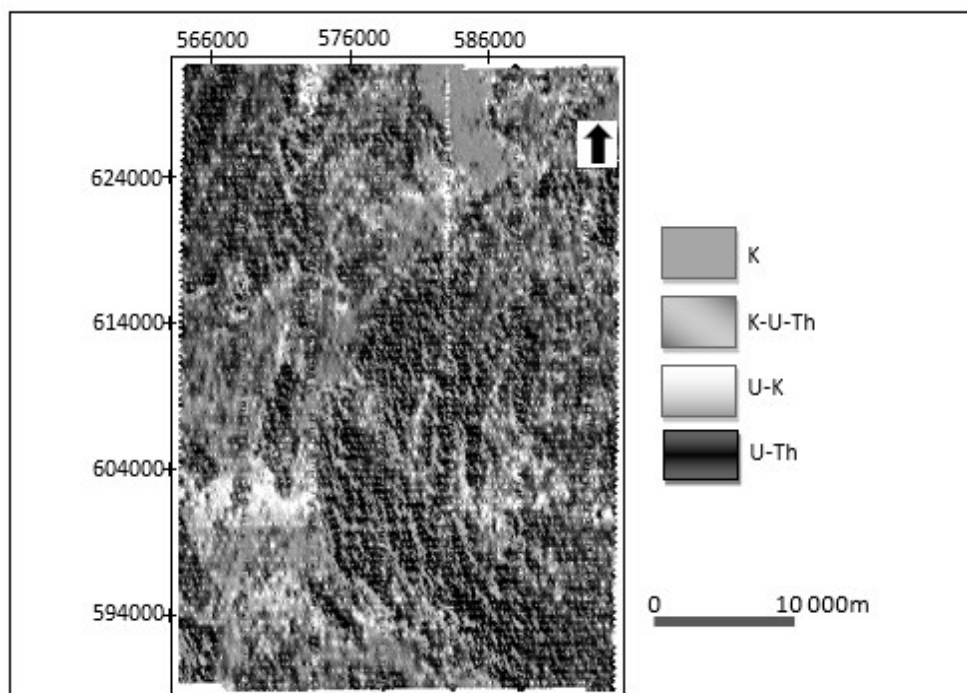


Figure 6 : Carte radiométrique de teneurs K-U-Th

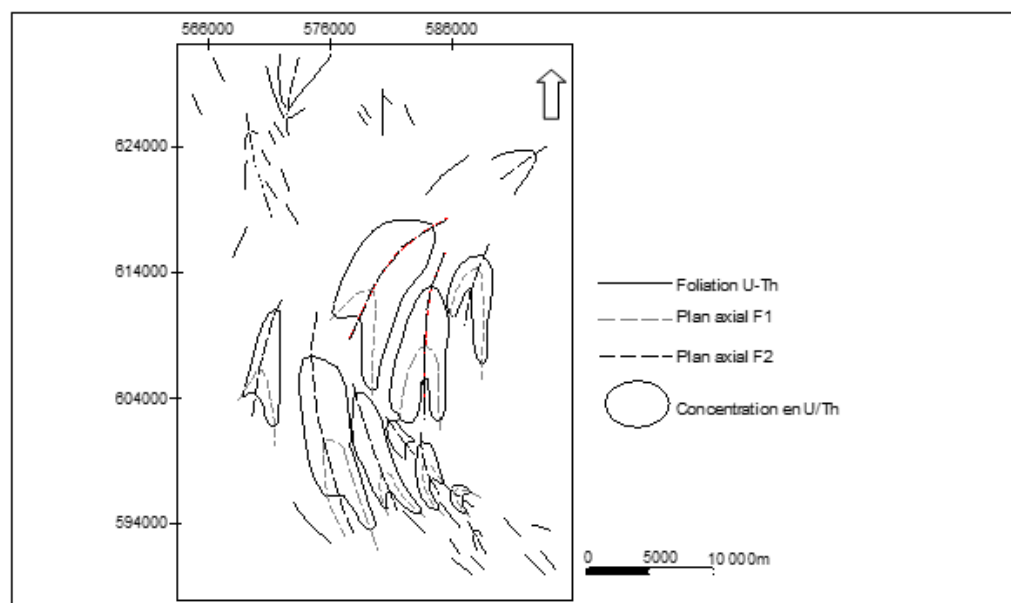


Figure 7 : Carte des trajectoires de la foliation radiométrique soulignées par les teneurs en K-U-Th. La concentration en (U-Th) souligne des figures de replissement.

La concentration en or

La juxtaposition de la carte géologique, l'image aéromagnétique ainsi que l'image spectrométrique permet de définir et caractériser trois zones potentiellement aurifères dans la zone d'Ambodilafa respectivement dénommées ZO₁, ZO₂, ZO₃ (Figure 8). La première zone aurifère ZO₁ est localisée au sein et aux abords des intrusions mafiques – ultramafiques du complexe de Vohipaha ainsi-que celles de la suite d'Imorona – Itsindro. La zone est faillée et plissée. Elle se superpose aux plages des faibles valeurs de l'intensité du CMT malgré qu'un indice d'or soit localisé dans une zone des hautes valeurs de l'intensité du CMT. ZO₂ se trouve au sein des coulées basaltiques, aux abords des volcanites mafiques et felsiques de Sakaleona et qui sont affectées par la déformation majeure curviplanaire de Maroala. Elle se superpose aux plages des faibles valeurs de l'intensité du CMT. ZO₃ correspond aux espaces d'affleurement des orthogneiss de Befody ainsi que des paragneiss et micaschistes de Vohilava qui sont intensément affectés par le plissement de direction axiale E-W. ZO₃ se superpose aux plages des faibles valeurs de l'intensité du CMT.

Les trois zones aurifères ZO₁, ZO₂, ZO₃ se superposent toutes aux espaces enrichis en K ce qui serait à comprendre comme étant les espaces qui auraient permis la formation des conduits qui auraient permis la circulation des liquides enrichis en potassium.

DISCUSSIONS

L'or est un élément de transition d'affinité géochimique sidérophile et a alors une forte tendance aux liaisons métalliques. Il est piégé sous forme cationique dans les minéraux autant des phases pétrogénétiques (cumulats) que ceux des phases liquides résiduels (intercumulats) lors du fractionnement du magma basique. Une importante circulation de fluide hydrothermal associé à un événement thermique ou thermodynamique ultérieur conditionne sa mobilisation (Gaétan L., 2018. Communication orale) ; lesdits événements pouvant être relatifs à un métamorphisme à haute intensité ou à une activité magmatique. Dans le cas présent, deux formations seraient probablement à l'origine de la minéralisation en or :

- au niveau de ZO₁ (Figure 8) : l'or auraient été initialement ramené du manteau par les intrusions basiques – ultrabasiques du complexe de Vohipaha où il se trouve piégé sous forme cationique dans les minéraux pétrogénétiques mafiques et dans les sulfures des métaux de base (pyrrhotite et pentlandite) de l'intercumulat. Les événements tectoniques, notamment ceux associés aux deux premières phases plicatives de direction axiale NNW-SSE, auraient impulsé un mouvement de fluide qui auraient mobilisé l'or. Le mécanisme serait associé à un phénomène de sulfurisation (la pyrite et l'arsénopyrite sont présents dans les phases porteuses de l'or [PGRM, 2012]). L'or cationique ainsi mobilisé aurait

alors été réduit du fait que le liquide aurait été le siège de la transformation de la magnétite en pyrite (Beaucamp, 2010) et son piégeage dans les conduits aurait alors été rendu possible. Ce fluide enrichi en or aurait par ailleurs, été responsable de l'altération accompagnée d'importantes modifications minéralogiques et géochimiques des formations géologiques encaissantes. L'or se trouve ainsi sous forme disséminé au sein des formations plissées. L'altération hydrothermale est exprimée par un apport en CO₂, en soufre et en potassium ainsi que et par le lessivage des éléments Mg, Ca et Al (Bonnemaison. et al. 1987 ; Beaucamp, 2010), expliquant ainsi les faibles signaux magnétiques et la forte expression en potassium des formations encaissantes.

Les conduits que les liquides auraient empruntés seraient des fentes d'ouverture des gneiss et des micaschistes ainsi que les intersections des failles survenues tardive mentaux dépens de l'intensification de la déformation suivie du relâchement des contraintes ; la suppression des fluides ayant provoqué les ouvertures (Beaudoin, 2006) ;

- au niveau de ZO₂ (Figure 8), les veines de quartz aurifères sont encaissées dans des épanchements basaltiques. Les indices d'or sont alignés, occupant les espaces interfoliaires conformes à S₂ (NNW-SSE). Il s'agit d'une minéralisation précoce, associée aux basaltes. Les deux phases plicatives seraient également responsables (i) de l'impulsion du fluide qui aurait mobilisé l'or, (ii) de l'ouverture des fentes et (iii) de la fracturation hydraulique qui aurait ouvert les épontes aux contacts lithologiques. Les veines de quartz dont une partie sont à or se seraient alors individualisées par suite du piégeage dans ces formes de conduits du fluide impulsé.

L'implication des déformations curviplanaires de Maroala, qui se manifestait par une troisième phase plicative F₃, aurait généré une autre circulation de fluide hydrothermal, responsable des concentrations en or à caractère interfoliaire de ZO₃, encaissées par les paragneiss de Vohilava ainsi que par les orthogneiss de Befody. A ce niveau les minéralisations sont localisées aux flancs des plis isoclinaux de direction axiale E-W. Une intense altération hydrothermale s'était produite et aurait favorisé l'individualisation des zones silicifiées minéralisées (Bonnemaison M. et *al.*, 1987).

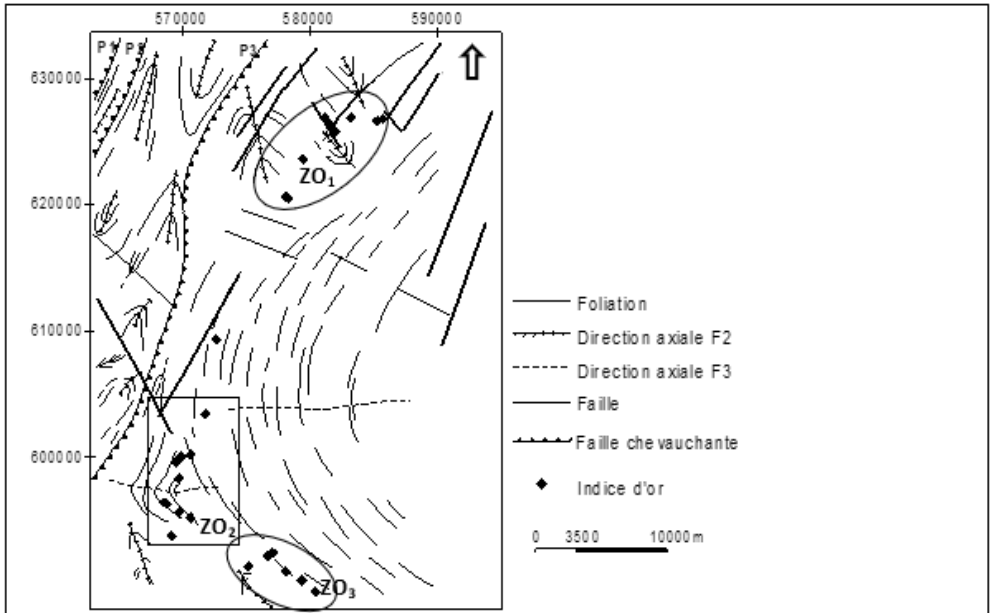


Figure 8 : Carte structurale montrant les différents éléments de déformation contrôlant les circulations des fluides hydrothermaux et le dépôt des minéralisations en or.

L'expression des structures résulte de la combinaison de toutes les informations cartographiques telles que précédemment décrites

CONCLUSION

Deux événements hydrothermaux auraient été à l'origine de la minéralisation primaire d'or dans la zone d'Ambodilafa. Les déformations finies résultant de la conjugaison des événements de déformation majeure régionaux antérieurs (structure cisailante d'Angavo – Ifanadiana et structure curviplanaire de Maroala) auraient façonné les conduits que les fluides auraient empruntés. La sulfuration en cours de circulation aurait catalysé la réduction de l'or qui aurait alors été disposé aux mécanismes de piégeage. Le quartz est la forme pétrographique de la circulation des fluides. En fonction de la nature et du type de déformation responsable de l'individualisation des conduits, le quartz peut avoir deux modes de gisement : veines conformes aux foliations des roches métamorphiques encaissantes et en placage aux épontes dans les zones de contact avec les batholites de roches magmatiques basiques et granitiques. Le quartz peut être minéralisé en or qui forme alors une paragenèse d'altération hydrothermale avec pyrite, arsénopyrite et or. La deuxième phase de l'hydrothermalisme aurait probablement été associée aux phases de la déformation majeure curviplanaire de Maroala conduisant à la formation de concentrations d'or aux flancs des plis F₃.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Andrianjakavah P., Salvi D., Béziat D., Guillaume D., Rakotondrazafy M., Moine B. (2006). Textural and fluid inclusion constraints on the origin of the banded-iron-formation-hosted gold deposits at Maevatanana, Central Madagascar. *Mineralium Deposita*. 42, 4 : 385–398.
- 2) Beaucamp C. (2010). Origine métasomatique et contrôle structural de la minéralisation aurifère du secteur minier de Marban, Canton de Dubuisson Val D'Or, Abiti, Québec. Mémoire de Maîtrise en Sciences de la Terre. Université du Québec : 94p. Montréal.
- 3) Beaudoin G. (2006). Gîtologie et métallogénie. Manuel de cours. Université Laval. Québec.
- 4) Bésairie, H. (1966a). Gites Minéraux de Madagascar : Annales Géologiques de Madagascar, Fascicule XXXIV (3) : 53–57. Tananarive Imprimerie Nationale
- 6) BGS-USGS-GLW pour PGRM (2008). Révision de la cartographie géologique et minière des zones Nord et Centre de Madagascar (Zones A, B et D). République de Madagascar, Ministère de l'Energie et des Mines 1049 p. Antananarivo : MEM/SG/DG/UCP/PGRM.
- 7) Bonnemaïson M., Marcoux E. (1987). Les shear zones aurifères - Proposition d'un modèle conceptuel. BRGM. Département d'exploration : 96p. France
- 8) DeWaele B., Thomas R.J., Macey P.H., Horstwood M.S.A., Tucker R.D., Pitfield P.E.J., et al. (2011). Provenance and tectonic significance of the Palaeoproterozoic metasedimentary successions of central and northern Madagascar, *Precambrian Research* 189:18– 42.
- 9) Peters, S.G., Bawiec, W.J., Sutphin, D.M. (2003). Pre-assessment of Madagascar's undiscovered non-fuel mineral resources. U.S. Geological Survey Administrative Report 14: 159 USA.
- 10) PGRM (2012). Cartes géologique et métallogénique de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Notice explicative. Ministère des Mines : 263p. Antananarivo : MdM/SG/DG/UCP/PGRM.
- 11) PGRM (2008). Carte géologique de Madagascar à 1/100 000- Feuille n°R51 Vohitrondriana. Ministère de l'Energie et des Mines. Antananarivo : MEM/SG/DG/UCP/PGRM.
- 12) Rakotoarimanana, R.H. (2001). Geology and petrology of the Dabolava region, west central Madagascar, with emphasis on granite hosted gold mineralization. Master in Natural Sciences, Rand Afrikaans University: 79p. South africa.

- 13) Rakotomanana, E.D. (1996). Potentiel métallogénique des complexes mafiques-ultramafiques de Madagascar. Thèse. INPL (ENSG)/CRPG Nancy-France. 2 vol. dont vol. 1(texte).
- 14) Rambeloson, R.A. (1999). Gold in Madagascar. *Gondwana Research*, v. 2.2, No. 3: 423–431.
- 15) Ramiandrisoa, N.L. (2010). Etude métallogénique du gisement d'or de Dabolava, Centre Ouest de Madagascar. Un exemple de minéralisation aurifère mésothermale dans des formations protérozoïques. Thèse. Université d'Antananarivo: 143 p.
- 16) Schofield D.I., Thomas R.J., Goodenough K.M., De Waele B., Pitfield P.E.J., Key R.M., et *al.* (2010). Geological evolution of the Antongil Craton, NE Madagascar. *Precambrian Research* 182: 187–203.
- 17) Tucker R.D., Ashwal L.D., Handke M.J., Hamilton M.A., Le Grange M., Rambeloson R.A. (1999). U–Pb geochronology and isotope geochemistry of the Archean and proterozoic rocks of north-central Madagascar. *Journal of Geology* 107 (2): 135–153.
- 18) Tucker R.D., Roig J.-Y., Delor C., Amelin Y., Goncalves P., Rabarimanana M.H. et *al.* (2011). Neoproterozoic extension in the Greater Dharwar Craton: a reevaluation of the “Betsimisaraka suture” in Madagascar, NRC Research Press Web site 48cjes.nrc.ca.

MECANISATION ARTISANALE DU REPIQUAGE ET VALORISATION DES DECHETS PLASTIQUES EN RIZICULTURE

par

ANDRIAMBAHOAKA Lydie C.⁽¹⁾, RANDRIANARISOA Santatra M.⁽¹⁾
RAZAFINDRABE Sitrakiniaina H.⁽²⁾, RAZAFINDRAKOTO Joseph R.⁽³⁾,
RANDRIAMORASATA Josoa⁽¹⁾

(1) Ecole doctorale Ingénierie et Géoscience, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar

(3) Ecole doctorale Sciences Humaines et Sociales, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

A Madagascar, la recherche sur la riziculture ne cesse de progresser. On est passé de la façon traditionnelle à la pratique intensive qui tient compte de l'impact environnemental du système. Toutefois, les techniques innovantes éprouvent des difficultés par rapport à la gestion de pépinière et la transplantation des jeunes plants vers la rizière. C'est ainsi qu'une étude a été menée dans le but de mécaniser le repiquage et de valoriser les déchets plastiques dans la riziculture. L'innovation consiste à effectuer le semis dans des germeoirs fabriqués à base de déchet plastique et du sable, à y prélever jusqu'à six plantules avec des mottes de terre et à les déposer simultanément dans la rizière tout en respectant les distances d'alignement et en se tenant debout. La technique exige l'utilisation des repiqueuses artisanales, outils métalliques équipés d'un système de prélèvement des jeunes plants, d'un système de manutention de la machine et d'un système d'expulsion des plantules. Les germeoirs utilisés sont des dispositifs rectangulaires légers, solides et rigides. Durant l'étude, des expérimentations avec des agriculteurs et des essais de fabrication de germeoir ont été réalisés. L'adoption de ce nouveau système de riziculture permet de faciliter les travaux de pépinière, d'avoir un gain de temps de repiquage jusqu'à 61,23% et d'obtenir 3,5t/ha de surplus de production par rapport au SRI classique. Finalement, la confection des matériaux conduit à la création d'emploi pour les artisans et l'exploitation des déchets plastiques contribue à la protection de l'environnement et constitue une source de revenu pour les personnes vulnérables.

Mots clés : Innovation, Riz, Rentabilité, Recyclage, Environnement, Déchets plastiques, Repiquage, Madagascar.

ABSTRACT

In Madagascar, research on rice cultivation continues to progress. We have moved from the traditional way to intensive practice which takes into account the environmental impact of the system. However, innovative techniques are having difficulty in nursery management and the transplanting of young plants to the rice field. So, a research has been realized on the purpose of mechanizing the operation of rice transplanting and recovering plastic waste in rice-growing. The innovation consists of sowing in germiners made from plastic waste and sand, taking up to six seedlings with clods of earth and placing them simultaneously in the rice field while respecting the alignment distances and while standing. The technique requires the use of artisan transplanters, metal tools equipped with a system for removing young plants, a system for handling the machine and a system for expelling the seedlings. The germiners used are light, solid and rigid rectangular devices. During the study, experiments with farmers and trials of the manufacture of germinators were carried out. The adoption of this new rice cultivation system makes it possible facilitate the nursery work, to save time of transplanting until 61,23% and to obtain 3,5t/ha of production surplus compared to the SRI (Intensive System Rice production). Finally, the preparation of materials leads to the creation of employment for artisans and the use of plastic waste contributes to the protection of the environment and constitutes a source of income for vulnerable people.

Keywords : Innovation, Rice, Performance, Recycling, Environment, Plastic waste, Transplanting, Madagascar.

INTRODUCTION

La riziculture tient une place prépondérante et stratégique dans l'économie rurale malgache. Elle occupe 1,3 millions hectares de superficie et concerne plus de 2.000.000 de ménages ruraux (MAEP, 2015). Par ailleurs, les techniques de production de riz varient de la façon traditionnelle à la pratique intensive qui tient compte de l'impact environnemental du système. Dans ce cas, le Système de Riziculture Intensif (SRI) est la méthode la plus vulgarisée. Il s'agit d'une technique découverte par le père jésuite Henri Delaulanié, qui a été développé à Madagascar dans les années 1980 (Moser et Barret, 2003). Elle se base sur le semis clair sur pépinière sèche, la bonne préparation de rizières, la transplantation de jeunes plants au stade deux feuilles, et l'intermittence de l'irrigation (Dabat *et al.*, 2007). La technique permet d'augmenter excessivement le rendement, de faire une économie d'eau et de semence et de réduire la surface de la pépinière (Razafimanantsoa, 2009) mais elle est limitée par les conditions de travail. A part les problèmes de courbature du dos, les femmes repiqueuses éprouvent des difficultés de manipulation des jeunes plants pendant le travail de transplantation. Par ailleurs, la technique exige 38 à 54 % de

travail supplémentaire par rapport à la riziculture traditionnelle (Moser et Barret, 2003). Pour résoudre ces problèmes, ont été créées des repiqueuses artisanales qui permettent d'effectuer le travail de repiquage en se tenant debout et de transplanter simultanément jusqu'à six jeunes plants de riz convenablement écartés dans la rizière. Cependant, la rentabilité de ces matériels est encore incertaine. C'est pourquoi, une étude a été menée dans le but de répondre à la question suivante : le système de riziculture intensif mécanisé (SRI mécanisé) est-il rentable par rapport au système de riziculture intensif (SRI) classique ?

Trois hypothèses sont ainsi avancées :

- Hypothèse 1 : L'utilisation des repiqueuses artisanales permet de réduire le temps de travail de repiquage ;
- Hypothèse 2 : Le SRI mécanisé est plus productif que le SRI classique ;
- Hypothèse 3 : La marge économique obtenue par l'adoption du système de riziculture intensif mécanisé peut couvrir le coût d'amortissement des matériels utilisés dans le système.

