

**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



MINISTRE 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 Phovoltaïque 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, ANDRIANA HARISON 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., RANAIVONARIVO 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, RANAIVONARIVO Gabriely V.	389
Accessibilité des gares routières d'Antananarivo, analyses et stratégies d'amélioration	
RAMANITRARIVO 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 I

EFFET DE L'EAU SALEE SUR LES PROPRIETES GEOTECHNIQUES DES SOLS ROUTIERS

par

RANDRIATSIVA Mihamina Lala A.⁽¹⁾, RANDRIANA Nambinina R.⁽¹⁾
RANDRIAMALALA Tiana R.⁽²⁾, RANDRIANOELINA Benjamin⁽¹⁾

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

(2) Département Recherche et Matériaux, Laboratoire National des Travaux Publics et des Bâtiments (LNTPB)

RESUME

L'impact de l'eau de mer ou de l'eau salée a été étudié sur les opérations de compactage des sols, en vue de son application sur les travaux de construction routière dans les régions côtières de Madagascar. L'eau de mer pour l'étude a été collectée sur la côte Est, et les échantillons de sols ont été pris dans les zones côtières qui se trouvent au Nord et au Sud de Madagascar. Nous avons déterminé les essais de caractéristiques de compactage des sols : Proctor modifié et les caractéristiques de consolidation : la portance. Les résultats obtenus sont comparés à ceux trouvés avec l'eau de robinet. L'eau salée n'affecte pratiquement pas les caractéristiques de compactage de sol et la valeur de CBR (California Bearing Ratio) après immersion des sols à faible portance. Par contre, la teneur en eau optimale et la densité sèche maximale varient respectivement avec l'eau de mer pour les sols stabilisés et aussi dont le pourcentage de sable est élevé. En plus, son utilisation améliore peu la portance de ces sols. La salinité a une grande influence sur les propriétés de gonflement de CBR des sols ayant une quantité élevée de particules fines. Même si notre étude est limitée pour obtenir des résultats plus précis, on peut en conclure que l'utilisation d'eau saline pendant le compactage du sol peut être bénéfique dans certains projets, en particulier lorsque les travaux de construction sont proches de la mer.

Mots clés : Argile, eau de mer, CBR après immersion, gonflement, Proctor modifié

ABSTRACT

The impact of sea water or salt water has been studied on soil compaction operations with a view to its application to road construction works in the coastal regions of Madagascar. Seawater for the study is collected from the east coast, and soil samples are taken from the coastal areas north and south of Madagascar. We determined the tests of soil compaction characteristics : modified Proctor test, and the consolidation characteristics : CBR test. The results obtained are compared to those

found with tap water. Salt water hardly affects soil compaction characteristics and the value of CBR after submersion of low bearing soils. On the other hand, the optimal water content and the maximum dry density vary respectively with seawater for stabilized soils and also with a high percentage of sand. In addition, its use does little to improve the bearing capacity of these soils. Salinity has a great influence on the swelling properties of CBR in soils with a high amount of fine particles. Although our study is limited to obtain more precise results, it is concluded that the use of saline water during soil compaction may be beneficial in some projects, especially when construction works are close to the sea.

Keywords : Absorption, CBR test, clay, modified Proctor test, seawater

FINTINA

Ny fiantraikan'ny fampiasana ny ranomasina na ny ranontsira momba ny asa fampitambarana ny tany no tanjona amin'ity fianarana ity mba ho fampiharana izany amin'ny asa fanamboaran-dàlana any amin'ny faritra amoron-tsirak'i Madagasikara. Ny ranomasina nampiasaina dia nalaina tany amin'ny morontsiraka atsinanana, ary ny santionany amin'ny tany dia nalaina amin'ny morontsiraka avaratra sy atsimon'i Madagasikara. Ao anatin'izany dia nisy ny fijerana ny fiantraikan'ny rano masira teo amin'ny fitondran-tena ara-mekanika toy ny "Proctor", ny "portance CBR". Ny valin'ny fikarohana azo dia ampitahaina amin'ireo hita tamin'ny fampiasana rano fisotro. Tsy dia nahitana firy loatra ny fiantraikan'ny ranontsira teo amin'ny "Proctor" sy ny "CBR" ho an'ny tany izay hita fa ratsy. Nisy fiovana kosa ny fampiasana ny ranomasina teo amin'ny "Proctor" ho an'ny tany izay nohatsaraina na efa nanana tahana fasika ambony. Nahitana fahatsarana kely ihany koa ny "CBR" ho an'ireo tany farany ireo. Ny fahamasinan'ny rano dia nisy fiantraikany lehibe teo amin'ny amin'ny toetran'ny fivontosan'ny "CBR" amin'ny tany izay tsy manana taha ambony amin'ny fasika. Fehiny, na dia misy fetrany aza ity voka-pikarohana ity ka tokony mbola hihitatra mba ahazoana valiny mahafapo, dia azo ambara fa azo am-piasaina tsara amin'ny fanamboaran-dàlana ny rano masira indrindra any amin'ny faritra amoron-tsirak'i Madagasikara.