Dans cette perspective, d'abord, les repiqueuses et leurs accessoires seront exposés, le mécanisme de fonctionnement du SRI mécanisé sera expliqué et le protocole expérimental ainsi que les modes de traitement des données seront étalés. Ensuite, la quantité de travail affectée ainsi que le rendement de production des deux systèmes seront comparés et la marge économique résultant de l'application du système mécanisé et le montant de d'amortissement des matériels investis seront présentés. Enfin, la rentabilité du SRI mécanisé sera analysé et les éventuels impacts du système sur le développement durable seront développés.

MATERIELS ET METHODES

Matériels

Equipements du SRI manuel

Les matériels utilisés en SRI sont le plateau et le rayonneur. Le premier est un matériel qui sert à transporter les jeunes plants de riz dans la rizière, tandis que le second est un outil de traçage qui sert à repérer les lignes de repiquages.

Equipement du SRI mécanisé

Trois outils sont considérés, à savoir le germeoir, le semoir et la repiqueuse artisanale.

Germoir

Les germoirs sont des dispositifs rectangulaires construits à base de déchet plastique et du sable. Ils servent à supporter les jeunes plants de riz semés un à un avec un écartement de 5cm*5cm, pendant leur séjour en pépinière. Ils ont la forme d'une caisse plate à ciel ouvert de 15 cm de hauteur. Pour réduire la surface de la pépinière, les germoirs peuvent être disposés de façon superposée car leurs faces latérales sont gratifiées des vides qui garantissent l'aération et l'éclairage des jeunes plants.

Semoir

Le semoir est un appareil qui sert à semer les semences prégermées dans le germoir. Il est constitué par deux plaques de plexiglas superposables. Le premier feuillet, disposé au-dessus, est muni de plusieurs trous de forme ovale pour recueillir les grains de riz et le second, disposé en-dessous, est percé de forme arrondie. Le système d'assemblage des deux plaques est construit à base de fer plat. Pour le fonctionnement, le semoir est d'abord appliqué sur le germoir, ensuite, les grains sont à verser sur le premier feuillet et quand les trous sont tous remplis, cette plaque est tirée pour que, à l'arrêt du mouvement, les deux cavités (ovale et arrondie) se superposent et que les grains tombent par chute libre sur le terreau du germoir.

Repiqueuse artisanale

Les repiqueuses artisanales de riz sont des appareils créés pour faciliter les travaux de transplantation des jeunes plants dans la rizière et pour éviter au maximum le stress de la plante au cours de sa végétation. Ce sont des petites machines artisanales construites en fer qui permettent de repiquer simultanément plusieurs plants de riz convenablement écartés. Elles sont constituées de :

- quelques dents (variable de un à six) qui comportent le plant de riz ;
- une tige qui assure le déplacement ;
- un levier qui assure l'enfoncement de plants de riz dans la rizière.

La forme de la base des repiqueuses est variable selon le nombre de leurs dents (linéaire pour la repiqueuse à trois dents, carré pour la repiqueuse à quatre dents, et rectangulaire pour la repiqueuse à six dents). Leur poids ne dépasse pas les 4kg. Comme principe de fonctionnement, l'opérateur dépose la repiqueuse sur le germoir, appuie sur la tige pour assurer la pénétration des jeunes plants poussant sur le germoir dans les dents, déplace le matériel dans la rizière et appuie, enfin, sur le manchon (ou levier) pour faire tomber les mottes de terre contenant des plantules dans la boue.



Photo 1 : Germeoirs et repiqueuses

Matériels de prélèvement des données

Un chronomètre numérique minuteur est utilisé pour l'enregistrement des durées de travail et une balance mécanique à aiguille force 5kg pour le pesage des récoltes.

Méthodes

Une expérimentation agricole a été réalisée afin de déterminer les quantités de travail affectées en pépinière, la durée du repiquage et le rendement de production de chaque système. Une analyse économique a été également faite pour évaluer la rentabilité du système de riziculture mécanisé. Dans tous les cas, le tableur Excel a été consulté pour faciliter les calculs.

Expérimentation

L'expérimentation a été réalisé sur des rizières en bonne maitrise d'eau à Soavinandriana Itasy. Nous avons travaillé sur un écartement de 30cm*30cm dont la considération des quatres modalités suivantes :

- M1 : SRI classique (manuel) ;
- M2 : SRI mécanisée avec la repiqueuse à 3 dents ;
- M3 : SRI mécanisée avec la repiqueuse à 4 dents ;
- M4 : SRI mécanisée avec la repiqueuse à 6 dents.

Le dispositif expérimental était constitué de trois bloc de quatre parcelles élémentaires de 27m² (9m*3m), correspondant aux trois répétitions de chaque modalité. Pour chaque parcelle élémentaire, la durée de travail de repiquage ainsi que

le rendement de production en paddy ont été prélevés où les données obtenues sur des petites surfaces ont été extrapolés à l’hectare.

Par ailleurs, la durée de préparation de la pépinière a été également enregistré que ce soit pour le système manuel ou le système mécanique.

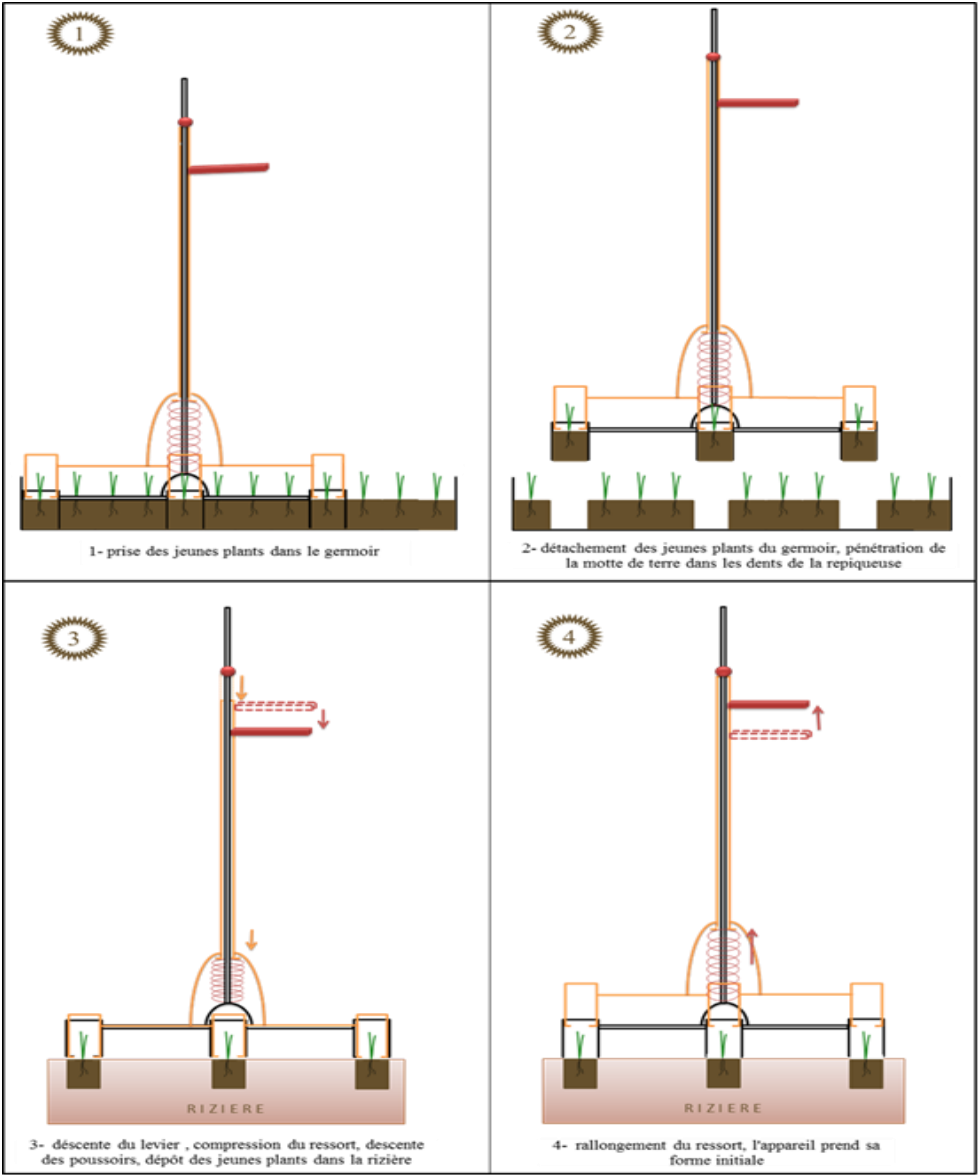


Figure 1 : Mécanisme de fonctionnement des repiqueuses artisanales

Etude économique

Le coût des gains de temps obtenu par la mécanisation du repiquage et celui du surplus de production étaient calculés. Le montant de l'amortissement des matériels utilisés dans chaque système a également été évalué sur une durée de vie de cinq ans. Les valeurs simulés étaient comparés pour pouvoir déduire que le nouveau système était bénéfique ou non.

Limites

En termes de productivité de travail et de rendement de production, les résultats recueillis par cette recherche ne coïncident pas réellement à la vraie réalité. Cela est dû à la méthodologie de travail qui s'est globalement basée sur l'extrapolation.

RESULTATS

Temps de travail

Travail en pépinière

Pour le SRI classique, les travaux de pépinière consistent à préparer la plate-bande puis à y disperser les semences avec une densité de semis de un *kapoaka*¹ de grains pré-germés par 4 m² (Tefy saina, 2007). Ensuite, il faut recouvrir le semis par une fine couche de fumure organique et par du paillage pour le protéger contre l'entraînement par les eaux d'arrosage quotidien et contre l'attaque des oiseaux. Pendant l'expérimentation, l'ouvrier ne dépensait que 2mn35s pour la préparation de la pépinière destinée à une surface de 27m². Par extrapolation, on peut dire que la quantité de travail de préparation de la pépinière du SRI classique est d'environ 2hj/ha de rizière.

Les travaux de pépinière du SRI mécanisé sont : la préparation de terreau, le rebouchage des germeoirs et le semis proprement dit. Pour la première étape, il a été constaté sur terrain qu'une main d'œuvre peut préparer 57soubiques de terreau par jour de huit heures. Comme une soubique de terreau peut remplir un germeoir de 90cm*60cm pouvant contenir 216 jeunes plants, un hectare de rizière ayant une densité de plantation de 111 111jeunes plants en consomme environ 515soubiques pour l'écartement 30cm*30cm. On peut donc déduire que la préparation du terreau demande 9hj par hectare de rizière. Pour la seconde et la dernière étape, trois essais de semis sur un germeoir de 90cm*60cm ont été chronométrés dès le rebouchage du germeoir jusqu'au recouvrement du semis par une fine couche de terre. Les résultats étaient de 89s ; 96s et 105s, soit une moyenne de 96.67s. Par extrapolation, le rebouchage de germeoir pour 1ha de rizière sollicite une quantité de travail d'environ

¹ Kapoaka : mesure locale d'une boîte de lait de 1/3 de litre

2,56hj. Bref, la quantité totale des travaux de travail en pépinière pour le SRI mécanisée est d'environ 11,56hj par hectare de rizière.

Repiquage

En SRI, les travaux de repiquage exigent l'utilisation d'un rayonneur. Les jeunes plants de riz sont arrachés avec des mottes de terre à l'aide de l'*angady*² et sont déposés dans des plateaux. Ils sont ensuite transportés dans la rizière et sont repiqués brin par brin à chaque intersection des grilles tracées par le rayonneur.

Le SRI mécanisé réclame l'utilisation d'outil pour le repiquage. Dans ce système, les mains d'œuvres n'auront plus besoin de se baisser pour effectuer leur tâche et l'équipement de repérage des écartements peut être éliminé. Il suffit de transporter les germoirs dans les rizières et d'y prélever et transplanter les jeunes plants de riz à l'aide des repiqueuses. Dans la recherche, la productivité de travail des trois types de repiqueuse a été évalué (repiqueuse à trois, quatre et six dents).

Ci-joint un diagramme qui illustre la quantité de travail de repiquage pour les différentes modalités étudiées :

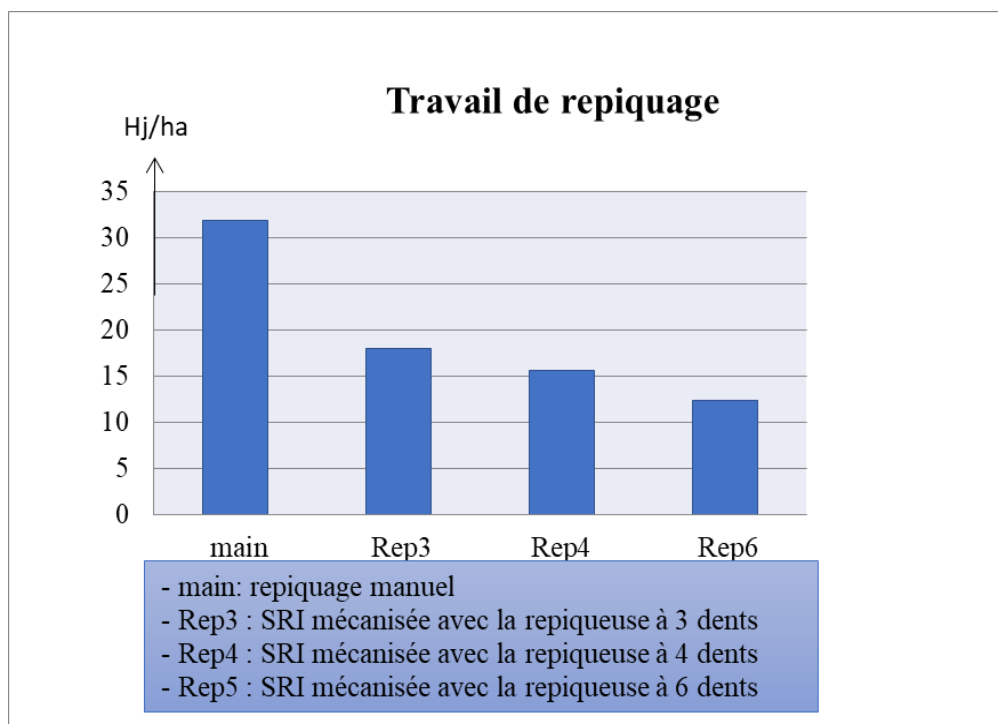


Figure 2 : Quantité de travail de repiquage en SRI manuel et SRI mécanisé

² Angady : nom malgache attribué à une bêche très tranchante à lame étroite, droite et longue, en forme de gouttière ouverte et à manche courte ou longue ; utilisée pour les différents travaux du sol.

La quantité de travail de repiquage en SRI classique demande 31,89 hj/ha, celle en SRI mécanisé varie de 12,35 à 18hj/ha. Pour tous type de répiqueuse, on constate l’obtention d’un gain de temps variant de 43,55% à 61,23%.

Coût du gain de temps

Le Tableau 1 informe sur la quantité et le coût de la différence de travail affecté en pépinière et en repiquage du SRI mécanique au dépends du SRI manuel.

Tableau 1 : Evaluation du gain de temps obtenu par la mécanisation du repiquage

	Rep3	Rep4	Rep6
Différence de travail de repiquage en hj/ha (A)	13,89	16,20	19,55
Différence de travail de pépinière en hj/ha (B)	-9,63	-9,63	-9,63
Gain de temps en hj/ha $C = (A+B)$	4,26	6,57	9,92
Coût du gain de temps en Ariary $D = C \times 3000$	12 777	19 721	29 752

Rendement de production

Les travaux de determination du rendement de production consiste à prendre des échantillons de récolte par système de culture, de les sécher puis trier et enfin peser. Le Tableau 2 ci-dessous illustre la variation de la production par système de culture et démontre le coût du surplus de production obtenu par la mécanisation du repiquage si le prix du kilos de paddy est de 750Ar.

Tableau 2 : Evaluation du surplus de production en SRI mécanisé

	Echantillon	Rendement (kg/m²)	Moyenne (kg/m²)	Différence (kg/m²)	Différence (kg/ha)	Coût du surplus (Ariary)
SRI manuel	1	0,7	0,68	0,35	3500	2 625 000
	2	0,6				
	3	0,75				
SRI mécanisé	1	1,02	1,03			
	2	1,1				
	3	0,98				

Amortissement des matériels

Le Tableau 3 suivant illustre le montant de l’amortissement des matériels utilisés en SRI manuel et en SRI mécanique.

Tableau 3 : Amortissement des matériels en SRI classique et en SRI mécanisé

	SRI manuel	SRI mécanisé		
		Rep3	Rep4	Rep6
Amortissement du Rayonneur (Ariary)	3 000	-	-	-
Amortissement du plateau (Ariary)	4 000	-	-	-
Amortissement du Semoir (Ariary)	-	6 000	6 000	6 000
Amortissement du Germeoir (Ariary)	-	463 500	463 500	463 500
Amortissement de la repiqueuse (Ariary)	-	5 000	6 000	7 000
Total (Ariary)	7 000	474 500	475 500	476 500

DISCUSSION

Rentabilité

Au moment du repiquage, l'utilisation des repiqueuses permet d'avoir des gains de temps variant de 43,55% à 61,23% par rapport au système manuel. Combiné avec le travail de pépinière, le coût du gain de temps reste faible, elle est évaluée entre 12 000 et 30 000Ar. Cependant, les résultats ont montré un coût d'amortissement très élevé dans le système mécanisé (jusqu'à 476 500Ar). Par ailleurs, l'adoption du système permet d'avoir un surplus de production de 3,5t/ha évalué à 2 625 000Ar. Ainsi, on peut déduire que le système mécanisé est plus bénéfique que le système manuel. Ci-joint un tableau qui permet mieux détaillé ces informations.

Tableau 4 : Comparaison du gain de temps et du surplus de production avec l'amortissement des matériels en SRI mécanisé

	Rep3	Rep4	Rep6
Coût du gain de temps en Ariary (A)	12 777	19 721	29 752
Surplus de production en Ariary (B)	2 625 000	2 625 000	2 625 000
Amortissement des matériels en Ariary (C)	629 000	630 000	631 000
Différence en Ariary (D=A+B-C)	2 008 777	2 014 721	2 023 752

Impact technique et agronomique

Classiquement, les repiqueurs de riz restent courbés pendant l'opération du repiquage. Grâce à la présence de ces nouvelles repiqueuses artisanales, l'opérateur peut travailler en se tenant debout, ce qui conduit à la réduction de la fatigue et à la

diminution, voire suppression des problèmes de courbature de dos. Le SRI mécanisé conduit également à la résolution des problèmes des agriculteurs qui cultivent loin de leur localité. Dans ce système, on n'effectue pas le semis en plein sol mais les grains de paddy sont semés dans des caisses. La pépinière peut être alors placée n'importe où et on peut transporter les jeunes plants à la rizière après. Enfin, la technique permet de limiter le problème de non maîtrise d'eau dans les grands périmètres rizicoles. Les jeunes plants, déjà fixés sur des mottes de terre résistent bien aux fortes pluies et à l'inondation brusque des rizières.

Du point de vue agronomique, la technique permet d'assurer la croissance continue des jeunes plants et de favoriser leur développement optimal. Les plantules repiqués avec la motte de terre peuvent continuer leur cycle végétatif sans aucun stress. Grâce à la présence de motte de terre, le « collet » ou la partie millimétrée entre les racines et la tige n'est pas complètement à l'air ou enfoncée dans le sol. Ce positionnement ainsi que le repiquage individuel permettent à toutes les parties du jeune plant de vivre dans des conditions optimales de leur développement. Ainsi, le SRI mécanisé permet d'augmenter considérablement le rendement rizicole.

Impact sur le développement durable

La protection de l'environnement, la production et consommation responsable ainsi que la lutte contre la pauvreté font partie du principe du développement durable (Martin et *al.*, 2018).

Du point de vue environnemental, la pratique du SRI mécanisé permet de réduire la prolifération des déchets plastiques dans la vie quotidienne. En effet, ces déchets non dégradables qui représentent jusqu'à 30% de la masse totale des ordures ménagères et qui constituent un véritable danger pour l'environnement (Rakotosaona et *al.*, 2014) peuvent être ramassés et recyclés pour la confection des germoirs.

Socialement, le système permet de faire intervenir les hommes dans les activités de repiquages qui sont jusqu'à maintenant considérés comme des activités particulièrement féminines pour Madagascar. Ainsi, il pourra provoquer des changements dans l'organisation du travail agricole malgache.

Economiquement, l'adoption du système permet d'améliorer la condition de vie des riziculteurs malagasy par l'augmentation de la production qui contribue à l'accroissement des revenus. Aussi, la confection des matériaux stimule la création d'emploi pour les artisans et l'exploitation des déchets plastiques engendre une source de revenu pour les personnes vulnérables.

CONCLUSION

Malgré l'alourdissement des travaux de préparation de pépinière, la technique de mécanisation artisanale du repiquage de riz proposée dans cette étude conduit à l'obtention d'un gain de temps variant de 43,55% à 61,23% par rapport au SRI classique. Ainsi, la première hypothèse affirmant que « l'utilisation des repiqueuses artisanales permet de réduire le temps de travail de repiquage » est vérifiée. Entre autre, un surplus de production de 3,5t/ha a été obtenu par la pratique du système. Ce qui confirme la deuxième hypothèse stipulant que « le SRI mécanisé est plus productif que le SRI classique ». Aussi, l'étude a démontré qu'après déduction des coût d'amortissement des repiqueuses et de ses accessoires, le système permet d'avoir une marge économique de plus de 2.000.000 Ariary/ha par rapport au SRI classique. Par conséquent, la troisième hypothèse énonçant que « la marge économique obtenu par l'adoption du système de riziculture intensif mécanisé peut couvrir le coût d'amortissement des matériels utilisés dans le système » est aussi vérifiée.

En général, on a réussi à mettre au point des machines à repiquer du premier degré de mécanisation (Velonjara, 1976) donnant relativement la satisfaction que ce soit du point de vue technique ou économique. De plus, la recherche répond aux objectifs n°1, n°2, n°5, n°9 et n°12 du développement durable qui sont respectivement : l'éradication de la pauvreté, la lutte contre la faim, l'égalité entre les sexes, l'innovation et la consommation responsable (UNICEF, 2016). Par ailleurs, le champ d'action de ces appareils ne se limite pas à la production agricole mais il pourra conduire au développement de l'industrie, notamment l'artisanat de l'ouvrage métallique et de recyclage des déchets plastiques. Ainsi, la projection de l'étude dans la vulgarisation de la technique et dans la diffusion des matériels doit être réalisée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) ANDRIANAIVORAVELONA J. Oliva, ANDRIANARY Phillipe, MANDIMBISOA Maholy, RAKOTOSAONA Rijalalaina, RAMAROSON Jean de Dieu, RANDRIANARIVELO Frédéric, Andrianaivo Lala (2014), Valorisation à l'échelle pilote des déchets plastiques pour la fabrication de matériaux de construction. Madarevues, Mada-Hary, vol. 2. 16p.
- 2) Association Tefy Saina (2007). Le système de riziculture Intensive, 2ème édition-Antananarivo.
- 3) BARRET Christopher et MOSER Christine (2003). Le système de riziculture intensif à Madagascar: situation actuelle et perspectives d'avenir. Programme ILO-Conférence "AGRICULTURE ET PAUVRETE", Mars 2003. 6p.
- 4) BELIERES Jean-François, BOSC Pierre-Marie, ELYAH Ariel, RAZAFIMAHATRATRA Hanitriniaina Mamy, SOURISSEAU Jean Michel,

TSIMISANDA Henri Michel (2014). Les agricultures familiales à Madagascar : Un atout pour le développement durable, Organisation de la Semaine de l'Agriculture Familiale 2014, Cirad-Antananarivo. 40p.

- 5) Cécile Duclaux-Monteil Ott, Flavien Tchappa, Louis-Edouard Pouget, Martin Yelkouni, Michelle Mongo, Paul Ouédraogo (2018). Comprendre et analyser des enjeux et des actions du développement durable, Cours en ligne ouvert à tous pour favoriser l'analyse et les initiatives de développement durable, Institut de la Francophonie pour le Développement Durable (IFDD). 104p.
- 6) DABAT Marie-Hélène, GRANDJEAN Philippe, TREYER Jenn (2007). Une deuxième chance pour le système de riziculture intensive à Madagascar : la recherche d'un compromis entre gain de productivité et investissement en facteurs de production. Colloque scientifique « Dynamiques rurales à Madagascar » Avril 2007-Antananarivo. 27p.
- 8) Ministère de l'Agriculture, de l'Élevage et de la Pêche (2015). Stratégie nationale de mécanisation de la filière riz à Madagascar. 39p
- 9) RAZAFIMANANTSOA Rihajarilala (2009). Analyse de l'échec et de la diffusion du système de riziculture intensive à Madagascar, Mémoire en vue de l'obtention de Diplôme d'Études Supérieures Spécialisées, Faculté DEGS, Université d'Antananarivo. 54p.
- 10) UNICEF France (2016). Les objectifs du développement durable. 8p
- 11) VELONJARA Julien (1976). La mécanisation agricole en milieu rural Tsimihety. Mémoire de fin d'études, Institut Universitaire de Technologie agricole, Université d'Antananarivo, Madagascar. 90p.

ETUDE DU MECANISME DE STABILISATION DES SOLS PAR DES STABILISANTS NATURELS – CAS DU PURIN DE BŒUF

par

RAMIANDRISOA Antsa L.⁽¹⁾, RANAIVONARIIVO Velomanantsoa G.⁽²⁾

RAKOTOARIVONIZAKA Ignace⁽³⁾, RAJAONA RAFIHAVANANA

Andrianavoravelona⁽⁴⁾

(1) Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Département Sciences des Matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, Madagascar

(3) Département Génie de Procédé et Chimie Industrielle, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo, Madagascar

(4) Département de Chimie Minérale et Chimie Physique, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

L'objectif général de cette étude est d'élaborer un nouveau procédé de stabilisation des latérites, à moindre coût. Au lieu d'utiliser les stabilisants traditionnels, notamment le ciment et la chaux, le choix s'est porté sur l'utilisation des latérites le purin de bœuf avec quelques additifs comme le sucre, l'urée et l'oxyde de fer. Le purin de bœuf est un déchet des abattoirs, donc facile à trouver.

L'étude a commencé par la détermination des matières premières (les terres et l'agent de stabilisation) puis par la définition des compositions optimales.

La réduction de l'oxyde ferrique de la latérite saturée avec le purin de bœuf, en présence de produits organiques (sucre, urée), donne des éprouvettes compactées résistantes à l'eau et dont les résistances à la compression à sec peuvent atteindre 17 MPa. En effet, immergées pendant 24 heures leurs résistances atteignent encore 5,2 MPa. Ces résistances permettent de classer les éprouvettes susmentionnées dans la catégorie « BON »

Ainsi, il est possible de réaliser des matériaux de construction performants en valorisant des déchets locaux tels que le purin de bœuf en remplacement des stabilisants minéraux usuels comme le ciment Portland et la chaux qui sont des produits chers et peu écologiques.

Mots clés : Latérite, Stabilisation, Stabilisants naturels, Purin de bœuf, Réduction microbienne.

ABSTRACT

The general objective of this study is to develop a new process for stabilizing laterites at a lower cost. Instead of using traditional stabilizers, especially cement and lime, we have chosen to use beef manure with some additives such as sugar, urea and iron oxide for laterite stabilization. Beef manure is slaughterhouse waste and is therefore easy to find.

We started our study by characterizing our raw materials (soil and stabilizer). We then looked for the optimal compositions for each type of treatment.

In the presence of organic products (sugar, urea), we obtain the reduction of the ferric oxide of the laterite, which saturated with beef manure gives compacted test pieces, whose dry compressive strengths can reach 17 MPa and which resist the water. In fact, immersed for 24 hours, their strengths still reach 5.2 MPa. These resistances allow the above-mentioned specimens to be classified in the “GOOD” category.

Thus, it is possible to produce high-performance construction materials by recovering local waste such as beef manure to replace the usual mineral stabilizers such as Portland cement and lime, which are expensive and less ecological products

Keywords : Laterite, Stabilization, Natural stabilizers, Beef manure, Microbial reduction.

FINTINA

Ny tanjona ankapobeny amin'ity fandalinana ity dia ny hamolavola dingana vaovao hanamafisana ny laterite amin'ny vidiny ambany. Raha tokony hampiasa stabilizers nentim-paharazana, indrindra ny simenitra sy ny sokay, dia nisafidy ny hampiasa zezik'omby izahay ho an'ny stabilite laterite miaraka amin'ny additives sasany toy ny siramamy, urea ary oksida vy. Ny zezik'omby dia fako famonoana ary mora hita.

Natomboka tamin'ny famaritana ny akora (tany sy stabilizer) ny fandinihana ary avy eo nofaritana ireo firaketana tsara indrindra.

Amin'ny fisian'ny vokatry biolojika (siramamy, urea), dia azontsika ny fihenana ny ferida oksidan'ny laterite izay feno ny zezik'omby dia manome sombin-fitsapana voadidy izay ny tondra-pahazavana maina dia mety hahatratra 17 MPa ary manohitra ny rano. Ny fandinihana tokoa mandritra ny 24 ora dia mbola mahatratra 5,2 MPa ny tanjany. Ireo fanoherana ireo dia ahafahana manasokajy ireo santionany voalaza etsy ambony amin'ny sokajy "TSARA".

Noho izany, azo atao ny mamokatra fitaovana fananganana avo lenta amin'ny alàlan'ny fanarenana ireo fako eo an-toerana toy ny zezik'omby hasolo hanoloana ireo

stabilisiteran'ny mineraly mahazatra toy ny simenitra Portland sy ny sokay, izay lafo sy tsy dia vokatra voajanahary.

Teny Fototra ampiasaina : Laterite, Stabilization, Stabilizer voajanahary, Zezik'omby, Fihenan'ny microbial

INTRODUCTION

A Madagascar, comme de nombreux pays en développement, le logement est un élément primordial pour l'homme afin qu'il puisse vivre dignement. Malheureusement, les malgaches sont confrontés au problème crucial du logement économique. La construction fait face à une augmentation incessante du prix des matériaux, de quincaillerie, qui n'est pas toujours à la portée de la majorité de la population malgache. Cette crise de l'habitat économique est d'une telle ampleur qu'il est urgent de trouver de nouvelles solutions. L'un des objectifs de cette recherche est d'utiliser au mieux les ressources locales notamment la latérite, matière première abondante et omniprésente dans toutes les régions de l'île de Madagascar, en la mélangeant avec divers composés de substances naturelles facilement disponibles et des méthodes adéquates comme l'activation de la réduction microbienne par le purin de bœuf. De ce fait, l'objectif est d'élaborer des matériaux de construction locaux à moindre coût et faciles à fabriquer. Aussi est-il capital de connaître si l'insertion de ces stabilisants naturels avec la latérite pourrait améliorer la résistance mécanique et la résistance à l'eau des matériaux obtenus. Les études des matériaux constituent l'essentiel des recherches en laboratoire. La vérification de la performance mécanique a été faite à l'aide d'une presse hydraulique universelle Test Well.

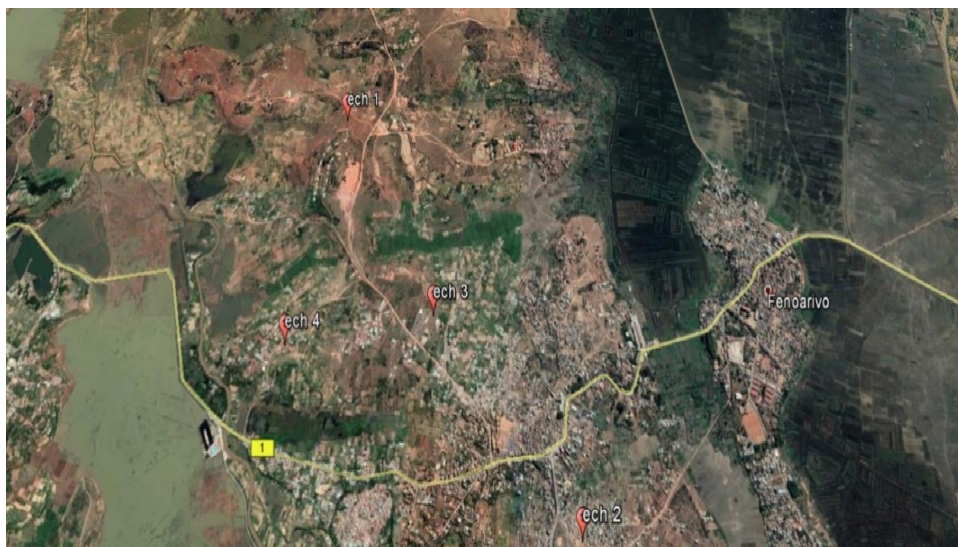
MATERIELS ET METHODES

La latérite

Les sites de prélèvement

Les matériaux utilisés pour la partie expérimentale des travaux ont été prélevés dans le District d'Alakamisy Fenoarivo, à une profondeur de 0,5m à 1m (coordonnées géographiques : Latitude 18°56'33.09"; Longitude 47°25'35.55").

La photo-satellite de la Figure 1 montre le lieu de collecte des échantillons d'Alakamisy, les points marqués en rouges sur la carte sont les lieux de prélèvement de latérite.



Source : Google Earth, février 2020

Figure 1 : Carte de localisation des points de prélèvement des échantillons d'Alakamisy

Identification des matériaux

Analyse chimique et minéralogique des latérites étudiées

L'intensité des raies caractérisent les quantités respectives plus ou moins importantes de constituants. Le tableau 1 donne les différents constituants identifiés par DRX, pour l'échantillon étudié, avec une note sur l'intensité des principales raies correspondantes.

Tableau 1 : Analyse minéralogique qualitative par DRX de latérite

Kaolinite	I
Gibbsite	F
Goethite	TTF
Quartz	F
Anatase	TTF
Pseudorutile	I
Maghémite	TTF
Hématite	I

Source : Laboratoire des mines d'Ampandrianomby

I : Raies intenses

F : Raies de faible intensité

TI : Raies très intenses

TF : Raies très faible intensité

TTI : Raies très très intenses

TTF : Raies très très faible intensité

La latérite d’Alakamisy contient essentiellement de la Kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$, beaucoup de gibbsite, une grande quantité d’oxydes et hydroxydes de Fer sous différentes formes comme la Maghémite Fe_2O_3 la Goethite $\alpha\text{-Fe}+3O(OH)$ et l’Hématite Fe_2O_3 et une quantité notable d’oxydes de titane sous forme d’Anatase et de Pseudorutile. Le quartz se trouve en petites quantités. L’analyse chimique élémentaire effectuée montre que l’échantillon est un sol ferralitique.

Identification granulométrique du sol

L’essai consiste à classer les différents grains constituant l’échantillon en utilisant une série de tamis, emboîtés les uns sur les autres, dont les dimensions des ouvertures sont décroissantes du haut vers le bas selon les normes NF P18-560 (AFNOR, 1978) et NF P94-057 (AFNOR, 1992).

D’après l’analyse granulométrique, les dimensions des particules ne varient presque pas significativement, l’échantillon est riche en particules fines (argile $D<2\mu m$, limon $2\mu m<D<50\mu m$ et fines $D<50\mu m$). Le pourcentage du tamisat à 0,080 mm fait ressortir les points suivants :

- les échantillons de latérite appartiennent tous à la classe des sols fins ;
- les échantillons appartiennent au domaine du limon et de l’argile.

Les limites d’Atterberg

Les limites d’Atterberg sont obtenues à partir des essais de détermination de la limite de liquidité et de la limite de plasticité conformément aux normes « NF P 94 – 051, Octobre 1993 » (AFNOR., 1993). Les résultats obtenus sont présentés dans le Tableau 2:

Tableau 2 : Limites d’Atterberg de la latérite

Teneur en eau naturelle W%	31 ,6
Limite de liquidité $w_L(\%)$	77 ,6
Limite de plasticité $w_p(\%)$	48,6
Indice de plasticité $I_p(\%)$	29
Indice de consistance $I_c(\%)$	1,6

Les résultats du Tableau 2 montrent que l’échantillon est classé dans le domaine de l’argile plastique [14] comme le confirme le résultat d’indice de plasticité de l’échantillon : $I_p> 17$ c’est donc un sol de type argile, plus précisément classé dans le domaine d’argile plastique.

L’essai au bleu de méthylène

L’essai au bleu de méthylène a été effectué pour déterminer l’activité de l’argile dans l’échantillon de sol. Elle représente la quantité de bleu pouvant être adsorbée sur les surfaces internes et externes des particules du sol.

Les résultats de l’analyse ont montré que la valeur de bleu (VBS) 1,2 se situe entre 0,2 et 2,5 ; ce qui signifie que cet échantillon est un sol limoneux peu plastique et sensible à l’eau selon la norme NF P 94-068 [15].

La compressibilité

L’objectif de l’essai était est de chercher trouver la teneur en eau optimale du sol par l’essai Proctor qui correspondant à une masse volumique sèche maximale de 1,6 (T/m³).

Les résultats de l’essai Proctor de l’échantillon de latérite sont donnés par le Tableau 3.

Tableau 3 : Références optimales Proctor et teneur en eau naturelle de l’échantillon

Masse volumique sèche maximale	1,6 T/m ³
Teneur en eau optimale	23,3%
Teneur en eau naturelle	31,6%

Les résultats ont montrés que ces échantillons de sol sont de bonne qualité pour la construction d’ouvrages ou de matériaux en terre compactée, c’est-à-dire la teneur en eau naturelle est supérieure à la teneur en eau optimale, selon les normes NF P 18-406 (FOSTER, 1981)

Obtention de purin

Dans le domaine de la construction, le choix du purin ont a un effet significatif dans la résistance dues sols. Il contient des matières organiques très fines susceptibles de s’insérer entre les particules du sol et de former des agrégats (FOSTER, 1981). Cette matière organique soluble est facilement décomposable par les microorganismes du sol qui acidifie le milieu en font des acides (MEEK et *al.*, 1979). Les minéraux du purin sont solubles en majeure partie.

Le purin de bœuf a été collecté au niveau des abattoirs d’un fermier. Seul le filtrat liquide purin a été récupéré pour servir de stabilisant.

Préparation du sable

Le sable a été prélevé au niveau de la rivière. Il a été utilisé pour la correction granulométrique des latérites qui ont une granulométrie fine et serrée. Les fractions comprises entre 0,08mm et 2mm ont été récupérées.

Préparation de l'eau

L'expérience a été réalisée avec une eau de puits exempte de produit chimique (sans traitement physico-chimique) pour éviter l'inhibition des activités bactériennes par les microorganismes présents dans les latérites. La profondeur et le type de puits ont été visés en particulier dans la réalisation

Composition du mélange

La proportion de stabilisant dans le mélange Terre-stabilisant a été augmentée progressivement. L'étude s'est alors basée sur les variétés des nutriments utilisés (allant de 5% à 20% en masse du mélange), le pourcentage des additifs utilisés avec le purin a été augmenté petit à petit afin d'évaluer leurs influences et obtenir un matériau capable d'avoir une meilleure résistance et de bons comportements face aux diverses sollicitations.

Dosage des matières premières

En faisant varier les dosages de purin de 5%, 10%, 15% et 20%, l'objectif de ces différents essais d'expérimentation a été est de trouver chercher les doses optimales pour la stabilisation du sol.

Détermination des caractéristiques des terres stabilisées

Les performances des produits stabilisés sont évaluées par la détermination de :

- la porosité ;
- la résistance à la compression à l'état sec et à l'état humide, par le biais de l'essai de compression simple.

Procédé de fabrication

Le schéma du procédé de fabrication de la brique de terre comprimée est décrit afin de bien comprendre les différentes étapes du processus de stabilisation de la latérite et de fabrication des BTC suivies lors des expérimentations.

Ce processus comprend :

- l'extraction et la préparation de la latérite ;
- la préparation de l'agent de stabilisation ;
- le dosage et mélange des constituants ;

- le malaxage du mélange en présence d'eau ;
- le moulage et compactage ;
- le démoulage ;
- le séchage et la prise ;
- le stockage.

La Figure 2 résume le schéma méthodologique.

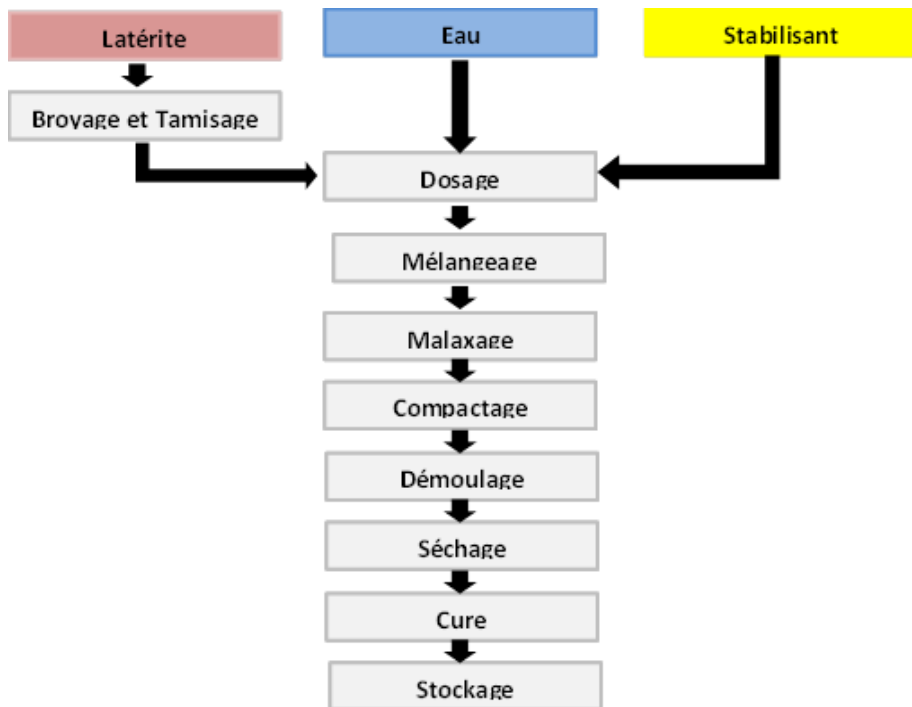


Figure 2 : Processus de fabrication des BTC

RESULTATS

Influence de l'ajout de purin, du sable et du sucre sur les briquettes

Les essais ont été effectués pour observer les résultats obtenus pour chaque variante. Les variantes adoptées sont :

- le témoin (sans agent de stabilisation) – noté : Témoin ;
- le mélange latérite + purin – noté : BCP ;
- le mélange latérite + purin + sable 5% - noté BCPSa5 ;
- le mélange latérite + purin + sable 5% + sucre 5% - noté BCPSa5S5.

Résistance à la compression à l'état sec « Témoin, BCP, BCPSa5, BCPSa5S5 »

Ces essais ont été effectués pour vérifier la différence des résultats obtenus pour l'un, le témoin, et les autres, avec les trois types de liants « purin », « purin +sable5% » et « purin +sable5% +sucre5% ». Les courbes de la résistance à la compression à l'état sec sont présentées sur la Figure 3.

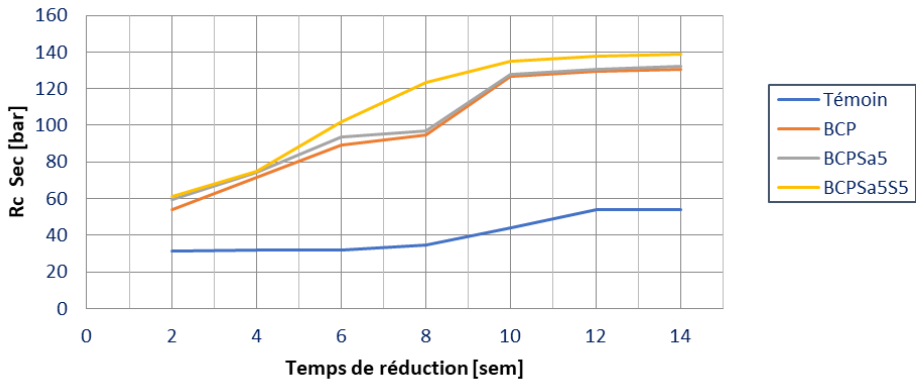


Figure 3 : Evolution de la résistance Rc sur les échantillons secs en fonction du temps

Les résultats du premier essai ont été obtenus sans purin « témoin » : de la 2ème à la 8ème semaine, aucune évolution de la résistance mécanique n’a été relevée. Au fil du temps, la résistance augmente légèrement pour se stabiliser à partir de la 12ème semaine.

L’ajout de purin aux échantillons (BCP) accroît tous les paramètres de consistance (les densifications des micro-organismes réducteurs du fer ferrique), et une augmentation de la résistance mécanique c'est-à- dire augmentation de l’activité microbienne et par conséquent une importante activation croissante de la réduction du Fer.

L’addition de 5% de sable à l’échantillon au purin (BCPSa5) n’apporte pas beaucoup de changement sur le comportement du sol.