INTRODUCTION

Les caractéristiques géotechniques des matériaux utilisés dans certaines activités de construction telles que les routes, les barrages, etc. ont été clairement présentées par la réglementation et les normes internationales. Pourtant, il n'y a pas de règle appropriée aux caractéristiques de l'eau utilisée dans les travaux de construction associés aux matériaux du sol. En effet, l'eau potable a généralement pour rôle de fournir l'humidité nécessaire au traitement des sols en construction que ce soit au

laboratoire ou bien sur le chantier. Cependant, lorsque l'eau utilisée n'est pas potable, il est nécessaire d'envisager la caractérisation comportementale de ces sols avec cette eau tout en comparant les résultats avec l'eau potable. Dans certains pays du monde (Inde, Iran, ...) et aussi dans les régions désertiques (Sahara, en Mauritanie, ...), l'utilisation de l'eau salée a été entamée dans les traitements des sols afin d'étudier son effet sur les caractéristiques géotechniques des grains de sols. Cet article présente l'impact de l'eau de mer ou de l'eau salée sur les opérations de compactage des sols en vue de son application sur les travaux de construction routière dans les régions côtières de Madagascar. Il y a, dans ces régions, un grand intérêt à minimiser autant que possible le coût de transport des matériaux et de pompage de l'eau. En effet, les eaux douces et les eaux potables sont difficiles à trouver surtout dans les régions Sud du pays qui sont même actuellement sévies par la sécheresse. Cette difficulté d'accès à l'eau ne fait que rehausser le coût de la construction alors que Madagascar, située dans l'Océan Indien, est une île entourée de la mer. L'objectif principal est donc de valoriser l'eau de mer ou l'eau salée en étudiant la possibilité de son utilisation en tant qu'eau de compactage des matériaux de couche de fondation des routes. Cette étude contribue sans doute à aider le pays à relever l'une des objectifs de développement durable qui consiste à « garantir l'accès de tous à l'eau et à l'assainissement et assurer une gestion durable des ressources en eau ».

Revue de littérature

Plusieurs études ont été menées dans le passé sur l'effet de la salinité de l'eau sur les propriétés géotechniques des sols. Certains de ces résultats sont résumés dans le Tableau 1.

Ces études ont été effectuées sur une variété de types de sols dans différents endroits géographiques, en utilisant de l'eau de différentes concentrations de sel surtout de l'eau à haute salinité. Ainsi, on constate une certaine divergence dans les résultats. Pourtant, la majorité de ces résultats correspondent à une augmentation de DSM (Densité sèche maximale), une diminution de TEO (Teneur en Eau Optimale), une diminution du gonflement et de la portance sauf pour le CBR immédiat.