Enfin, l’addition du sucre 5% au mélange de BCPSa5 entraîne une très nette augmentation de la résistance à la compression à l’état sec.

Résistance à la compression à l'état humide « Témoin, BCP, BCPSa5, PCPSa5S5 »

Les essais ont été effectués pour vérifier la différence des résultats obtenus, pour le témoin et les autres avec les trois types de liants « purin », « purin +sable5% » et « purin +sable5% +sucre5% ». La Figure 4 montre les courbes de la résistance à la compression à l’état humide.

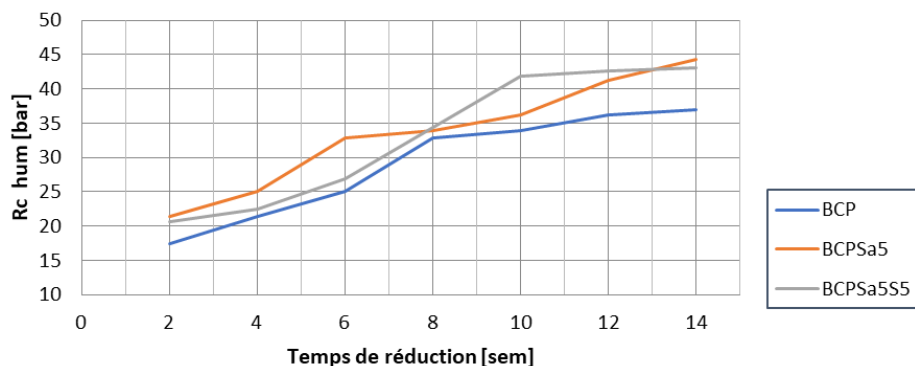


Figure 4 : Evolution de la résistance Rc à l'état humide en fonction de temps

Aucun résultat n'a été obtenu avec le témoin car l'éprouvette s'est désagrégée lors du traitement d'immersion de 24h dans l'eau.

Il apparaît que les trois courbes des blocs de terre comprimés stabilisés avec du purin, sont croissantes d'une manière continue, avec un taux de croissance assez faible de 1,67 bar/semaine. Cela signifie que la stabilisation avec le purin peut améliorer la résistance à l'eau des BTC.

Porosité « BCP, BCPSa5, BCPSa5S5 »

Les essais ont été effectués pour vérifier la différence des résultats obtenus pour le témoin et les autres avec les trois types des liants « purin », « purin + sable5% » et « purin + sable5% + sucre5% ». La figure 5 évoque les courbes de porosité.

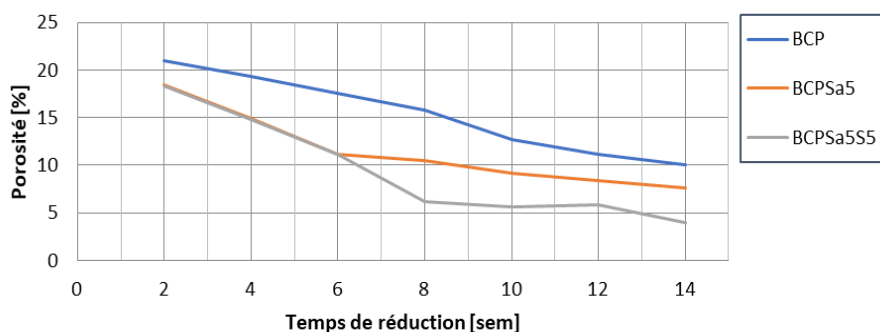


Figure 5 : Evolution de la porosité en fonction du temps de réduction

Le taux de porosité des 3 échantillons testés présente une allure générale décroissante jusqu'à la 8ème semaine pour enfin se stabiliser à un taux inférieur à 10%. Cela traduit une réduction progressive de la taille des pores. L'ajout de sucre à 5% a amélioré la compacité des éprouvettes.

Détermination de la dose optimale de sucre

Il est apparu que la saturation de purin favorise le développement rapide des microorganismes dans le sol. Ceci s'explique par le caractère fortement réducteur du sucre ainsi que sa capacité à former des liaisons chimiques par la présence de chaînes carbonées, il pourrait apporter une amélioration nette des résultats obtenus avec le purin.

A des échantillons à purin, des ajouts de 5%, 10% et 15% de sucre ont été testés dans le but de déterminer la dose optimale qui permettrait d'améliorer l'efficacité du purin.

Résistance à la compression à l'état sec et dose de sucre

Les essais ont été effectués pour vérifier la différence des résultats obtenus. Des ajouts de 5%, 10% et 15% de sucre ont été testés dans le but de déterminer la dose optimale du sucre dans le mélange (BCPSa5).

Les courbes de la résistance à la compression à l'état sec sont présentées sur la Figure 6.

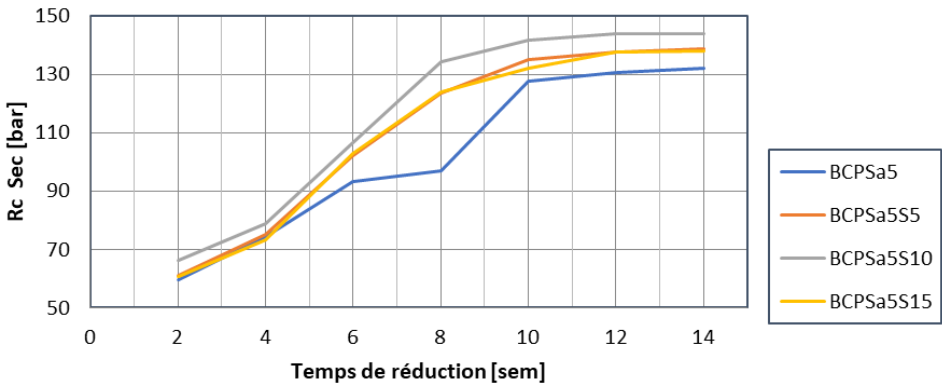


Figure 6 : Evolution de la résistance Rc à l'état sec en fonction du temps et du taux de sucre

L'effet des additions de sucre a été mis en évidence par l'augmentation de la résistance. Toutefois la quantité de sucre a été limitée à 10%, car une dose de 15% n'entraîne pas une augmentation supplémentaire mais s'est par contre traduite par une baisse de la résistance.

Résistance à la compression à l'état humide et dose de sucre

Les essais ont été effectués pour vérifier la différence des résultats obtenus. Des ajouts de 5%, 10% et 15% de sucre ont été réalisés dans le but de déterminer la dose

optimale de sucre dans le mélange (BCPSa5).Les courbes de la résistance à la compression à l'état humide sont présentées sur la Figure 7.

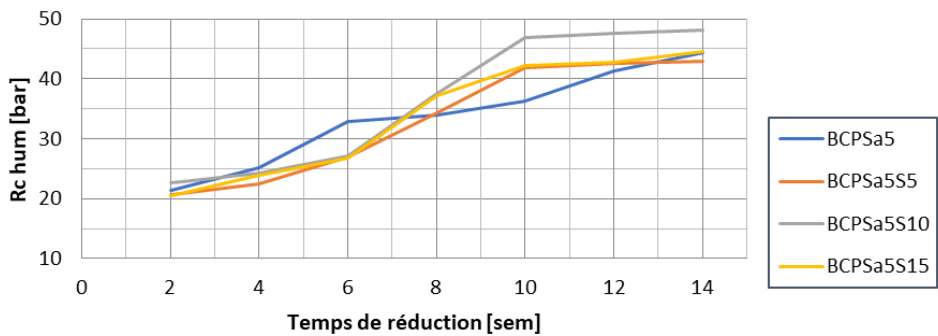


Figure 7 : Evolution de la résistance R_c à l'état humide en fonction du temps et du taux de sucre

La résistance en compression à l'état humide de la latérite saturée a été mesurée avec le purin, avec additions de doses croissantes en sucre.

Les courbes obtenues mettent encore en évidence les mêmes processus de durcissement liés à des additions de teneurs croissantes en sucre, relatifs à l'activité microbienne, constatée dans le cas d'échantillons secs de même composition : la dose optimale de sucre est de 10 %.

Porosité et dose de sucre

A des échantillons à purin, des ajouts de 5%, 10% et 15% de sucre ont été testés dans le but de déterminer la dose optimale efficace du purin. La Figure 8 montre les courbes de la porosité.

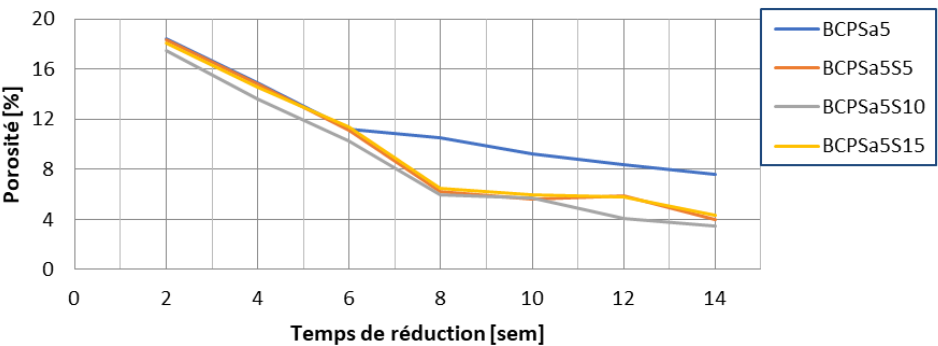


Figure 8 : Evolution de la porosité en fonction de temps et du taux de sucre

La décroissance des courbes à partir de la 2^{ème} semaine jusqu'à la 8^{ème} semaine est normale sur le plan de la cinétique de l'activité microbienne et du processus de réduction qui s'ensuit. Cet essai confirme le taux optimal de sucre à 10% auquel correspond la porosité minimale quel que soit le temps de réduction.

Etude de l'influence de l'addition d'urée

Ces essais ont pour objectif d'étudier l'efficacité de l'urée sur l'amélioration de l'activité microbienne, et de vérifier si le meilleur mélange a besoin de matière azotée (élément principal d'urée).

A partir de la composition qui a donné les meilleurs effets « avec l'addition de sucre (BCPSa5S10) », l'expérimentation s'est élargie à des tests sur les effets d'ajout d'urée. L'addition à cette composition de 5% et 10% d'urée a permis d'obtenir les échantillons respectifs BCPSa5S10U5 et BCPSa5S10U10.

Influence de l'addition d'urée sur la résistance à l'état sec

A l'échantillon BCPSa5S10, des ajouts de 5%, 10% et 15% d'urée ont été testés dans le but de déterminer l'efficacité du mélange. Les courbes de la résistance à l'état sec sont présentées sur la Figure 9.

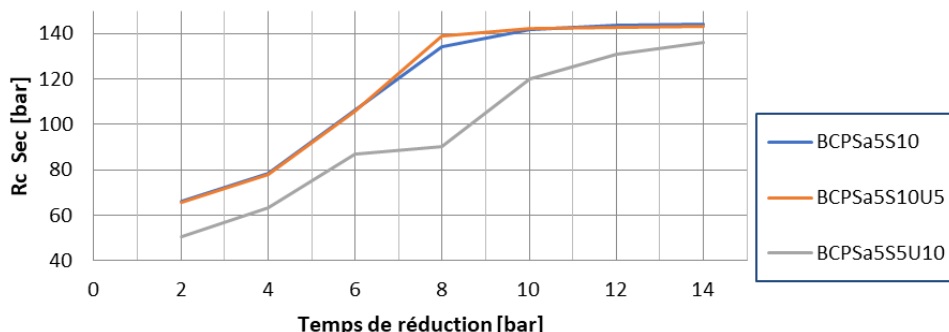


Figure 9 : Evolution de la résistance R_c à l'état sec en fonction du temps et de la quantité d'urée

L'identité parfaite des allures des courbes de l'échantillon de départ et de celui avec 5% d'urée a été obtenue. L'addition de 10% d'urée provoque un effet contraire aux attentes. Un affaiblissement très net de la résistance mécanique de la latérite a été observé.

Influence de l'addition d'urée sur la résistance à l'état humide

A l'échantillon BCPSa5S10, des ajouts de 5%, 10% et 15% d'urée ont été testés dans le but de déterminer l'efficacité du mélange. La Figure 10 montre les courbes de la résistance à l'état humide.

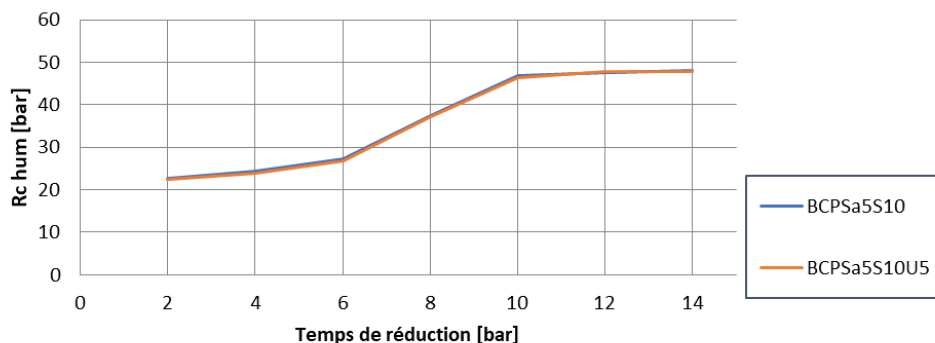


Figure 10 : Evolution de la résistance R_c à l'état humide en fonction du temps et de la quantité d'urée

La valeur de la résistance à la compression humide avec l'urée 10% n'est pas obtenue car l'éprouvette s'est désagrégée. L'utilisation de fort dosage en urée est néfaste.

Cet essai confirme que l'addition de 5% d'urée est sans influence notable sur l'activité de la réduction microbienne : leurs courbes se superposent (Figure10).

Influence de l'addition d'urée sur la Porosité

A des échantillons (BCPSa5S10), des ajouts de 5%, 10% et 15% d'urée ont été testés dans le but de déterminer l'efficacité du mélange. La Figure 11 présente les courbes de la porosité.

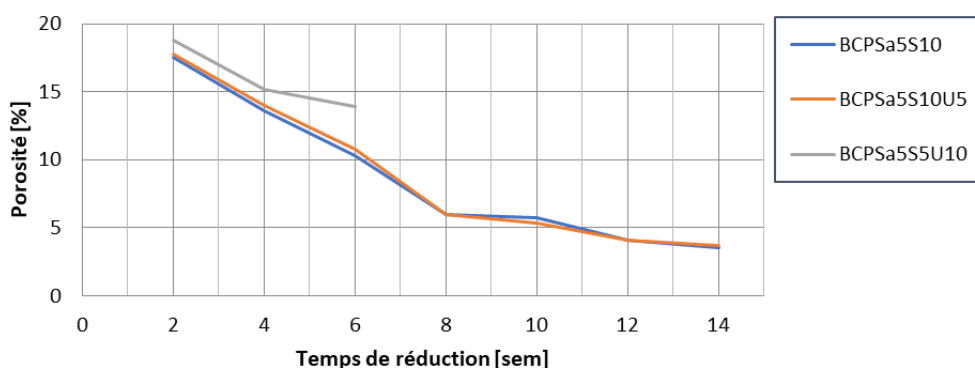


Figure 11 : Evolution du taux de porosité en fonction du temps et de la quantité d'urée

Il a été constaté avec les résistances mécaniques que :

- Les deux échantillons, sans urée et avec une faible teneur en urée (5%), ont eu le même comportement ;

- L'addition de 10% d'urée a provoqué un ralentissement de l'activité microbienne et peut-être aussi un relâchement au niveau de la structure du BTC.

DISCUSSIONS

Discussions des résultats sur l'utilisation du purin de bœuf

L'ajout jusqu'à saturation de purin aux échantillons, augmente tous les paramètres de consistance. Cela est dû au fait que la présence de purin apporte des nutriments supplémentaires aux microorganismes ferro-réducteurs du sol dans le milieu. Il assure la multiplication rapide des microorganismes.

Les conséquences au niveau des propriétés des BTC ont été une densification des structures moléculaires du sol (apport de chaînes carbonées, et surtout obstructions par voie chimique des interstices inter granulaires du sol) et donc une source de stabilisation supplémentaire de la terre latéritique en plus du compactage. Ceci s'est traduit par une nette augmentation de la résistance à la compression aussi bien à l'état sec qu'à l'état humide, ainsi que de la compacité des BTC. Les BTC ainsi obtenus ont des résistances mécaniques plus élevées et sont donc plus résistants à l'eau, principal ennemi des constructions en terre.

Discussions des résultats sur l'utilisation du sable

Au niveau de la résistance, le sable étant un constituant inerte, l'addition de 5% de sable n'a pas apporté beaucoup de changement sur le comportement du sol lié à l'action du purin.

L'ajout du sable, nécessaire pour corriger la granulométrie du sol, peut abaisser son indice de plasticité. Ceci se traduit par une diminution nette de la porosité du sol dans la structure du BTC et par conséquent de sa résistance à l'eau.

Discussions des résultats sur l'utilisation du sucre

Dans un essai préliminaire, il a été vérifié que l'addition de sucre améliore nettement les propriétés des BTC, au niveau des résistances mécaniques à l'état sec et humide et de la porosité. Un second essai a permis de déterminer la quantité optimale de sucre à ajouter, qui est de 10%.

Les effets des additions de sucre ont été mis en évidence par l'augmentation de la résistance et de la compacité du sol. Les effets de l'amélioration du durcissement et de la compacité par ajouts de sucre, sont liés par la mise à disposition de quantités croissantes de nutriments pour les microorganismes ferro-réducteurs, et qui permettent une multiplication de plus en plus importante. La conséquence de cette multiplication est l'intensification plus importante de la réduction microbienne du Fer du sol.

Les ajouts de quantités croissantes de sucre renforcent l'action du purin matérialisée par une importante réduction de la porosité du sol étudié (une réduction de 6%), par la précipitation des ions Fe^{III} (Fe_2O_3) en solution sous forme de composés ferreux peu solubles. Cela se traduit par une densification de la structure des BTC donc de sa résistance mécanique et permet aussi d'annihiler la possibilité de pénétration de l'eau dans les pores.

La teneur optimale en sucre est de 10%, c'est-à-dire que pour cette proportion, la quantité de nutriments supplémentaires nécessaires pour les microorganismes a été atteinte. Tout apport de sucre supplémentaire à ce taux est inutile et conduit au ralentissement et même à l'arrêt de l'activité microbienne. De toute manière, l'utilisation d'importantes quantités de sucre est antiéconomique car c'est une denrée alimentaire.

Enfin, avec l'utilisation simultanée du purin et du sucre, la période de 8 semaines est convenable comme temps de maturation de la réduction microbienne. Il faut noter qu'à partir de la 10ème semaine les comportements des BTC commencent à se stabiliser : c'est la limite des performances des liants étudiés.

Discussions des résultats sur l'utilisation de l'urée

L'analyse de toutes les courbes obtenues de la résistance à l'état sec, a permis de dire que la matière azotée n'a pas d'effet sur le durcissement de la latérite. L'addition d'une quantité d'urée supérieure à 5% provoque un effet contraire à ce qu'il a été attendu, le résultat montre un affaiblissement de la résistance mécanique des BTC. Cela est dû au fait que les microorganismes réducteurs du Fer ferrique en Fer ferreux n'avaient besoin que des matières hydrocarbonées pour se développer. L'addition d'une importante quantité d'urée a limitée et a diminuée grandement l'activité des microorganismes. A ce phénomène s'est ajoutée la grande capacité de rétention d'eau de cet engrais qui a rendu les mélanges vulnérables.

La quantité d'eau absorbée, introduite par l'urée a provoqué le relâchement des liaisons et l'élargissement des pores et des vides dans la structure des BTC entraînant ainsi le ramollissement total des matériaux testés.

CONCLUSION

En guise de conclusion, la latérite est l'une des matières premières la plus répandue à Madagascar et sa valorisation est possible en tant que matériau de construction, mais ses performances dépendent de l'efficacité des traitements qu'on lui fait subir.

Dans cette recherche, une méthode de stabilisation des latérites par le purin de bœufs avec des additifs comme le sucre et l'urée, a été développée.

Les études ont été menées sur une latérite en provenance d'Alakamisy Fenoarivo, relativement représentative des latérites des Hautes Terres Centrales malgaches. Il a été nécessaire de corriger la très faible granulométrie des échantillons par l'addition de 5% de sable.

La stabilisation de la latérite par le purin de bœuf additionné de 5% de sable et de 10% de sucre a permis d'obtenir le meilleur BTC (Bloc de Terre Compacté) BCPSa5S10. Le BTC obtenu présente des résistances mécaniques à l'état sec et humide qui peut concurrencer celles des autres types de matériaux de même famille.

Le temps du traitement optimal est d'environ 10 semaines, mais les BTC peuvent déjà être utilisés dans les meilleures conditions à partir de la 8ème semaine.

Cette méthode de fabrication de BTC est rentable sur le plan technico-économique et aussi plus respectueuse de l'environnement par l'utilisation de stabilisant naturel.

L'expérimentation d'autres agents de stabilisation naturels comme les feuilles et tiges de patate douce et les feuilles et le tronc de bananier feront l'objet d'autres articles.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) AFNOR (1978), NF P18-560. Analyse granulométrique par tamisage, Octobre 1978.
- 2) AFNOR (1981) NF P 18-406, Essai de compression. Décembre 1981.
- 3) AFNOR (1992), NF P94-057. Analyse granulométrique des sols. Méthode par sédimentation, Mai 1992.
- 4) AFNOR (1993), NF P94-051. Détermination des limites d'Atterberg, Mars 1993.
- 5) AFNOR (1993), NF P 94-068. Essai au bleu de méthylène, Novembre 1993.
- 6) Autret, Paul, (1983). Latéritiques et Graveleux latéritique, Tome 2, p.37, 2è tirage.
- 7) Dreyfus, (1952), Les latérites, généralités, leur utilisation en technique routière, RGA N°215.
- 8) La Croix, A., (1995), « Minéralogie de Madagascar ». Thèse de Doctorat 3ème cycle en Chimie minérale. Faculté des Sciences.
- 9) Messi A., (1984). Valorisation de la latérite du Gabon comme matériau de construction économique, Mémoire DEA INS de Lyon.
- 10) Nambavelo, Dyno, (2014). Contribution à l'étude de la valorisation de latérite par le purin de bœuf additionné des engrais, azote et du sucre, DEA Chimie minérale.

- 11) Parez, Louis et Schlosser, François (1998) – Essais de Reconnaissances des sols : Tome 1, 2è tirage, Paris : AFNOR, 446 pages.
- 12) Raharinierana, Hantaniaina, (2003). Contribution à la valorisation de la latérite, Caractéristiques et utilisations des latérites des environs d'Antananarivo, DEA Science des Matériaux.
- 13) Ramaroson, Jean de Dieu, (2018). Etude de la stabilisation de la latérite par les micro-organismes, cas de la latérite Vontovorona. HDR Génie des matériaux.
- 14) Razafimandimby, A. (1985), Contribution à l'étude de quelques échantillons d'argiles Malgaches d'intérêt économique. Thèse de Doctorat d'État Es-sciences.
- 15) Riquier, J. Latérite et latéritisation à Madagascar. Pédologue de l'I.R.S.M. 3ème congrès de l'ASPOI. Université d'Antananarivo.

ESSAI DE MINÉRALISATION DU CLINKER PAR LE SULFOGYPSE ET LE VERRE

par

RAZAFINDRAMANGA Athou Wega⁽¹⁾, RAZANAJATOVO Harinivo O.⁽¹⁾
HERINIAINA Elysé T.⁽¹⁾, ALFA Mananirina H.⁽¹⁾, ROBIJAONA R. Baholy⁽²⁾

(1) Ecole Doctorale Génie des Procédés, des Systèmes Industriels, Agricoles et Alimentaires, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Professeur Agrégé Titulaire, Ecole Doctorale Génie des Procédés, des Systèmes Industriels, Agricoles et Alimentaires, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Depuis la découverte du ciment Portland, le monde de la construction ne cesse d'évoluer. Madagascar a aussi participé à cet élan dans la fabrication du clinker comme matière principale du ciment par sa large ressource minière. Mais la carrière de cipolin devient de plus en plus hétérogène et cela influe la qualité du clinker. Par le respect de l'environnement en gérant l'exploitation de la carrière et pour améliorer ce souci de qualité, des recherches sur la minéralisation du clinker ont été lancées. Plusieurs études ont prouvé que la minéralisation du clinker avec divers matériaux améliore la qualité du ciment. De plus, la valorisation de ces matériaux contribuera à la transformation utile de nos déchets industriels comme le verre et le sulfogypse. Des essais sur la minéralisation avec le verre nous ont démontré que la qualité du clinker s'améliore avec un gain d'énergie par sa propriété fondante au contact de la chaleur. La consommation des roches calcaires à faible taux de facteur en saturation en chaux a été possible grâce à l'utilisation de sulfogypse comme minéralisateur. Pour ne pas abandonner ces deux déchets dans la nature, nous avons alors optimisé notre recherche en les combinant. Les résultats ont donné qu'à proportion égale, le taux des minéraux alite dans le clinker a augmenté même avec l'utilisation des roches à faible taux de carbonate de calcium tout en gagnant toujours de l'énergie.

Mots clés : Calcaire, Clinker, Déchets, Energie, Minéralisateur, Sulfogypse, Verre.

ABSTRACT

Since the discovery of Portland cement, the world of construction does not cease evolving. Madagascar also took part in this dash in the manufacture of the clinker like principal matter of cement by its broad mining resource. But the career of cipolin becomes increasingly heterogeneous and that influences the quality of the clinker. By

the respect of the environment by managing the exploitation of the career and to improve this concern of quality, of research on the mineralization of the clinker were launched. Several studies already proved that the mineralisation of the clinker with various materials improves quality of cement. The valorization of these materials will also contribute to the useful transformation of our industrial waste like glass and the sulfogypse. Tests on mineralisation with glass showed us that the quality of the clinker improves with a profit of energy by its melting property in contact with heat. The consumption of the rocks limestones with rate of factor in lime saturation was possible thanks to the use of sulfogypse as mineralisator. Not to give up these two wastes in nature, we then optimized our research by combining both of them. The results gave that with equal proportion of these mineralisators, the rate of minerals confines to bed in the clinker increased even with the use of the rocks with carbonate rate of calcium while always gaining energy.

Keywords : Clinker, Energy, Glass, Limestone, Mineralisator, Sulfogypse, Waste.

INTRODUCTION

Le ciment Portland représente le matériau le plus innovant dans le monde de la construction. Sa production atteint les 4.6 milliards de tonnes environ par an (Le Planetoscope, 2018). La considération de la qualité reste encore un champ assez vaste méritant beaucoup plus d'attention. La qualité du ciment dépend de celle du clinker qui est représentée par la phase minéralogique majoritaire : l'alite (C_3S). Pour cela, la pratique de la minéralisation va jouer un rôle très important. C'est une étude visant à l'amélioration de la cuisson du clinker (Bouregaya, 2018) tout en baissant la température de clinkérisation. Dans des recherches antérieures (Razafindramanga et al., 2019), le sulfogypse ou un des types de gypses synthétiques (Dinesh et al., 2019) formant à partir de la désulfuration des fumées et les débris de verre ont été prouvés comme étant des minéralisateurs performants sous certaines conditions. L'ajout de ces minéraux dans le mélange « cru » va améliorer les réactions de clinkérisation. Ils interviennent dans la décarbonatation, renforcent la formation de l'alite et les phases fondantes, traduisant la qualité du clinker produit (Bouregaya, 2018). Il faut tout de même considérer que chaque minéralisateur possède leur propre caractéristique et leur propre composition chimique qui influencera leur réactivité dans le mélange. D'autre part, la qualité de la farine « crue » à minéraliser joue aussi un rôle très important durant ces réactions. De plus, pour le cas de la cimenterie d'Ibity, la qualité de cette farine est presque hétérogène et difficile à gérer. Ainsi, pour que ces minéralisateurs réagissent bien dans la fusion du clinker, l'établissement de quelques paramètres est requis.

En effet, pour trouver les efficacités de ces matières, nous allons donc aborder dans cette étude, une comparaison entre le gypse naturel et le gypse synthétique afin

de voir en premier lieu ses propres réactivités. Ensuite, nous élaborons les réactivités de ces deux différents types de gypse combinés avec le verre.

MATERIELS ET METHODES

Notre recherche s’est focalisée sur l’une des manières pouvant rétablir les soucis de qualité par l’application de la minéralisation du clinker. Plusieurs essais ont été effectués prouvant les efficacités du verre et des sulfogypses comme étant les meilleurs minéralisateurs avec chacun leur propre condition de réactivité. Dans la suite de nos expériences, nous allons alors combiner ces minéralisateurs en recherchant en même temps les meilleurs paramètres permettant leur réactivité dans le mélange. Mais en plus de cela, nous allons détecter la différence des réactivités entre le gypse synthétique et le gypse naturel.

Dans cette étude, nous avons toujours utilisé les mêmes indicateurs de performance afin de déterminer les influences engendrées par ces minéralisateurs dans le mélange de la farine « cru » : le taux de C₃S traduisant la qualité du clinker proprement dite, la teneur de la chaux libre (CaOL) qui détermine la qualité de la cuisson (Bouregaya, 2018), et le facteur de saturation en chaux FSC montrant ces principaux constituants dans le mélange.

Remarquant que les méthodes d’analyse restent les mêmes suivant les directives similaires énoncées dans les travaux de Bouregaya en 2018. Mais dans notre cas, nous nous sommes focalisées seulement sur le témoin avec un facteur de saturation en chaux plus faible que nous avons appelé témoin « a » (Tableau 1).

Tableau 1 : Composition chimique de la farine crue témoin « a »

Identité	PAF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	FSC
Témoin "a"	41,68	22,18	5,32	4,50	64,73	1,37	0,93	90,78

D’après les essais antérieurs, nous avons pu découvrir qu’en réduisant la température de clinkerisation à 1350°C, nous pouvons optimiser la performance du clinker minéralisé. Ainsi, nous avons fixé ces deux paramètres tout au long de la suite de nos essais. Mais avant de rentrer dans les essais, il nous est toujours primordial de tenir compte des compositions chimiques de toutes les matières qui ont été utilisées tout au long de l’étude.

Le Tableau 2 nous donne les compositions chimiques des minéralisateurs utilisés.

Tableau 2 : Compositions chimiques de minéralisateurs utilisées durant les essais

Identité	PAF	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
GI	30,15	3,89	0,54	0,11	31,81	1,65	40,7
1034	28,88	3,5	10,11	2,18	23,4	0	36,06
VERRE	0	68,48	1,75	0,33	13,72	1,09	-

Une seule méthode a été utilisé pour les deux essais, dont les comme détaillée en plusieurs étapes sont détaillées comme suit :

L'échantillonnage comportant le choix et la préparation des matières à utiliser durant tous les expériences (témoins et minéralisateurs).

La formulation qui consiste à choisir le taux d'ajout de chaque minéralisateur à mélanger pour constituer un échantillon et le choix du témoin (témoin « a »).

La clinkerisation qui est l'essai proprement dite. Cela consiste à introduire ces échantillons préparés dans un four à moufle à 1350°C (la température fixe choisie) pendant 45 minutes (Razafindramanga et *al.*, 2019).

Les analyses comportant l'étape de la préparation du clinker par le broyage, puis la détermination du CaOL par voie humide et la confection des perles représentant chaque échantillon pour la détermination de leurs compositions chimiques à l'aide de la machine X-Ray (Razafindramanga et *al.*, 2019).

RESULTATS

Réactivité du gypse naturel et du gypse synthétique

Nous savons que le sulfogypse 1034 est un gypse synthétique obtenu par un phénomène de désulfuration des fumées. Le Tableau 2 nous évoque aussi que les analyses des compositions chimiques démontrent que le 1034 est voisin du gypse naturel, mais en ayant un surplus du taux d'Al₂O₃. Dans nos anciens essais, nous avons pu découvrir que ce minéralisateur 1034 réagit bien à 4% d'ajout avec le mélange « cru ». Ainsi, nous avons comparé les réactivités de ces deux types de gypses qui sont illustrés dans la Figure 1.

Il est intéressant de noter que nous avons ajouté 1% seulement du gypse import (GI) car en plus d'être une matière naturelle, sa composition chimique nous montre une meilleure qualité que le gypse 1034.

Dans cette première partie, la température de cuisson des mélanges minéralisés est alors maintenue à 1350°C.

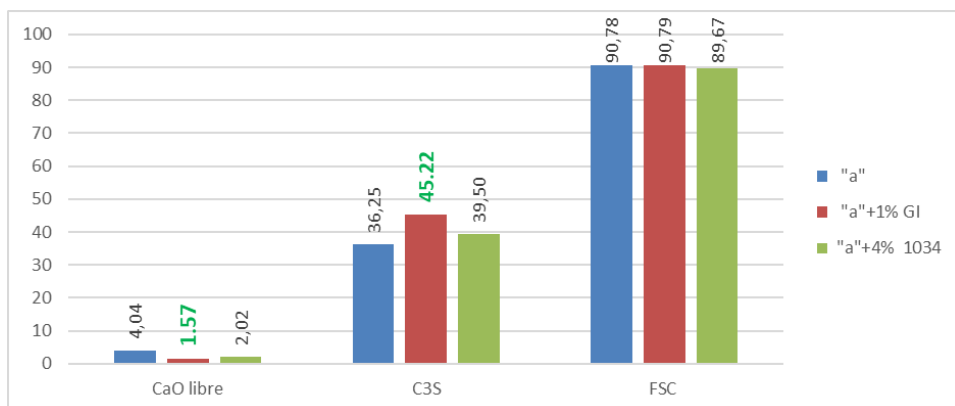


Figure 1 : Réactivité du GI et 1034 avec le témoin « a »

Par la Figure 1, nous pouvons facilement en déduire que même avec un ajout de 1% seulement, le gypse GI arrive à améliorer la qualité du mélange « cru » avec un FSC faible. Le taux de l'alite a ainsi augmenté de 45,22% avec une réduction importante de la teneur en chaux libre à 1,57%. On remarque aussi que le 1034 est un minéralisateur efficace car il a pu réduire le taux de chaux libre à 2,02% avec un taux de C3S à 39,50%.

Vu la caractéristique chimique de nos minéralisateurs, avec un taux majeur des oxydes de calcium et des SO₃ élevés, la réaction de clinkerisation a été bien réussie (Commission Européenne, 2010) (Kovacs et Molnar, 2003).

Si nous avons remarqué cette énorme baisse du taux de chaux libre, c'est que tous les oxydes de calcium ont presque été combinés avec les autres oxydes avec cette diminution de température de 100°C. Nous savons aussi que la présence des éléments de sulfates dans la composition de ces minéralisateurs est la raison de cette baisse de CaO libre (Kovacs et Molnar 2003).

Mais en comparant ces deux minéralisateurs, nous pouvons dire que le sulfogypse est moins efficace que le gypse import. La réactivité du sulfogypse a été donc interrompue par la présence de ses composants impurs et de quelques métaux (Horkoss, 2017) (Karim et *al.*, 2013). Il lui faudra alors un peu plus de considération dans les environnements des réactions de minéralisation pour bien réagir.

Nous avons donc pu trouver les réactivités des gypses avec le cru à faible FSC. Ensuite, nous avons changé cet environnement pour permettre à ces minéralisateurs la possibilité de mieux réagir.

Influence du verre combiné avec les gypses

Nous avons toujours essayé de trouver les meilleures conditions pour les minéralisateurs de bien réagir avec les minéraux déjà présents dans le mélange «cru»

du témoin. Dans la suite des essais, nous allons donc rajouter du verre à chacun des gypses en proportion égale avec les mêmes conditions de température de clinkerisation qui est à 1350°C.

Nous avons commencé nos essais avec des taux d'ajouts assez importants. En revanche, il faut aussi tenir compte des caractéristiques de notre témoin « a ». En étant un cru à FSC faible, ce mélange cru est alors composé d'une quantité considérable de matières fondantes provenant des aluminates et des oxydes de fer par le Module aluminato-ferrique (AR) qui est défini par la formule suivante (Commission Européenne, 2010) :

$$AR = \frac{Al_2O_3}{Fe_2O_3}$$

C'est la raison pour laquelle l'environnement est très favorable aux éléments minéraux présents dans les gypses pour bien réagir. Nous avons alors rajouté 0,25% du verre et 0,25% du gypse import (GI) pour détecter les améliorations des réactivités de ces minéralisateurs dans cette nouvelle condition.

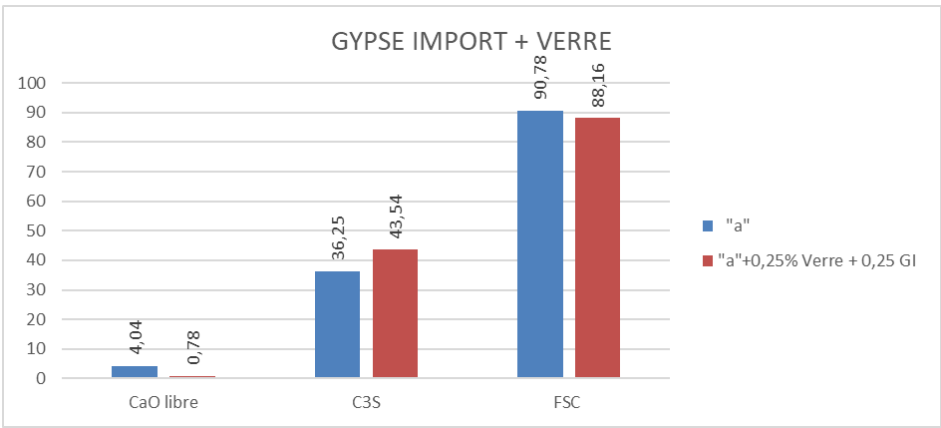


Figure 2 : Réactivité du gypse import ajouté du verre

Sur la Figure 2, nous avons deux minéralisateurs mélangés dans la farine « cru » au lieu d'un seul. Le plus dans cet essai, c'est que ces deux minéralisateurs sont tous deux très réactifs à partir de 1350°C de température de clinkerisation. Ils sont aussi ajoutés à proportion égale dans le mélange.

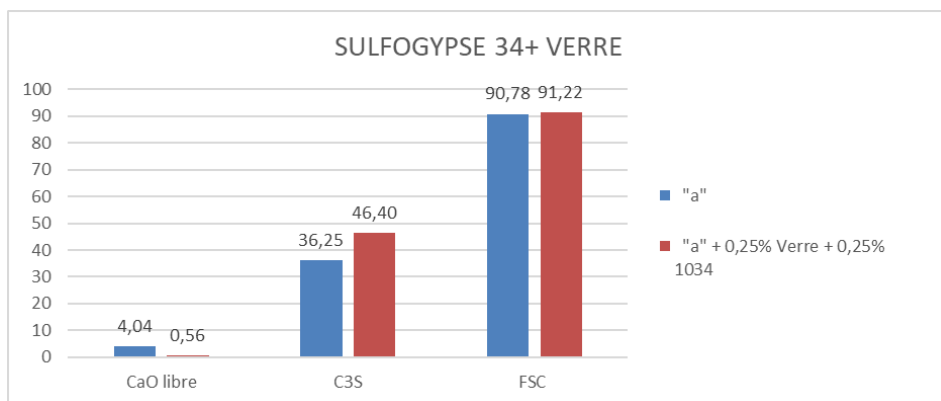


Figure 3 : Réactivité du sulfogypse 34 ajouté du verre

C'est aussi le cas pour le verre et le sulfogypse car nous avons considéré des taux d'ajout égal dans le mélange du cru « a » (Figure 3).

D'après ces deux dernières figures (2 et 3), nous pouvons en déduire l'efficacité de toutes ces combinaisons car leurs taux de C3S ont tous réussi à dépasser ceux du témoin. Même pour le mélange avec le verre, ils ont pu réduire beaucoup plus le taux de la chaux libre du clinker de 4,04 à 2,02% avec le sulfogypse seul et de 4,04 à 0,56% en rajoutant du verre. Ceci nous prouve la réactivité du verre sous l'effet de la température pour favoriser un milieu très fondant et permettant aux oxydes des matières de se combiner (Marinković et *al.*, 2005). Même avec les impuretés du sulfogypse, tous les minéraux présents dans le cru ont bien réagi entre eux sans difficulté avec toutes les conditions réunies (la température de clinkerisation à 1350°C, une forte quantité de CaO et du SO₃ dans le sulfogypse). Il possède un point fort par son taux d'alumine qui est de 10,11% environ (Koukouzas et Vasilatos, 2008)

Quant au mélange de verre et de gypse import, ses effets avec le verre dans le mélange sont aussi pareils que ceux du mélange 1034-Verre car il est même plus pur que le sulfogypse. Mais contrairement aux résultats reçus au tout début, le gypse import mélangé avec du verre en tant que minéralisateur a été remarqué moins efficace.

Pour valoriser alors ces matières de synthèses, il faut tenir compte de ces impuretés qui pourront réagir ou pas dans des conditions choisies. En général, un gypse naturel ne peut contenir plus de 1% de taux d'alumine. Donc, le mélange du verre avec le sulfogypse a favorisé encore plus les milieux fondants dans la réaction de clinkerisation.

CONCLUSION

La minéralisation est une succession de plusieurs réactions durant la formation du clinker. Les minéralisateurs utilisés sont des matières non organiques qui influenceront cette réaction de combustion. Le but recherché dans la minéralisation est alors de créer un environnement favorable aux minéraux des matières premières pour qu'une bonne réaction puisse être formée entre eux. La température de clinkerisation a été diminuée de 100°C grâce à ces minéralisateurs. La qualité du mélange « cru » a été améliorée avec la diminution de la teneur des matières rajoutées. Nous avons alors trouvé les conditions nécessaires pour que le sulfogypse réagisse bien en tant que minéralisateur en le mélangeant avec un peu de verre. La condition qui a poussé le sulfogypse à être meilleur que le gypse import est son taux d'alumine beaucoup plus élevé.

Par rapport au gypse naturel, le gypse synthétique est le plus performant par la présence de ces impuretés riche en minéraux et son taux de sulfate aussi est assez inférieur par rapport au gypse naturel. C'est après sa combinaison avec le verre que le sulfogypse a pu réagir convenablement et a produit 46,40% de l'alite.

Ce qui représentera une meilleure valeur de la résistance à la compression du ciment. Des essais nous permettant de prouver cette qualité du ciment seront à considérer plus tard car d'autres paramètres y seront encore mis en jeu.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Bouregaya, S. (2018). Synthèse d'un ciment alitique à moindre impact environnemental à partir de vase de barrage et utilisant le sulfate de zinc comme minéralisateur. Thèse de Doctorat, Université Paul Sabatier, Toulouse, France, 93p.
- 2) Commission Européenne. (2010). Industries du ciment, de la chaux et de la magnésie, 409p.
- 3) Dinesh, P., Ferguson, R., Maharjan, B., (2019). Flue Gas Desulfurization Gypsum as Soil Amendment. In Soil Amendments for Sustainability. Agronomy & Horticulture - Faculty Publications. Nebraska: University of Nebraska - Lincoln. 16p.
- 4) Horkoss S., (2017). Influence du SO₃ dans le clinker sur la durabilité du béton : Attaque Sulfatique. Presses Académiques Francophones, 108p. ISBN 10 : 93841642969.
- 5) Karim, F., Wakif, M., Saâdi, L. (2013). Caractérisation Physico-Chimique du Gypse Synthétisé et du Phosphogypse, In Verres, Céramiques & Composites 2(2): 19-31. <https://www.asjp.cerist.dz/en/article/4874>.

- 6) Koukouzas, N., Vasilatos, C. (2008). Mineralogical and chemical properties of FGD gypsum from Florina, Greece : Journal of Chemical Technology and Biotechnology 83 : 20–26. <https://doi.org/10.1002/jctb.1770>.
- 7) Kovacs, F., Molnar, J. (2003). Basic Properties of Flue-Gas Desulfurization Gypsum. Acta Montanistica Slovaca 8 (16) – 19. Slovakia : Technical University Of Kosice.
- 8) Le Planetoscope. (2018). La production mondiale du ciment. <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1708-production-mondiale-de-ciment.html/>
- 9) Marinković, S., Kostić-Pulek, A., Logar, V., Trifunović, P. (2005). Recycling of waste FGD gypsum. 7p. 32nd International Conference of SSCHE. Tatranské Matliare, Slovakia.
- 10) Pflughoeft-Hassett, D. F., Hassett, D.J., Eylands, K., (2007). A Comparison of Properties of FGD & Natural Gypsum Products. Agricultural & Industrial Uses of FGD Gypsum Workshop.
- 11) Razafindramanga, A., Ngbolua, K., Bongo, G. N., Rahelivololoniaina, R. B. (2019). Laboratory Testing on the Promotion of Madagascar's Industrial Waste and Natural Materials as Clinker Mineralizers. In *Asian Journal of Geological Research*, N° 49364 2(2) : 1-13.