Tableau 1 : Résumé de la revue de la littérature

Propriété	Sol	Eau utilisée	Effet de la salinité de l'eau	Référence
Caractéristiques de compactage	Sables limoneux	Eau douce, eau de la mer Morte (503 g/L)	- Diminution de TEO - Augmentation de DSM	Alainachi et Alobaidy (2010)
	-argile -sable + argile	Eau douce, eau de la mer Morte (330g/L)	Diminution de DSM	Mahasneh (2004)
	Sable-gravier/argile	Eau douce, eau du lac Urmieh (346 g/L)	- Diminution de TEO - Augmentation de DSM	Azadi et <i>al</i> (2008)
	Argile	Eau de robinet, eau de la rivière, eau de la mer	Peu d'influence sur DSM	Campbell et <i>al.</i> (2009)
	Sable, tuf, et grave sahariens	Eau salée à différents teneurs en sel (entre 0 à 50 g/l)	Peu d'influence sur TEO et DSM	Ben Dhia (1998)
Résistances des sols	Sable-gravier/argile	Eau douce, eau du lac Urmieh (346 g/L)	Augmentation significative des valeurs CBR	Azadi et <i>al</i> (2008)
	Sols expansifs	Eau de robinet, eau de mer de la baie de Bengale	Augmentation de la valeur CBR immédiat	Arumairaj et Sivajothi (2011)
	Argile	Eau de robinet, eau de la rivière, eau de la mer	Pas d'influence sur le CBR immédiat	Campbell et <i>al.</i> (2009)
	Sable, tuf, grave sahariens	Eau salée à différents teneurs en sel (entre 0 à 50 g/l)	Diminution de la portance	Ben Dhia, BLPC (1998)
Gonflement	Argiles Argile + sable	Solution saline	Diminution du taux de gonflement	Lamara et <i>al.</i>
	-Argile	Solution saline (NaCl)	Réduction de gonflements	Hachichi et Fleureau (1999)

Cas de Madagascar

A Madagascar, Randriamalala T. et *al.* (2015) ont étudié l'influence de la salinité de l'eau sur le compactage des sols. Dans cette étude, il s'agit de déterminer l'impact de l'eau de mer de la côte Est de Madagascar et de l'eau salée à différents teneurs respectivement sur les matériaux de type limono-argileux de la région Est et Nord-Ouest de Madagascar. Les résultats trouvés ont révélé que l'effet de l'eau de mer n'affecte pratiquement pas les caractéristiques de compactage (Figure 1 et Figure 2).

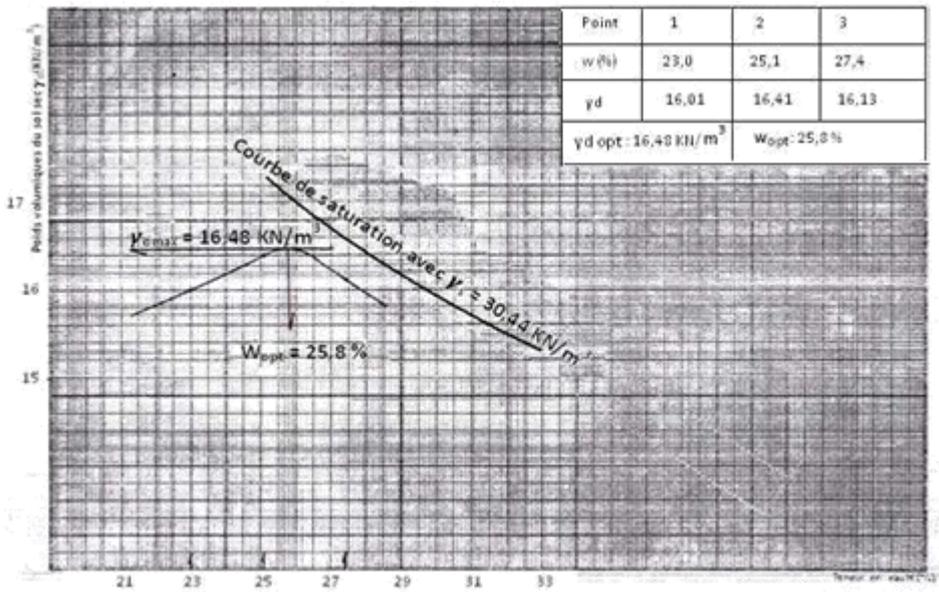


Figure 1 : Courbe de compactage de sol limono-argileux utilisant l'eau potable (Randriamalala et al., 2015)