REEMPLACEMENT DU CIMENT DANS LA FABRICATION DES BETONS DRAINANTS A PARTIR DES MATERIAUX LOCAUX

par

KOERA Rasoloniaina A⁽¹⁾, RATSIMBAZAFY Mikaela H.^(1, 2)
RAKOTOSAONA Rijalalaina⁽³⁾, RANAIVONIARIVO Gabriely V.⁽¹⁾

(1) Mention Science et Ingénierie des Matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Département Matériaux et Génie civil, Centre National de Recherches Industrielles et Technologiques (CNRIT)

(3) Département Génie Chimique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

L'utilisation de matériaux dans la construction est généralement basée sur sa résistance mécanique et sa durabilité. Face à la dégradation de l'environnement, la recherche de nouveaux matériaux moins polluants est fortement encouragée.

Afin de réduire les émissions de gaz à effet de serre, le ciment dont la fabrication est source de grande pollution et consomme beaucoup d'énergie sera remplacé par un nouveau matériau moins polluant dans la production de béton : le liant géopolymère.

La récupération des matières locales est à la base de nos recherches, utilisant la balle de riz et le kaolin comme matières premières. Après calcination des matériaux de base, une solution alcaline est ajoutée pour obtenir le liant géopolymère.

La production de béton est obtenue à l'aide de granulats unidimensionnels 4/8. Pour avoir le caractère drainant, nous nous sommes basés sur la quantité du volume de vide pour obtenir une bonne pénétrabilité de notre nouveau matériau. Les formulations choisies pour la fabrication du béton sont : béton de ciment 100% (témoin) – béton géopolymère 100% métakaolin – béton géopolymère avec cendre de balle de riz et métakaolin à proportions variables.

La composition du béton géopolymère avec 20% de cendre de balle de riz et 80% de métakaolin a donné le meilleur résultat. Pour cette composition, les essais de résistances en compression et à la traction par flexion ont donné respectivement 7,03 MPa et 1,28 MPa, contre 6,03 MPa et 1,31 MPa pour le béton témoin.

Le béton géopolymère peut remplacer le béton ordinaire dans certaines constructions. L'amélioration de ces résultats est encore possible.

Mots clés : Bétons, Cendre, Riz, Drainants, Géopolymères, Kaolin, Alcaline, Solution.

ABSTRACT

The use of materials in construction is generally based on its mechanical strength and durability. In the light of the environment deterioration, the research for a new fewer polluting material is strongly encouraged.

In order to reduce greenhouse gas emissions, the cement, which its manufacturing is a source of great pollution and consumes a lot of energy, will be replaced by a new less polluting material in the production of concrete: the geopolymer binder. The recovery of local materials is the basis of our research, using rice husks and kaolin as raw materials. After calcination, alkaline solution is added to obtain the geopolymer binder.

Concrete production is realized using one-dimensional 4/8 aggregates. To have the draining character, we relied on the amount of the void volume to obtain good penetrability of our new material.

The formulations chosen for the manufacture of concrete are: 100% cement concrete (control) - 100% metakaolin geopolymer concrete - geopolymer concrete with rice husk ash and metakaolin in variable proportions.

The composition of the geopolymer concrete with 20% rice ask hush and 80% of metakaolin gave the best result. For this composition, the mechanical test for compression and flexural strength gave respectively 7.03 MPa and 1.28 MPa, against 6.03 MPa and 1.31 MPa for the control concrete. Geopolymer concrete can replace ordinary concrete in some constructions. Improvement of these results is still possible.

Keywords : Concrete, Rice husk ash, Drainage, Geopolymers, Kaolin, Alkaline, Solution.

INTRODUCTION

D'après Planetoscope (Planetoscope, 2020), 90% de la production des ciments sont utilisés par les pays en développement, comme Madagascar. Cette production engendre beaucoup de déchets dans l'atmosphère, car pour obtenir 1 kg de ciment, il y a dégagement de 1 kg de dioxyde de carbone (sans tenir compte des particules solides émises).

Le ciment reste le matériau de construction le plus utilisé dans le monde. Pour atténuer les effets indésirables liés à l'environnement pendant la production, l'optimisation de l'utilisation des ciments est la base de notre recherche.

Dans son ouvrage, Kabagire K. D. (2013) a démontré l'efficacité de fabriquer des bétons drainants à partir des matériaux usuels. Fabriquer un tel matériau pourra diminuer l'utilisation des ciments, et améliorera l'infiltration de l'eau pour mieux ressourcer la nappe phréatique surtout pendant la saison de pluie. Afin de minimiser

l'utilisation du ciment, la possibilité de fabriquer et d'utiliser un nouveau liant, le géopolymère, pour la production d'un béton drainant sera abordée dans cet ouvrage.

MATERIELS ET METHODES

L'utilisation du béton drainant permet de laisser l'eau de pluie (ou autre) s'infiltrer dans le système de drainage du béton pour ressourcer la nappe phréatique ou pour être stockée grâce à un dispositif installé durant la fabrication des pavements (John T. K., 2011).

En 2012, Ratsimbazafy H. M. a prouvé la possibilité de fabriquer un nouveau liant avec des matériaux locaux, la balle de riz et le kaolin. La balle de riz calcinée donnera une cendre siliceuse très réactive (CBR) qui mélangée avec du métakaolin (MK obtenu également par calcination du kaolin) dans une solution alcaline, donnera le liant géopolymère (Sore et *al.*, 2016).

Les matières premières

Aluminosilicates

Dans l'ouvrage de Ma et *al.* (2018), beaucoup de sortes d'aluminosilicates peuvent être utilisées : les cendres volantes, le laitier, les cendres de bois à haute teneur de silice, les cendres de balle de riz, le métakaolin, etc.

Afin de minimiser les tas de déchets, la récupération des balles de riz sera notre priorité. Par calcination aux environs de 600°C, on obtient des cendres de balle de riz (CBR) très riche en silice. Après broyage, on obtient de la cendre prête à l'emploi. Ci-après un tableau qui montre les résultats de l'analyse chimique de la cendre de balle de riz et sa courbe granulométrique.

Tableau 1 : Composition chimique de la CBR en % pondéral

SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
91,24	0,07	1,34	0,41	0,13	0,21	0,42	0,00	1,80	0,40	3,38

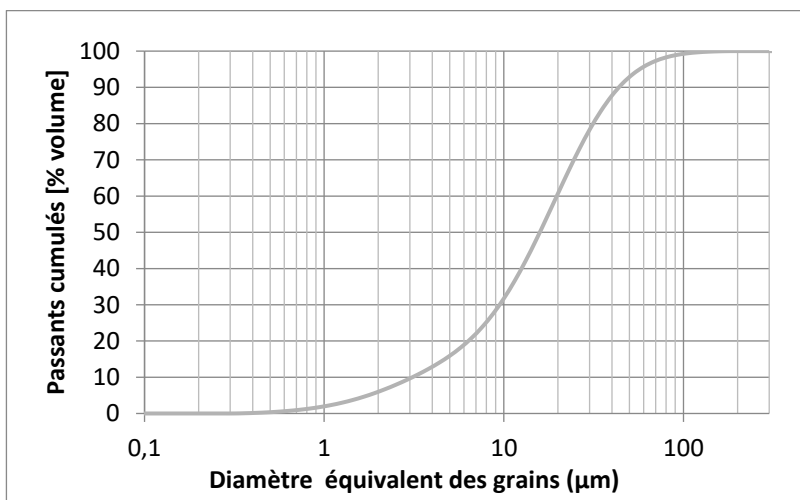


Figure 1 : Courbe granulométrique de la cendre de balle de riz

Le deuxième aluminosilicate utilisé est le métakaolin (MK). On le fabrique à partir du kaolin, très abondant dans la région du Vakinankaratra, calciné aux environs de 700°C, et sera ensuite broyé finement. Les résultats de l'analyse granulométrique et de l'analyse chimique sont donnés ci-dessous :

Solution alcaline

Beaucoup de solutions alcalines peuvent être choisies pour la fabrication des liants géopolymères. Habituellement on utilise l'hydroxyde de sodium (NaOH), l'hydroxyde de potassium (KOH), le silicate de sodium (Na_2SiO_3) et de potassium (K_2SiO_3). La solution d'hydroxyde de sodium a été choisie comme solution alcaline dans notre recherche, grâce à son efficacité et sa disponibilité. Pour la préparation de la solution, de l'eau distillée est utilisée pour obtenir la solution de soude à une concentration molaire de 12 M. L'eau de robinet est utilisée pendant le mélange des matériaux en cas de besoin.

Granulats

Pour la fabrication des bétons, on va utiliser un gravillon quartzite monodimensionnel 4/8. Sa courbe granulométrique est la suivante :

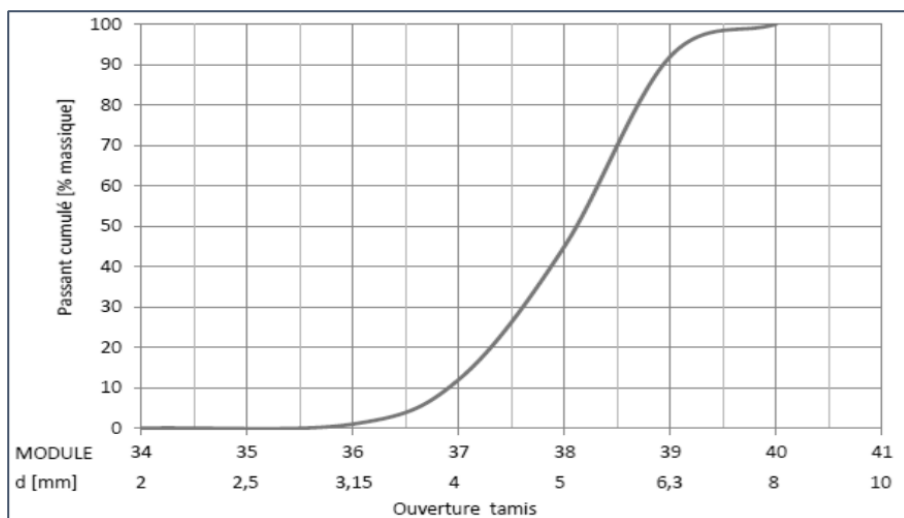


Figure 3 : Courbe granulométrique du gravillon 4/8

Les formulations choisies

Liant géopolymère

La base de notre formulation a été déduite des résultats des recherches menées par Ratsimbazafy H. M. (2012), et Sore et *al.* (2016). Ils ont fabriqués le liant géopolymère obtenu par le mélange de la solution alcaline et les aluminosilicates choisis. Le ratio solution alcaline/aluminosilicate utilisé est : 0,8.

$$\frac{\text{Solution alcaline}}{\text{Aluminosilicate}} = 0.8 \quad (1)$$

Béton drainant

En complément des recherches faites par Zhong et *al.* (2015) concernant la formulation des bétons drainants basée sur le ratio granulat/liant, fondé sur la recherche de Kabagire (2013) ; Rabenandrasana (2018) a confirmé que pour avoir un béton drainant efficace, il faut fixer la valeur du volume de vide granulaire.

On en déduit :

Tableau 3 : Paramètres de la formulation des éprouvettes

	E/C	V _p /V _{vg}
Béton drainant	0,35	0,40

En se basant sur ces paramètres, et pour une concentration de soude donnée, les proportions massiques (kilogramme par mètre cube de béton) des matériaux utilisés pour la fabrication des échantillons sont décrites dans le tableau suivant :

Tableau 4 : Proportions générales des matériaux utilisés

Echantillon	P0	P1	P2	P3	P4	P5
Mélange	Gravillon, Ciment, Eau	Gravillon, MK 100%, Sol soude	Gravillon, MK 95%, CBR 5%, Sol soude	Gravillon, MK 90%, CBR 10%, Sol soude	Gravillon, MK 85%, CBR 15%, Sol soude	Gravillon, MK 80%, CBR 20%, Sol soude

Le mélangeage

Le mélangeage des différents constituants a été effectué de deux manières :

- manuellement (M1) ;
- en utilisant un mélangeur mécanique (M2).

Tests mécaniques

La machine INSTROM 5585 muni d’une charge de 250 kN a été utilisée pour faire les tests mécaniques de tous les échantillons, après 28 jours d’âge.

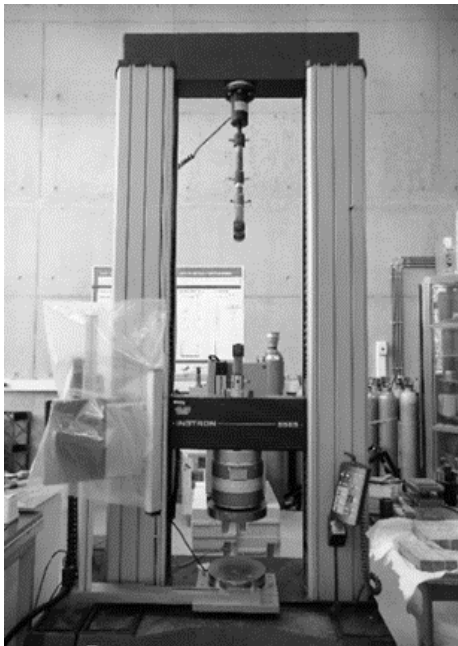


Figure 4 : Machine INSTROM 5585

Test de la conductivité hydraulique

Un perméamètre est nécessairement utilisée pour la mesure de la conductivité hydraulique des échantillons.

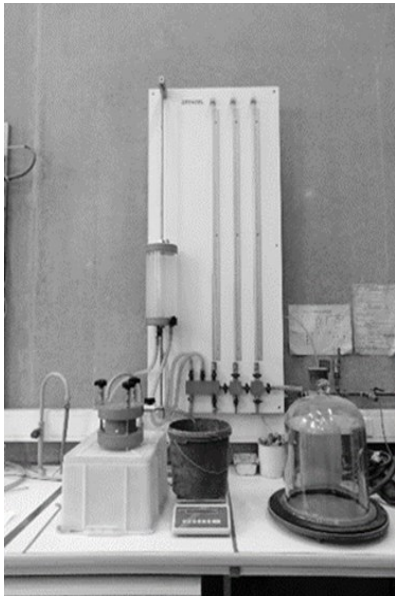


Figure 5 : Perméamètre

RESULTATS

Résultats des tests mécaniques

Pour les 2 sortes de mélange, les résultats des tests mécaniques sont donnés dans les Tableaux 5 et 6 ci-dessous.

Tableau 5 : Résultat des tests mécaniques - Mélange 1

Mélange M1						
Echantillon	E0	E1-1	E2-1	E3-1	E4-1	E5-1
Rc (MPa)	6,03	2,38	2,53	3,38	3,98	3,60
Rf (MPa)	1,31	0,48	0,70	0,80	0,77	0,69

Tableau 6 : Résultat des tests mécaniques - Mélange 2

Mélange M2						
Echantillon	E0	E1-2	E2-2	E3-2	E4-2	E5-2
Rc (MPa)	6,03	3,97	4,23	5,03	6,58	7,03
Rf (MPa)	1,31	0,77	0,84	0,97	1,06	1,28

Les échantillons E1-1 et E1-2 sont des références pour les bétons géopolymères, car ils ne contiennent que du métakaolin comme aluminosilicate.

Nous remarquons que quel que soit le type de mélange les résistances mécaniques augmentent avec la quantité de cendre de balle de riz ajouté.

Résultats des tests de conductivité hydraulique

Les résultats des mesures de conductivité hydraulique sont donnés dans les tableaux suivants.

Tableau 7 : Résultat des tests de conductivité hydraulique - Mélange M1

Mélange M1						
Conductivité hydraulique K (10^{-4} m/s)	E0	E1-1	E2-1	E3-1	E4-1	E5-1
	1,63	2,81	2,75	2,61	3,29	2,67

Tableau 8 : Résultat des tests de conductivité hydraulique - Mélange M2

Mélange M2						
Conductivité hydraulique K (10^{-4} m/s)	E0	E1-2	E2-2	E3-2	E4-2	E5-2
	1,63	2,90	2,86	3,91	3,13	2,81

Les conductivités hydrauliques présentent des valeurs fluctuantes, toute fois, celles des éprouvettes en béton drainant sont toutes supérieures à celle du béton témoin.

DISCUSSION

La substitution des ciments pour la construction des bétons drainants donne un bon résultat. Selon les résultats de la résistance mécanique, on peut constater que les mélanges M1 donnent des valeurs basses. Mais les mélanges M2 donnent des valeurs intéressantes, surtout à partir des échantillons 4 qui utilisent des mélangeurs mécaniques.

La Figure 6 illustre les résultats des tests de compression pour les mélanges M1 et M2 donnés dans les Tableaux 5 et 6.

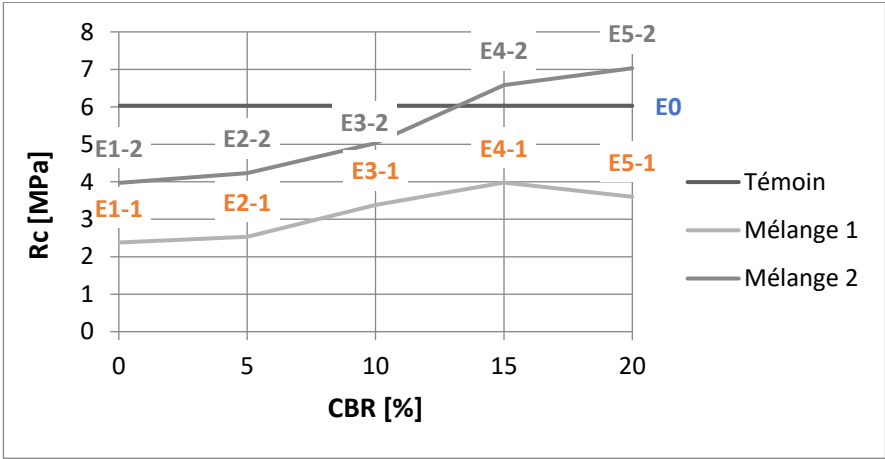


Figure 6 : Evolution de la Résistance à la compression en fonction du taux de CBR

Une valeur maximale de 7,03 MPa est obtenue pour l'échantillon E5-2 (20%CBR) contre 6,03 MPa pour le béton témoin à base de ciment.

Les résultats des tests de résistance à la traction par flexion pour les mélanges M1 et M2 donnés dans les Tableaux 5 et 6 sont illustrés par la Figure 7 ci-après.

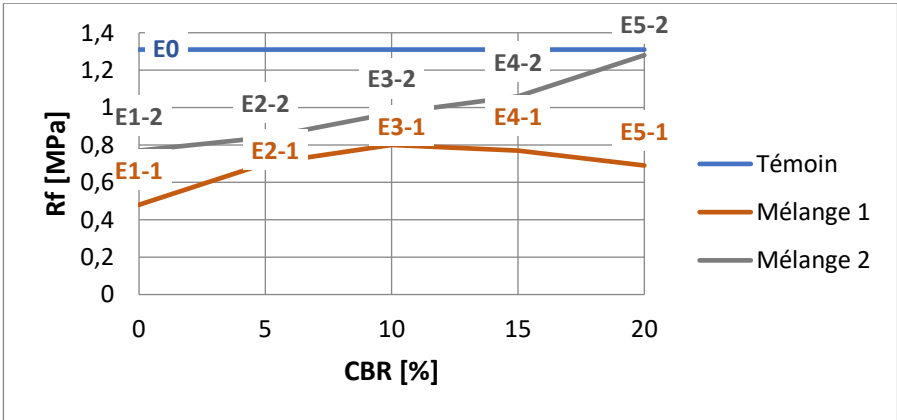


Figure 7 : Evolution de la Résistance à la flexion en fonction du taux de CBR

L'augmentation de la quantité de la cendre de balle de riz influence la résistance des bétons. Plus la quantité de cendre est élevée, plus la résistance est meilleure.

La Figure 8 illustre les résultats des tests de conductivité hydraulique des Tableaux 7 et 8.

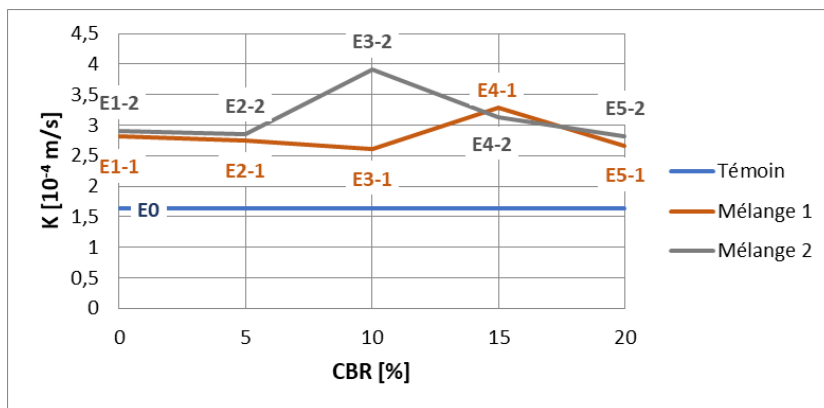


Figure 8 : Evolution de la conductivité hydraulique en fonction du taux de CBR

Cette figure montre que les échantillons fabriqués en utilisant le liant géopolymère possèdent un caractère hydraulique meilleur que les bétons témoins. Les coefficients de conductivité qui varient entre 10^{-5} à 10^{-4} (m/s) correspondent à une bonne possibilité d'infiltration. Or, pour tous les bétons drainants fabriqués, ce coefficient a une valeur comprise entre 2,61 à 3,91 10^{-4} m/s. Donc selon Ababou (2007), on peut classer nos matériaux parmi les bétons drainants avec une bonne infiltration comprise entre les sables et les graviers.

CONCLUSION

L'utilisation d'un matériau respectant l'environnement est l'un des principaux objectifs de notre recherche. Le ciment, matériau très utilisé dans la construction nuit l'écosystème pendant la phase de sa fabrication.

La fabrication d'un nouveau liant respectant l'environnement est utile pour substituer le ciment d'où le géopolymère. La cendre de balle de riz considérée comme déchet et le métakaolin matériau facile à trouver, sont utilisés pour fabriquer ce liant, mélangés dans une solution alcaline.

Les résistances mécaniques des éprouvettes montrent la qualité du liant obtenu. Le mélange le plus intéressant est celui qui utilise 20% de cendre de balle de riz et 80% de métakaolin. Il a une bonne propriété drainante, et peut se comparer avec des sables et des graviers.

Une amélioration des résultats se jouera sur l'accroissement de la quantité de cendre de balle de riz utilisée, l'ajout d'autre matériau aluminosilicate et aussi sur l'ajustement de la concentration de la solution alcaline utilisée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Ababou, R. (2007). *Elément d'Hydrologie souterraine*. ENSEEIHT-IMFT, Toulouse, France, 314 p.
- 2) FAO (2018). Suivi du marché de riz de la FAO. 21(1), Avril 2018, 9 p. <http://www.fao.org/3/19243FR/i9243fr.pdf>. Consulté le 24 Mai 2019.
- 3) Halleux, E. (2013). Valorisation des cendres de balles de riz pour la production de matériaux pouzzolaniques à Madagascar. Travail de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège, Liège, Belgique. 111 p.
- 4) Kabagire, K.D. (2013). Nouvelle approche de formulation des bétons drainants aux propriétés mécaniques et drainantes améliorées. Travail de fin d'études, Département Génie Civil, Faculté de Génie, Université de Sherbrooke, Quebec, Canada. 129 p. <https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/6185/MR96224.pdf;sequence=1>. Consulté le 12 Mai 2019.
- 5) Lian, C. et Zhuge, Y. (2010). Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. *Constr. Build. Mater.* 24, 2664–2671. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>
- 6) Maa, C., Awang, A.Z. et Omar, W. (2018). Structural and material performance of geopolymer concrete : A review. *Constr. Build. Mater.* 186, 90–102. <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111>
- 7) NRMCA (2011). *Pervious Concrete Pavement*. National Ready Mixed Concrete Association. <http://www.perviouspavement.org/>. Consulté le 18 Mai 2019.
- 8) Planetoscope (2019), La production mondiale de ciment. <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1708-production-mondiale-de-ciment.html>, consulté le 23 Juin 2019,
- 9) Pouhet, R., et Cyr, M. (2016). Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes. *Constr. Build. Mater.* 120, 150–160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.061>
- 10) Rabenandrasana, N.M. (2018). Essai de formulation des bétons drainants. Travail de fin d'études, Mention Science et Ingénierie des Matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar. 84 p.

- 11) Rakotoarimanana, S.N. (2019). Etude et essai d'élaboration d'un liant géopolymère à base de cendre de balle de riz. Travail de fin d'études, Mention Science et Ingénierie des Matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar. 79 p.
- 12) Ratsimbazafy, H.M. (2012). Contribution à l'étude de la production d'un ciment géopolymérique à base de métakaolin, et de cendres de balle de riz. Thèse de Doctorat, Département Science des Matériaux et Métallurgie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar. 190 p.
- 13) Sore, S.O., Messan, A., Prud'homme, E., Escadeillas, G. et Tsobnang, F. (2016). Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* 124, 301–311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.102>
- 14) Zhong, R. et Wille, K. (2015). Material design and characterization of high-performance pervious concrete. *Constr. Build. Mater.* 98, 51–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>

ACCESSIBILITE DES GARES ROUTIERES D'ANTANANARIVO, ANALYSES ET STRATEGIES D'AMELIORATION

par

RAMANITRARIVO Lantonirina C.⁽¹⁾, PRAENE Jean P.⁽²⁾

RAZAFINJATO Victor⁽¹⁾, RAKOTOMALALA Jean L.⁽¹⁾

(1) Ecole Doctorale INGE, Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Laboratoire PIMENT EA 4518, Université de La Réunion

RESUME

Les études menées à la suite des enquêtes auprès des gares routières tananariviennes indiquent que les voyageurs évaluent l'accessibilité en gares comme étant moyenne. Pourtant, l'agglomération recense une diversification des modes de rabattement parmi lesquels le taxibe est utilisé par près de la moitié des voyageurs pour rejoindre les gares. Le présent article vise alors à améliorer les conditions de parcours des voyageurs depuis leur point d'origine jusqu'à une gare routière d'Antananarivo.

L'évaluation de l'accessibilité des gares par les transports collectifs urbains et suburbains aboutit à un résultat positif. Pourtant, les analyses affirment que la disponibilité des lignes de taxibe n'influe pas sur la perception de l'accessibilité par les passagers. Elle n'est pas proportionnelle à la part modale du transport en commun dans le rabattement en gare. Cela signifie que pour le cas d'Antananarivo, la multimodalité est incontournable. Les voyageurs comptent également sur les autres moyens de transport autres que le taxibe pour leur déplacement vers les gares routières. Aussi, les stratégies proposées pour l'amélioration de l'accessibilité sont élaborées dans ce sens, à commencer par un cadrage clair du secteur du transport routier par l'autorité compétente. Ensuite, une autre préconisation consiste à agir dès la conception de la gare routière en insistant sur l'insertion urbaine étroitement liée à l'accessibilité aussi bien extérieure qu'intérieure. La notion de multimodalité et d'intermodalité est aussi recommandée ainsi qu'une amélioration des transports urbains.

Mots clés : Accessibilité, Gare routière, Transport en commun, Multimodalité.

ABSTRACT

Travellers perceive that Antananarivo bus stations are moderately accessible. However, the city has various modes of transport including the taxibe, that is the most used by travellers to reach bus stations. This article aims to improve passengers' travel conditions from their departure zone to a bus station in Antananarivo.

The evaluation of accessibility by urban and suburban public transport has a positive outcome. However, analyses state that the availability of taxibe lines does not influence the perception of accessibility by passengers. It has no impact on the share of public transport in the modal split. This means that in Antananarivo, multimodality is unavoidable. Travellers also rely on other modes of transportation other than the taxibe to come to bus stations. Therefore, strategies for improving accessibility are developed along these lines, starting with the adoption of a clear policy framework for the road transport sector by the competent authority. Then, another proposal is to act from the design of the bus station by insisting on urban integration, which is closely linked to external and internal accessibility. The creation of a multimodal bus station and the improvement of urban transport are also recommended.

Keywords : Accessibility, Bus station, Public transit, Multimodality

INTRODUCTION

Les gares sont longtemps considérées comme ayant des caractéristiques particulières puisqu'elles sont des lieux d'intersection de flux ou de rupture de charge. Elles constituent des nœuds substituant les centralités. Ce sont même des micro-centralités méritant d'être étudiées profondément car elles ont un impact non négligeable sur les implantations immobilières (Devisme, 2001). A Antananarivo, les voyageurs perçoivent les gares routières comme des infrastructures de transport routier moyennement accessibles alors que les modes de rabattement sont diversifiés. Le principal moyen de déplacement utilisé par les passagers pour venir en gares est le taxibe, le réseau de bus urbain ou suburbain de la capitale, avec une part modale de 47%.

Le présent article s'intéresse particulièrement à l'analyse de l'accessibilité et l'amélioration à apporter pour faciliter l'accessibilité de ces gares routières c'est-à-dire les conditions de parcours de l'espace du voyageur depuis son point d'origine jusqu'à son arrivée en gare (L'Hostis et Conesa, 2010).

Dans un premier temps, l'étude se penche alors sur l'évaluation du niveau d'accessibilité des gares routières par ce mode de transport principal qui est le taxibe. Selon Richer et Palmier (2013), l'accessibilité des gares routières correspond à un potentiel spatial dépendant de la structure spatiotemporelle de l'offre de transport et déterminant leur capacité d'être accessibles en fonction de leur position dans l'espace

et de la maîtrise des distances (Richer et Palmier, 2013). Une bonne accessibilité du système encourage alors l'utilisation des transports en commun (Papaioannou et Martinez, 2015) et dépend de la qualité et de la quantité de l'infrastructure de transport (Banister, 2003).

Aussi, les hypothèses énoncées et à confirmer sont les suivantes : (1) une gare routière desservie par plusieurs lignes de transport urbaines ou suburbaines signifie-t-elle une gare routière perçue comme facilement accessible ? (2) la part modale du transport en commun pour chaque gare est proportionnelle au nombre des lignes de transport qui la dessert. Dans un deuxième temps, les résultats relatifs aux études de l'accessibilité par les transports en commun vont permettre d'avancer des propositions ayant pour vision la facilitation du rabattement en gares des voyageurs dans sa globalité.

MATERIELS ET METHODES

La première étape de l'étude a été les descentes sur terrain puis enquêtes auprès des infrastructures de transport routier de l'agglomération d'Antananarivo précisément les gares routières. La modélisation de ces données a été, ensuite, réalisée au sein du Laboratoire PIMENT de l'Université de La Réunion grâce à l'utilisation de plusieurs outils notamment les logiciels R, Zotero, ... et à l'application des analyses descriptives simples, multidimensionnelles et de l'analyse bivariable.

La deuxième étape conduit ensuite à l'évaluation de l'accessibilité des stationnements et des gares routières d'Antananarivo par les transports collectifs (TC) en utilisant l'approche PTAL ou « Public Transport Accessibility Level », un outil développé au Royaume-Uni, basé sur des indicateurs réalistes simples et utilisé par Transport For London (TFL). Il s'agit d'« une mesure précise et détaillée de l'accessibilité d'un point sur le réseau de transport public, en tenant compte du temps d'accès à pied et de la disponibilité du service » (Transport For London, 2010). Le score obtenu par gare routière va définir le niveau d'accessibilité de chacune.

Une fois les résultats obtenus, l'approche déductive a servi à confirmer ou non les hypothèses énoncées. Cette étape a grandement contribué ensuite dans la définition des solutions préconisées pour améliorer l'accessibilité des gares routières tananariviennes en général.

RESULTATS

La part modale de chaque mode de rabattement par gare routière

D'après les enquêtes, les voyageurs utilisent différents moyens de transport pour venir en gares. Le tableau suivant renseigne sur la répartition modale au niveau de chaque gare routière.

Tableau 1 : Répartition modale au niveau de chaque stationnement ou gare

	ABP (%)	ABS (%)	AZ (%)	MH (%)	AV (%)	AT (%)	FK (%)	MK (%)	AP (%)
A pied	10			27	3	14			7
Camion	5	10			3	7			
Moto			3			14	8	2	3
Taxi	24	25	7	7	10	21	45	33	11
Taxibe	33	60	80	40	31	36	26	39	75
Taxi-brousse			3	27	31	7	5	5	
Vélo			7		3		8		
Pousse- pousse									2
Charette							3		
Voiture particulière	29	5			17		5	21	2

ABP : Coopératives privées de transport d'Ambodivona

ABS : Coopératives classiques de transport du stationnement
d'Ambodivona

AZ : Gare routière d'Anosizato

MH : Stationnement de Mahazo

AV : Stationnement d'Andranobevava

AT : Stationnement d'Antohomadinika

FK : Stationnement de Fasan'ny karana

MK : Gare routière Maki d'Andohatapenaka

AP : Gare routière d'Ampasampito

Les enquêtes ont recensé 10 modes de transports.

Les offres en TC, la perception de l'accessibilité et la part du TC dans le rabattement

Le tableau suivant résume les résultats issus des différentes approches méthodologiques.

Tableau 2 : Paramètres d'analyse de la part modale du TC

<i>Stat/GR</i>	<i>Lignes de TC existantes</i>	<i>Part TC (%)</i>
AB	4	46,50
AZ	7	80,00
MH	13	40,00
AV	10	31,00
AT	9	36,00
FK	5	26,00
MK	5	39,00
AP	11	75,00

Les lignes de transport concernant à la fois l'urbain et le suburbain desservant chaque gare routière et dont les arrêts sont proches de celle-ci.

Evaluation de l'accessibilité par les TC

Le Tableau 3 renseigne sur les résultats de l'évaluation via la méthode PTAL qui a pris comme base le repérage de l'arrêt de bus le plus proche dans le sens de l'aller ou du retour de l'itinéraire pour chaque ligne. Chaque score correspond ensuite à un niveau d'accessibilité qui va définir le degré de l'accessibilité.

Tableau 3 : Evaluation de l'accessibilité des gares routières par les TC

<i>Stat/GR</i>	<i>Score PTAL</i>	<i>Niveau d'accessibilité</i>	<i>Degré d'accessibilité</i>	<i>Perception</i>
AB	16,55	4	BIEN	4,14
AZ	30,55	6a	EXCELLENT	2,80
MH	77,61	6b (haut)	EXCELLENT	2,94
AV	44,44	6b (haut)	EXCELLENT	4,46
FK	27,78	6a	EXCELLENT	4,19
MK	24,00	5	TRES BIEN	2,89
AP	56,17	6b (haut)	EXCELLENT	3,68

La perception correspond aux notations des voyageurs par rapport à leurs conditions de parvenir aux gares. L’accessibilité est évaluée suivant une échelle de 1 à 7 en allant du « facile » vers la « difficile ». Le score Ptal global est de 39,59, ce qui correspond à un niveau d’accessibilité « Excellent » tandis que la perception générale est d’environ 3,60, ce qui traduit que les gares routières de l’agglomération d’Antananarivo sont moyennement accessibles aux voyageurs.

Le stationnement d’Antohomadinika n’a pas pu être évalué car l’arrêt de bus le plus proche est jugé trop loin (> 640m), donc l’approche n’a pas pu être appliquée.

Pour mieux expliquer les relations entre les différentes variables, il a été indispensable de passer par une analyse bivariée. Le résultat de l’analyse est présenté sur la Figure1.

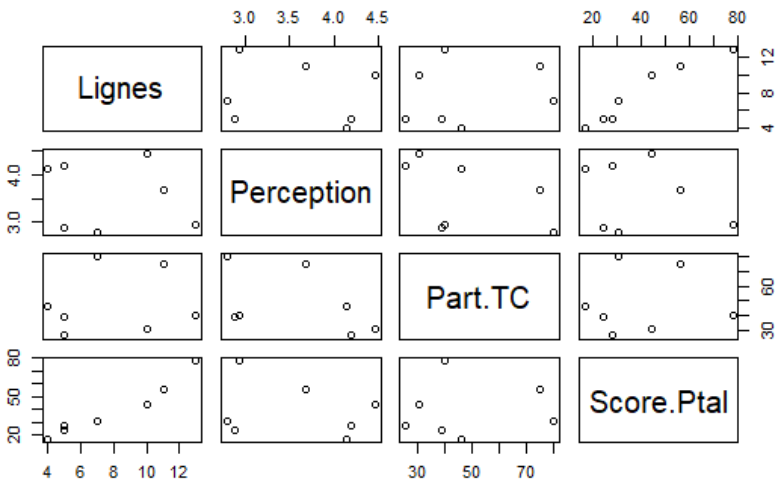


Figure 1 : Analyse bivariée des variables

Le calcul des coefficients de corrélation renseigne le degré de liaison existant entre les différents paramètres. Pour faciliter la compréhension du graphique, les valeurs des coefficients de corrélation sont données dans le tableau ci-après.

Tableau 4 : Coefficients de corrélation entre les variables

	<i>Lignes</i>	<i>Perception</i>	<i>Part TC</i>	<i>Score Ptal</i>
<i>Lignes</i>	1,000	-0,160	0,168	0,969
<i>Perception</i>	-0,160	1,000	-0,451	-0,230
<i>Part TC</i>	0,168	-0,451	1,000	0,076
<i>Score Ptal</i>	0,969	-0,230	0,076	1,000

Le coefficient de corrélation varie entre 0,076 et 1,000.

DISCUSSION

Le Tableau 1 confirme que le taxibe et le taxi sont communs à toutes les gares étudiées. Concernant les véhicules particuliers, certaines gares comme Anosizato, Mahazo et Antohomadinika ne possèdent pas d'emplacements pour parking adéquats pour les recevoir. Les autres modes sont : le taxi-brousse, le camion, les 02 roues, le vélo et la marche. Il existe même des modes spécifiques pour chaque gare comme les poussettes et les charrettes.

D'un point de vue global de l'analyse bivariable de la Figure 2, les nuages de points s'éparpillent dans tous les sens sans indiquer précisément le type de relation qui existe entre chaque variable sauf pour les « Lignes » et le « Score Ptal » qui démontrent une relation linéaire. La forte relation positive (proche de 1) entre ces variables indique que les gares desservies par plusieurs lignes de TC enregistrent les scores Ptal élevés. Ce qui est normal puisque le score final est obtenu en faisant la somme des index d'accessibilité de toutes les lignes desservant la gare selon la méthode Ptal. Mais cette méthode reste limitée par le fait qu'elle ne tient pas compte des aspects qualitatifs du transport urbain. Aussi, pour compléter l'étude d'accessibilité, d'autres analyses complémentaires sont indispensables.

Cet article démontre que théoriquement, les gares routières et stationnements de l'agglomération d'Antananarivo ont un niveau d'accessibilité par les transports en commun élevé. Pourtant dans la pratique, le taux d'utilisation des TC par les voyageurs pour les rabattements en gares est encore faible d'après les résultats d'enquêtes.

Etant donné que les voyageurs perçoivent que les gares routières tananariviennes sont moyennement accessibles malgré l'existence d'une multitude de moyens. Quelques pistes de réflexion sont présentées pour améliorer cette accessibilité.

Mise en place d'instruments politiques claires, précises, mises à jour et efficaces par l'Etat sur le transport routier.

Ces politiques devraient être :

- *physiques* c'est-à-dire concernent toutes les infrastructures dédiées aux transports ;
- *souples* incitant les gens à changer de comportement face aux risques et conséquences de leur choix de type de transport tout en proposant des solutions ;
- *orientées vers les investissements* à allouer aux recherches et au développement pour un modèle durable du transport (Santos et *al.*, 2010) ;

- *reliées aux mesures relatives à la santé* pour diminuer le taux de morbidité et de mortalité dus au transport (Khreis et *al.*, 2017) mais aussi pour éviter au maximum la transmission des maladies contagieuses au risque de créer une épidémie ou une pandémie comme celle du Coronavirus ;
- *respectueuses de l'environnement.*

L'existence de ces instruments politiques va inciter de bonnes performances en termes d'accessibilité globale et de connectivité spécifique au trajet de chaque voyageur afin qu'il choisisse le transport collectif plutôt que la voiture privée (Papaioannou et Martinez, 2015), ce qui serait bénéfique pour l'environnement.

Considération de l'insertion urbaine dès la conception de la gare routière

Considérée comme un « morceau de la ville », la gare routière représente à la fois un nœud et un lieu (Bertolini, 1996). De même, étant une interface entre les réseaux de transports et le territoire, elle constitue un créateur d'urbanité (Mazzella, 1996). De ce fait, elle devrait s'accorder avec son paysage environnant.

Pour réussir l'insertion urbaine d'un équipement, Zelezny (2013) propose de se focaliser sur cinq thématiques : les effets de coupure, l'accessibilité extérieure et information urbaine, l'accessibilité intérieure et aménagement de l'espace, l'aspect architectural de l'infrastructure et son rapport paysager avec son environnement ainsi que l'usage des sols et l'affectation des espaces environnants ou quartiers de gare.

Favoriser la multimodalité et assurer l'intermodalité entre les divers modes : création d'une gare routière multimodale

La multimodalité, caractérisée par la présence simultanée de différents modes de transport au sein d'un complexe d'échanges, se développe de plus en plus dans les villes pour faciliter la mobilité des citoyens. Aussi, la solution proposée pour l'agglomération d'Antananarivo concerne la création d'une gare routière multimodale regroupant à la fois les taxi-brousses, les taxibe, les réseaux de bus rapides, les taxis, les véhicules particuliers, les 02 roues et dles navettes assurant les liaisons gares routières – gares routières et aéroports – gares routières à la place des charrettes et des pousse-pousses.

L'équipement central serait la gare routière, autour de laquelle viennent tous les autres moyens de desserte. Pour permettre un meilleur transfert entre les modes, chaque équipement devrait être étudié minutieusement.

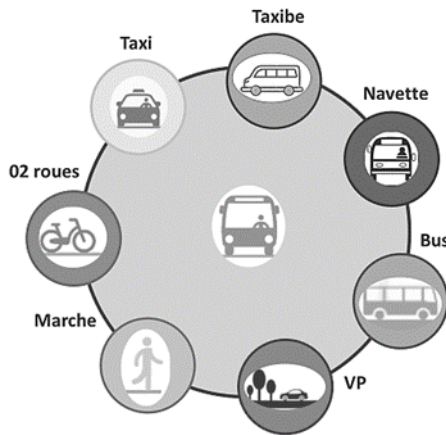


Figure 2 : Système d'une gare routière multimodale

Améliorer la qualité de service offerte par les transports collectifs urbains et suburbains

Certaines études affirment l'importance du transport en commun dans le fonctionnement de la plupart des zones urbaines tout en diminuant la congestion (Chua, 1984) (Cipriani, Fusco, et *al.*, 2005). Aussi, il est intéressant d'apporter des améliorations dans ce secteur notamment en termes de qualité de service. Cela consiste alors à se focaliser sur :

- les véhicules de transport, le confort de l'attente, l'information, l'accessibilité PMR, la maintenance, la propreté et l'entretien des équipements ;
- les technologies de l'information et de la télécommunication dans les gares routières, les terminaux et les points d'arrêt notamment en termes de gestion, exploitation des infrastructures et des lignes de transport en utilisant des logiciels, des caméras, des capteurs,...
- la vitesse des bus en mettant une partie des lignes de bus en site propre pour faire gagner du temps aux usagers ;
- les emplacements des arrêts de bus dans l'agglomération d'Antananarivo ainsi que la fréquence de desserte ;
- les règlements sanitaires dans les TC pour éviter la transmission des maladies contagieuses.

De plus, la promotion du transport collectif contribue à la préservation de l'environnement en réduisant la consommation d'énergie et les émissions de polluants (André et Villanova, 2004) (Barabino et *al.*, 2012) (Chen et *al.*, 2009).

CONCLUSION

La présente étude analyse l'accessibilité des gares routières de l'agglomération d'Antananarivo. Les études ont montré que l'accessibilité par les taxibe a un niveau « Excellent » selon l'approche Ptal. Pourtant, la part modale du TC dans le rabattement en gare reste basse.

Les conclusions tirées par rapport aux hypothèses posées auparavant sont alors les suivantes :

- une gare routière desservie par plusieurs lignes de transport collectif ne signifie pas forcément une gare routière perçue par les voyageurs comme facilement accessible ;
- le nombre des lignes de transport n'est pas proportionnel à la part modale du TC dans le rabattement en gares.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) André, M., & Villanova, A. (2004). Characterisation of an urban bus network for environmental purposes. In *Science of The Total Environment*, 334-335, 85-99.
- 2) Banister, D. (2003). Transport and Urban Development. E FN SPON.
- 3) Barabino, B., Deiana, E., & Tilocca, P. (2012). Measuring service quality in urban bus transport : A modified SERVQUAL approach. In *International Journal of Quality and Service Sciences*, 4(3), 238-252.
- 3) Bertolini, L. (1996). Des gares en transformation. Nœuds de réseaux et lieux dans la ville. In *Les Annales de la recherche urbaine*, 71(1), 86-91.
- 4) Chen, X., Yu, L., Zhang, Y., et Guo, J. (2009). Analyzing urban bus service reliability at the stop, route, and network levels. In *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, 43(8), 722-734.
- 5) Chua, T. A. (1984). The planning of urban bus routes and frequencies : A survey. In *Transportation*, 12, 147-172.
- 6) Cipriani, E., Fusco, G., Gori, S., et Petrelli, M. (2005). A procedure for the solution of the urban bus network design problem with elastic demand. Proceedings of 10th EWGT
- 7) Devisme, L. (2001). De la proximité impensée à l'accessibilité organisée. In *Travaux de l'Institut Géographique de Reims*, 27(107), 53-64.
- 8) Khreis, H., May, A. D., et Nieuwenhuijsen, M. J. (2017). Health impacts of urban transport policy measures: A guidance note for practice.