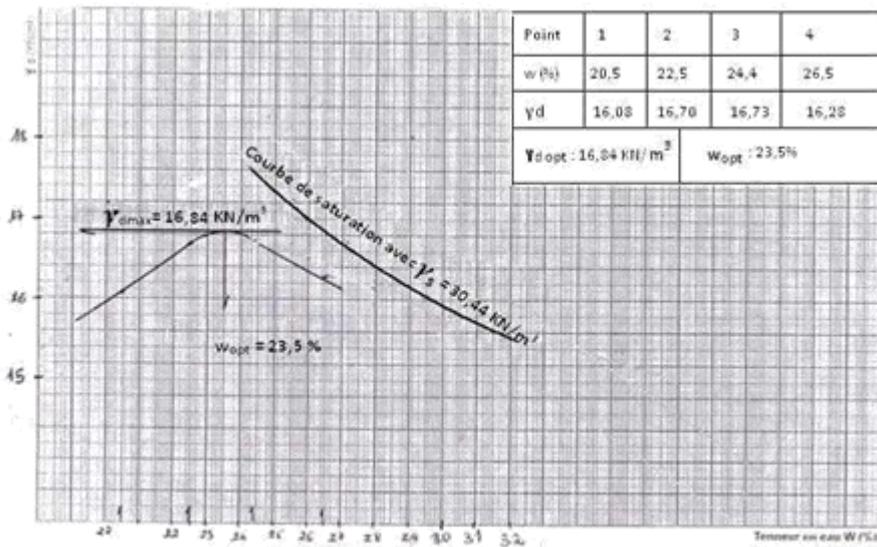


Figure 2 : Courbe de compactage de sol limono-argileux utilisant l'eau de mer (Randriamalala T. et al., 2015)

Tandis que les résultats déduits de la portance ont donné que celle-ci diminue et devient faible avec augmentation de la salinité et utilisation de l'eau de mer (Figure 3). L'effet est beaucoup plus considérable lorsque le pourcentage des particules fines surtout argileuses du sol est élevé du fait de la sensibilité de l'argile à l'eau saline.

Dans le cas contraire, les portances sont toujours acceptables pour les sols avec des quantités de sables non négligeables.

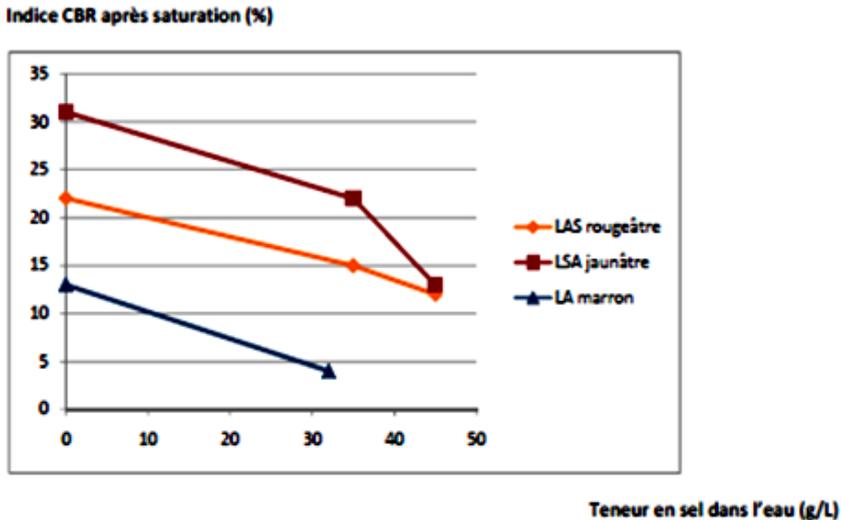


Figure 3 : Effet de la salinité sur la portance après saturation (Randriamalala T. et *al.*, 2015)

Il a été ainsi conclu que l'eau salée ou bien l'eau de mer à une teneur en sel autour de 32 g.l⁻¹ ou bien ne dépassant pas 35 g.l⁻¹ n'affecte pas d'une manière sensible, les caractéristiques géotechniques des matériaux du corps de chaussée.

Les résultats de cette revue peuvent être utilisés à des fins de comparaison avec ceux trouvés dans la présente étude.

MATERIELS ET METHODES

Eau de compactage

A part l'eau de robinet du laboratoire considérée comme eau de référence, les deux autres types d'eau utilisée dans les mélanges des matériaux du sol sont : l'eau saline et l'eau de mer.

L'eau saline de NaCl, la plus discutée dans la littérature, est considérée comme le mélange de l'eau de robinet du laboratoire avec de gros sels de cuisine et est préparée en choisissant deux teneurs en sel : 35g/L pour se référer à la moyenne de la teneur en sel de l'eau de mer et 45 g/L pour prendre la valeur extrême.