- 9) L'Hostis, A., et Conesa, A. (2010). Définir l'accessibilité intermodale. Arnaud Banos, Thomas Thévenin. *Systèmes de Transport Urbain*, Hermès (IGAT), 23.
- 10) Mazzella, S. (1996). Jean-Marc Offner, Denise Pumain, Réseaux et territoires, Significations croisées, 1996. In *Les Annales de la recherche urbaine*, 73, 145-146.
- 11) Papaioannou, D., et Martinez, L. M. (2015). The Role of Accessibility and Connectivity in Mode Choice. A Structural Equation Modeling Approach. In *Transportation Research Procedia*, 10, 831-839.
- 12) Richer, C., et Palmier, P. (2013). Mesurer l'accessibilité territoriale par les transports collectifs : Proposition méthodologique appliquée aux pôles d'excellence de Lille Métropole. In *Cahiers de géographie du Québec*, 56(158), 427-461.
- 13) Santos, G., Behrendt, H., et Teytelboym, A. (2010). Part II : Policy instruments for sustainable road transport. In *Research in Transportation Economics*, 28(1), 46-91.
- 14) Transport For London. (2010). Measuring Public Transport Accessibility Levels—PTALs (p. 8).
- 15) Zelezny, R. (2013). Insertion urbaine des pôles d'échanges : Outil d'un urbanisme "orienté vers le rail" ? *Commission de Géographie des Transports*, 19.

OPTIMISATION PAR PLAN DE MELANGE DE LA FORMULATION DU BETON HYDRAULIQUE

par

RAOBIMANDRANTO Navelanirina A.⁽¹⁾, RAKOTOMALALA Jean L.⁽²⁾
RAZAFINJATO Victor⁽³⁾

(1) Ecole Doctorale INGE, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, , Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

(3) Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, , Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Ce travail consiste à l'application de la méthode de formulation par plan de mélange pour la formulation du béton, s'appuyant sur des résultats connus dans la littérature et sur des normes applicables à Madagascar. L'objectif est de ressortir des formulations adéquates pour un béton, par l'optimisation du dosage de chaque constituant en se basant sur des contraintes aux limites, sur des essais de résistance à la compression et sur des mesures d'ouvrabilité. Pour ce faire, une large caractérisation (physique et mécanique) des matériaux utilisés a été réalisée. Une modélisation mathématique a été ensuite développée. Les conditions aux limites des composants ont été tirées de la norme NF EN 206-1 et de la formulation par les méthodes classiques, permettant ensuite de déduire le domaine expérimental. Plusieurs résultats de mélange ont été trouvés à partir desquels des applications et des essais ont été réalisés. En obtenant la maniabilité et la résistance requises à 28j du béton, les résultats des essais ont révélé que la quantité de chaque constituant peut être diminuée notamment le ciment. La réduction de la consommation des matériaux contribue également à la protection de l'environnement.

Mots clés : Plans de mélange, Diagrammes ternaires, Formulation de béton, Plan d'expériences, Interaction des constituants.

ABSTRACT

This work consists in the application of the mix design method for concrete formulation, based on results known in the literature and on standards applicable in Madagascar. The objective is to come up with adequate formulations for a concrete, by optimizing the dosage of each component based on limit stresses, on compressive strength tests and on workability measurements. For this purpose, a broad

characterization (physical and mechanical) of the materials used was carried out. A mathematical model was then developed. The boundary conditions of the components were taken from the NF EN 206 -1 standard and from the formulation by classical methods, allowing then to deduce the experimental field. Several mixing results were found from which applications and tests were carried out. By obtaining the required workability and strength at 28 days of concrete, the test results revealed that the quantity of each component can be reduced, especially the cement. Reducing the consumption of materials also contributes to environmental protection.

Keywords : Mixing plans, Ternary diagrams, Concrete formulation, Experimental design, Interaction of constituents

INTRODUCTION

Connu depuis l'antiquité, le béton reste l'un des matériaux le plus utilisé mondialement, dans le domaine de la construction en génie civil. Cette consommation s'élève à hauteur de 6 milliards de mètres cubes par an. Le béton est devenu un matériau de construction incontournable. De pratique émergente est apparue, en l'intégrant dans de plus en plus de projets architecturaux que dans le processus de réhabilitation et/ou d'entretien des réseaux routiers et avec des techniques nouvelles (Maher E. B, 2005). Cette dernière disposition commence à prendre de l'ampleur à Madagascar, en appliquant le béton compacté au rouleau « BCR », issu de la recherche réalisée par (Rakotomala J. L., 2012). Lié à ce phénomène favorisant l'utilisation du béton, la production mondiale de ses constituants ne cesse d'augmenter, notamment le ciment. La fabrication du ciment est non seulement énergivore mais elle rejette des quantités non négligeables de dioxyde de carbone, 5% dans le monde, ayant ainsi des impacts négatifs pour l'environnement. Dans l'optique du développement durable tout en gardant l'utilisation du béton dans les constructions, le présent article cherche à réduire la consommation du ciment en se focalisant sur l'optimisation de la formulation du béton, sans modifier la qualité et la résistance du béton obtenu (Amel K., 2008). L'approche adoptée est la méthode par plan de mélange dont le principe consiste à trouver la corrélation entre chaque constituant en variant sa proportion (Goupy J., 2000). Par la suite, en comparant la courbe granulométrie du mélange obtenu avec celle de la courbe optimale de Fuller Thomson.

MATERIELS ET METHODES

Afin d'atteindre les objectifs fixés, la méthodologie suivante a été adoptée

Choix des matériaux et matériels

Etant donné que le béton est le matériau choisi pour l'expérimentation, trois matériaux bien distincts sont utiles pour le mélange. L'eau est utile pour la réaction du

mélange. Le ciment de type CEM I 42.5N, dont les compositions chimiques et minéralogiques sont données dans le Tableau 1, a été choisi comme liant.

Tableau 1 : Composition chimique du ciment CEM 42,5N

Compositions chimiques minéralogiques (%)								
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃	Cl
19,80	6,08	3,58	61,56	2,48	0,18	0,32	2,54	0,06
C ₃ S		C ₂ S		C ₄ AF		C ₃ AF		
45,65		22,33		10,38		10,88		

Trois types d’agrégats, du sable de rivière et des granulats issue d’une carrière, g(5/15) et G(15/25) ont été utilisés. Les caractéristiques physiques sont présentées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques physiques des agrégats

Caractéristiques	Sable 0/5	Gravillon5/15	Gravillon15/25
Masse volumiques Absolue [Kg/m³]	2650	2600	2600
Masse volumiques Apparente [Kg/m³]	1500	1450	1450
Diamètre minimal [mm]	0,08	5	15
Diamètre maximal [mm]	5	15	25

Dans l’étude de formulation du béton, l’ouvrabilité est mesurée par l’essai d’affaissement classique au cône d’Abrams selon la norme EN 12350-2. La résistance à la compression est mesurée sur des échantillons cylindriques (16x32cm) confectionnés selon la norme EN 12390-2 et conditionnés dans l’eau à 20°C. Le malaxage de chaque mélange issu de la formulation a été fait avec un malaxeur horizontal à moteur thermique.

Principes et modélisation de la formulation

L’étude propose de formuler un béton ordinaire d’un rapport E/C efficace avec de bonnes caractéristiques rhéologiques, en passant par une optimisation des dosages de chaque constituant. En effet, l’utilisation de la méthode de formulation par plan de mélange permet de varier la valeur de chaque constituant donnant par la suite son influence sur le mélange. Les plans de mélange contribuent à la connaissance des

informations sur les constituants, leurs influences prises séparément et sur leurs interactions éventuelles. La réponse dépend des proportions « volumiques » des constituants utilisés dont leur somme est prise égale à l'unité, c'est-à-dire, ils sont dépendants les uns des autres. Ainsi, les composants pris en compte dans le mélange sont le ciment (C), le Sable (S), le Gravillon (qui se classe sous deux catégories, le gravillon (g) 5-15 et le Gravillon (G) 15-25 d'où la somme :

$$\mathbf{S + g + G + C = 1} \qquad (1)$$

En considérant un mélange complet, le choix d'un modèle mathématique converge vers un polynôme de degré 2, reliant la proportion des constituants à la réponse Y.

$$Y = \sum_{i=j}^k b_i X_i + \sum_{i<j}^k \sum_{i<j}^k b_{ij} X_{ij} \qquad (2) \text{ (Goupy, 2006)}$$

Les paramètres X_i et X_j correspondent aux proportions volumiques des constituants.

Les coefficients b_i et b_j sont à déterminer et différents pour chaque réponse.

En appliquant les constituants de base du béton, l'équation (1) se transforme :

$$Y = b_1.S + b_2.g + b_3.G + b_4.C + b_{12}.S.g + b_{13}.S.G + b_{14}.S.C + b_{23}.g.G + b_{24}.g.C + b_{34}.G.C \qquad (3)$$

Et devient sous forme matriciel

$$[Y] = [X].[b] \qquad (4)$$

[Y] : la matrice des réponses ; [X] : la matrice d'expériences ; [b] : le vecteur de colonne des coefficients du modèle

Les mélanges sont également caractérisés par des contraintes inférieures, supérieures appelées contraintes implicites. Ces contraintes désignent les valeurs minimales et maximales que peuvent prendre chaque composante issues de la norme NF EN 206-1 (Multon, 2012). Le tableau 3 donne ces valeurs de contrainte.

Tableau 3 : Contraintes implicites

Constituants	Contraintes inférieures implicites	Contraintes supérieures implicites
Sable	0,34	0,40
Gravillons 5-15	0,20	0,23
Gravillons 15-25	0,30	0,34
Ciment	0,09	0,11

En ciblant la plage d’affaissement ou la classe de consistance souhaité selon la norme NF EN 206, la quantité de l’Eau est fixée par le rapport C/E qui est fonction de la résistance moyenne à atteindre à 28jours. Cette relation est exprimée par :

$$\frac{C}{E} = \frac{f_{cj}}{G\sigma_{c28}} + G \qquad (5)$$

Tableau 4 : Classe de consistance

Classe de Consistance	S1 (Ferme)	S2 (Plastique)	S3 (Très plastique)	S4 (Fluide)	S5 (Très fluide)
Affaissement [mm]	10 – 40	50 – 90	100 – 150	160 – 210	>210

La résolution d’un tel problème complexe par des méthodes classiques est quasiment impossible. Le recours à l’utilisation de logiciels est très recommandé. Nombreux sont les logiciels de traitement de plan des mélanges, mais le «Nemrowdow» est un des logiciels qui peut donner des résultats fiables et facile à interpréter.

Etudes en laboratoire

Suite à la résolution de l’équation (3) et (4) avec le logiciel, des matrices d’expériences, des matrices de corrélation, des formulations ont été trouvées. Ces résultats vont être utiles pour la réalisation des différents échantillons à tester au laboratoire.

Des mesures d’affaissement, des essais d’écrasement vont être réalisés avec ces échantillons dans le but de connaître leurs caractéristiques mécaniques.

RESULTATS

A l’issue de la méthode utilisée, des résultats sur la proportion des constituants ont été obtenues.

Le Tableau 5 montre les proportions de chaque constituant du mélange obtenu.

Tableau 5 : Proportion des constituants du mélange

N° de mélange	Sable	Gravillon 5-15	Gravillon 15-25	Ciment
Mélange N°1	0,375	0,215	0,300	0,110
Mélange N°2	0,400	0,205	0,305	0,090
Mélange N°3	0,360	0,200	0,340	0,100
Mélange N°4	0,400	0,205	0,300	0,095
Mélange N°5	0,350	0,210	0,340	0,100
Mélange N°6	0,350	0,200	0,340	0,110

L'influence de chaque constituant sur le mélange dans le plan et dans l'espace est illustrée dans la Figure 1.

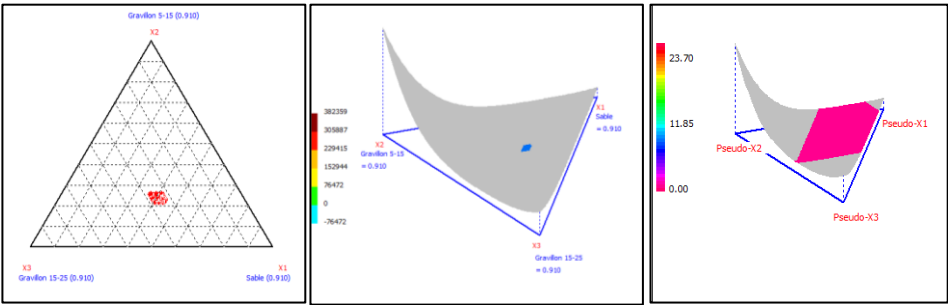


Figure 1 : Echantillons de diagrammes ternaires, Variation de la fonction de variance dans le plan : Sable, Gravillon 5-15, Gravillon 15-25, COMPOSANTS FIXES, Ciment = 0.0900

Cette proportion issue de la méthode par plan de mélange est reliée ensuite avec la courbe granulométrique des constituants montrée sur la Figure 2.

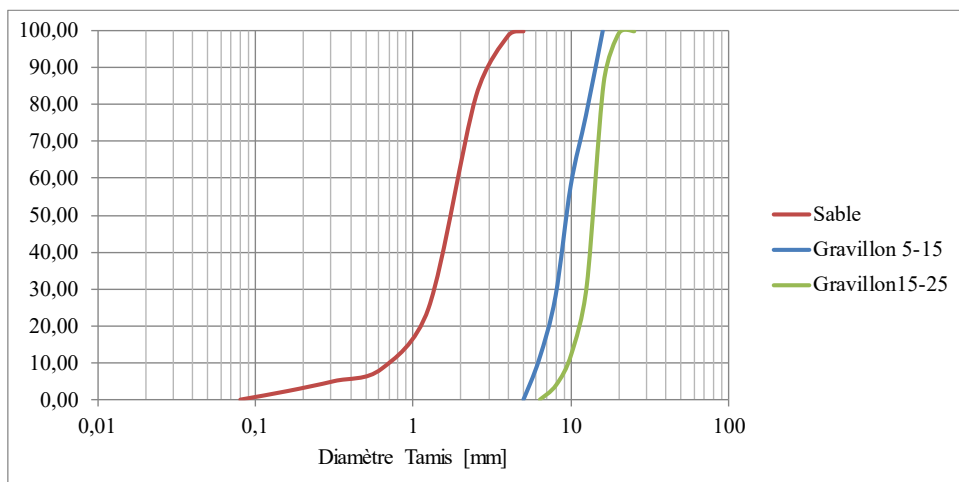


Figure 2 : Courbes granulométriques : sable – gravillons 5/15 et 15/25

Les résultats sur la proportion de chaque constituant obtenu ont été comparés à celui de la courbe optimale de Fuller Thomson, une courbe servant comme référence pour un mélange parfait. La Figure 3 montre cette comparaison.

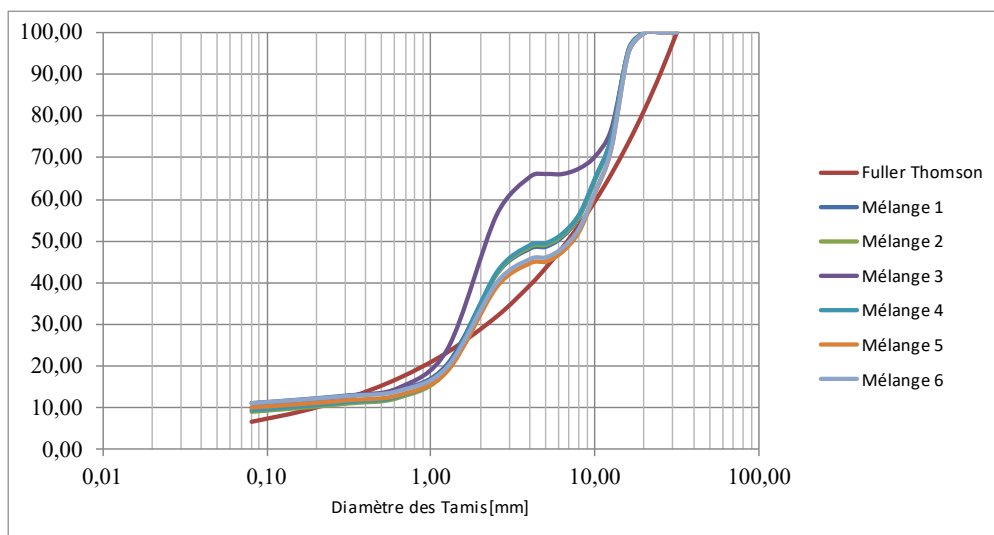


Figure 3 : Courbes granulométriques de Fuller-Thompson et courbes des mélanges

Des échantillons avec les 6 mélanges ont été réalisés selon les proportions données au Tableau 5, suivi des différents essais selon les normes EN 12350-2, EN 12390-2. Les résultats sont regroupés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Résultats des essais sur les échantillons

N° de mélange	G/S	E/C	Affaissement A[mm]	Résistance à 28jours [MPa]
Mélange N°1	1,373	0,492	70	30,1
Mélange N°2	1,275	0,491	50	17,5
Mélange N°3	1,500	0,490	67	20,5
Mélange N°4	1,263	0,492	60	18,7
Mélange N°5	1,571	0,490	65	20,7
Mélange N°6	1,543	0,492	80	29,1

DISCUSSION

Les valeurs de chaque constituant du mélange issues de la méthode respectent les contraintes implicites données dans le Tableau 3, ce qui implique que la proportion des matériaux suit les valeurs limites imposées.

Le rapport G/S qui varie entre 1.2 à 1.6, d'après le tableau 6, indique l'ouvrabilité du béton selon G. Dreux et J. Festa (1998).

Selon la Figure 3, les courbes de chaque mélange se rapprochent de la courbe de référence de Fuller Thomson sauf celle du mélange 3 qui se détache un peu. Ainsi, les mélanges obtenus par la méthode de formulation par plan de mélange donnent des compositions optimales. Ces mélanges confirment également les résultats des études menées par un chercheur Malagasy sur le Béton Compacté au Rouleaux (Rakotomalala J. L., 2011).

Les résultats sur les échantillons révèlent que la classe de consistance du béton est S2 et que leurs résistances à la compression à 28 jours d'âge varient de 17.5MPa à 30.1MPa (Multon S., 2012).

Faisant référence à une résistance à la compression à 28 jours égale à 20MPa pour un béton courant, dans le tableau 6, le mélange N°3 et N°5 répondent à ce critère. Pourtant, selon le Tableau 5, la quantité du ciment est de 0.10m^3 pour un mètre cube de béton soit un dosage en ciment de $314\text{Kg}/\text{m}^3$ de béton. Par rapport au dosage de $350\text{Kg}/\text{m}^3$ pris habituellement pour un béton courant, la différence n'est pas du tout négligeable. Effectivement, avec cette méthode de formulation, une économie de 36Kg de ciment par mètre cube de béton peut être gagnée.

CONCLUSION

La méthodologie proposée, même si incomplète à ce stade de l'étude, reste simple et permet l'optimisation d'un béton ordinaire avec de bonnes performances rhéologiques et mécaniques. En effet, à l'issue de cette expérimentation, la formulation par plan de mélange du béton ordinaire a permis de définir un domaine expérimental dans lequel des plans d'expériences ont été obtenus et ont donné des plans de mélanges présentant chacun des caractéristiques mesurables. Cette méthode de formulation, comparée aux autres méthodes, a réduit considérablement le nombre d'expériences laquelle implique un gain de temps et surtout un gain sur les matériaux. L'étude montre également que la variation de la quantité de chaque constituant donne des résultats très intéressants répondant aux critères imposés. D'après les résultats obtenus, une diminution de la quantité de chaque constituant a été détectée par rapport à la formulation de béton courant. Les tests d'écrasement des mélanges ont révélé une variation de la résistance à la compression en fonction du ratio de chaque constituant qui correspond aux études effectuées (Baron et Ollivier, 1996). Les résultats de cette étude serviront comme base à l'étude globale qui s'intéressera à l'optimisation de la substitution du ciment par des additions ultrafines ce qui permettra l'obtention de Béton à Haute Performance, notamment sur le plan de durabilité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Baron J., Olivier J. P. (1996). *Les bétons bases et données pour leur formulation*. Edition Eyrolles, Paris, 522 p.
- 2) Bolomey J. (1935). *Granulation et prévision de la résistance probable des bétons, travaux*. Edition Eyrolles, 19(30), 228-232.
- 3) El Barrak, Maher (2005). *Contribution à l'étude de l'aptitude à l'écoulement des bétons autoplaçants à l'état frais*. Toulouse : Université Paul Sabatier.
- 4) Georges Dreux, Jean Festa, (1998). *Nouveau guide du béton et de ses constituants*. Edition Eyrolles, 8ème Edition.
- 5) Goupy Jacques. (2000). *Plans d'expériences : les mélanges*. Dunod. Paris. 285 p. ISBN 2 10 004218 1.
- 6) Goupy, J. (2006), *Les plans d'expériences*, MODULAD.
- 7) Kamoun, Amel ; Chaabouni, Moncef et Bouaziz, Jamel. *Optimisation par plan de mélange de la formulation d'une pâte de carreaux de faïences*. Laboratoire de chimie Industrielle, Tunisie : Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax.
- 8) Multon, S. (2012). *Béton Armé, Eurocode 2*. Toulouse : Université Paul Sabatier.

- 9) Rakotomalala, J. L. (2011). *Une solution optimale de revêtement et d'assise de chaussée. Réalisation d'une planche d'essai de revêtement routier en BCR*. Madamines, ISSN 2220-0681, vol. 3.
- 10) Rakotomalala, J. L. (2011). *Avantages du béton compacté au rouleau dans les pays en développement : un nouveau revêtement de sol*. Madamines, ISSN 2220-0681, vol. 3.
- 11) Rakotomalala, J. L. (2012). *Opportunité du béton compacté au rouleau à Madagascar, 105*. Antananatovo : ESPA