L'eau de mer a été prise à Tamatave, partie Est de Madagascar, placée dans des récipients fermés et conservée dans le laboratoire à température ambiante.

Le pH et les concentrations ioniques (mg.kg⁻¹) découvertes lors d'une analyse chimique de l'eau de robinet et l'eau de mer au laboratoire chimique du LNTPB sont donnés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Résultats des analyses chimiques de l'eau de robinet et l'eau de mer

Type d'eau	pH	Ca ⁺⁺	Na ⁺	Mg ⁺⁺	SO ₄ ⁻	SO ₃ ⁻	Cl ⁻	Sels dissous
Eau de robinet	6,8	2,95	-	-	1,52	0,18	-	4,65
Eau de mer	6-7	417,26	4566,98	1 312,25	2 914,53	-	20 620,53	30 741,55

Avec un pH entre 6 à 7, l'eau de mer a un caractère acide en conséquence des rejets liés à l'activité humaine, vu qu'elle a été prélevée en zone confinée portuaire.

Sols

Les échantillons de sols ont été pris non loin des routes nationales en zone côtière. A l'aide d'une machette, ils sont recueillis dans des sacs en plastique et envoyés au laboratoire pour être testés afin de déterminer leurs caractéristiques d'identification qui sont :

- teneur en eau (Norme Française P 94-050)
- poids volumique spécifique (NF P 94-054)
- analyse granulométrique par tamisage (NF P18-560)
- analyse granulométrique par sédimentométrie (NF P94-057)
- limites d'Atterberg (NF P94-051)
- équivalent de sable (NF P 18-598)
- valeur au bleu (NF P94-068)

Les types de sols utilisés sont prélevés dans 4 zones différentes : Mahajanga, Vohémar, Toliara et Manakara (indiquée sur la Figure 4)



Figure 4 : Localisation des zones d'études

Le sable

Pour la stabilisation, nous avons choisi d'utiliser un sable de Toliara dont les caractéristiques sont présentées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Propriétés du sable

Propriétés	Valeurs
Poids volumique spécifique	2,79 g/cm ³
Equivalent de sable	77 %
Module de finesse	2,48

Etude expérimentale

Elle consiste à étudier respectivement l'effet de l'eau saline et celui de l'eau de mer :

- sur les caractéristiques de compactage : la teneur en eau optimale TEO, la densité sèche maximale (DSM)
- sur les caractéristiques de consolidation : taux de roulement californien des sols à l'état naturel et à l'état stabilisé.

Les tests de compactage : l'essai Proctor modifié est réalisé conformément à la norme [NF P 94 – 093] en utilisant séparément, pour la préparation du matériau, les trois types d'eau sur le sol passant au tamis 20 mm (module AFNOR)

Les tests de consolidation : pour les trois types d'eau considérés, le taux de roulement californien a été obtenu par l'indice portant CBR après immersion (NF P 94 078). Pour ce faire, les matériaux des sols ont été amené à leur TEO retrouvée respectivement à l'essai « Proctor modifié », à une énergie de compactage 25 coups/couche. Ils sont ensuite immergés dans un bac, contenant le même type d'eau de compactage, pendant 4 jours.

Codification

Comme les travaux expérimentaux contiennent des études différentes, il convient d'adopter un système de codification afin de faciliter la lecture de travail : les types de sol étudiés sont codifiés à partir de l'observation visuelle de sol et sont désignées par un groupe de lettres majuscules correspondant à la première lettre des noms de leurs constituants élémentaires à l'exception des sols latéritiques codifiés par LAT, et à celle de leurs lieux de provenance dont les deux sont séparées par un trait. À la fin, les teneurs en sel sont notées en indice tandis que l'eau de robinet et l'eau de mer sont respectivement désignées par « e » et par « m ». Ensuite, le système de codification utilisé pour la stabilisation du sol est suivi par la première lettre du constituant à ajouter

dans le mélange et par un chiffre en indice qui représente le taux en pourcentage de poids sec contenu dans le mélange.

Tableau 4 : Désignation des codifications

Codification	Désignation
LA-V ₀ , LA-V ₃₅ et LA-V ₄₅	Sol limono-argileux de Vohémar compacté respectivement avec de l'eau de salinité 0g/L (l'eau de robinet), de 35g/L et de 45 g/L.
AL-M ₀ , AL-M ₃₅ et AL-M ₄₅	Sol argilo-limoneux de Mahajanga compacté respectivement avec de l'eau de salinité 0 g/L, (l'eau de robinet), de 35g/L et de 45 g/L.
SL-T-S ₃₀	Sol sablo-limoneux de Toliara stabilisé par ajout de 30 % de sable
LAT-M-S ₁₅	Sols latéritiques de Manakara stabilisés par ajout granulaire de 15% de sable

RESULTATS

Caractéristiques géotechniques des sols

Les résultats des caractéristiques d'identification des sols sont résumés dans le Tableau 5 et la distribution granulométrique est illustrée par la Figure 5.

Tableau 5 : Récapitulatif des résultats des caractéristiques géotechniques des sols étudiés

Propriétés	AL-M	LA-V	SL-T	LAT-M
Poids volumique spécifique (g/cm³)	2,54	2,78	2,73	3,02
Teneur en eau naturelle (%)	14,6	3,6	4,8	12,2
Valeur au bleu (g/100g)	1,2	1,1	1,6	0,6
Equivalent d sable (%)	-	-	61	-
Résultats des analyses granulométriques				
% de particules fines (< 80 μm)	85	73	37	59
% gravier	2	2	8	12
% sable	35	38	61	60
% limon	50	45	-	20
% argile	12	15	-	8

Limites d'Atterberg				
Limite de liquidité (%)	76	51	31	33
Limite de plasticité (%)	44	29	19	20
Indice de plasticité (%)	32	22	12	13
Classification des échantillons				
Classe GTR	A3	A2	A1	A2

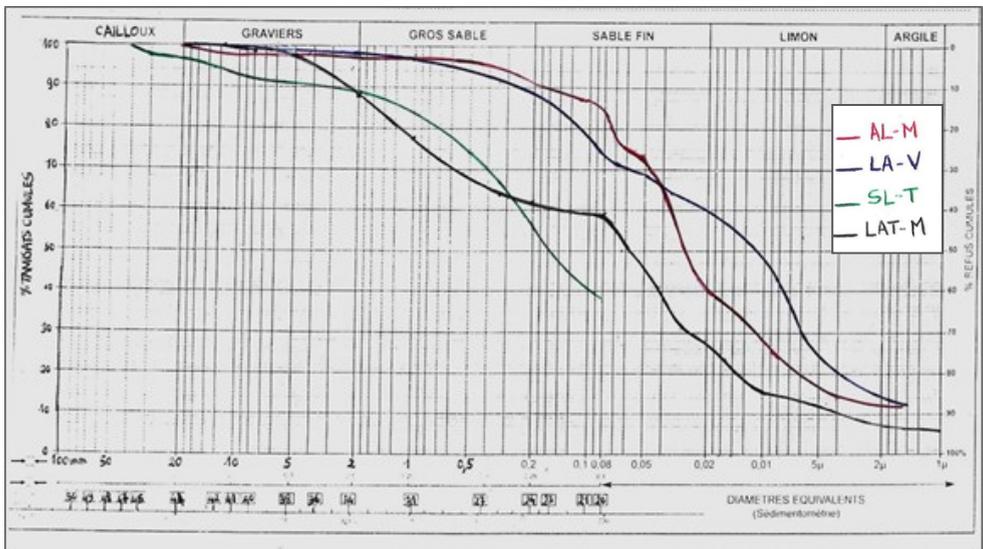


Figure 5 : Distribution granulométrique des quatre types d'échantillon

Effet de la salinité de l'eau sur les caractéristiques de compactage

Tableau 6 : Caractéristiques de compactage respectives de AL-M et de LA-V avec de l'eau salée à différentes teneurs

Type de Sol	AL-M ₀	AL-M ₃₅	AL-M ₄₅	LA-V ₀	LA-V ₃₅	LA-V ₄₅
TEO w_{opt} (%)	23,5	24,6	24,8	17,0	17,4	17,7
DSM γ_{dmax} (KN/m ³)	14,8	14,5	14,7	18,6	18,8	18,5

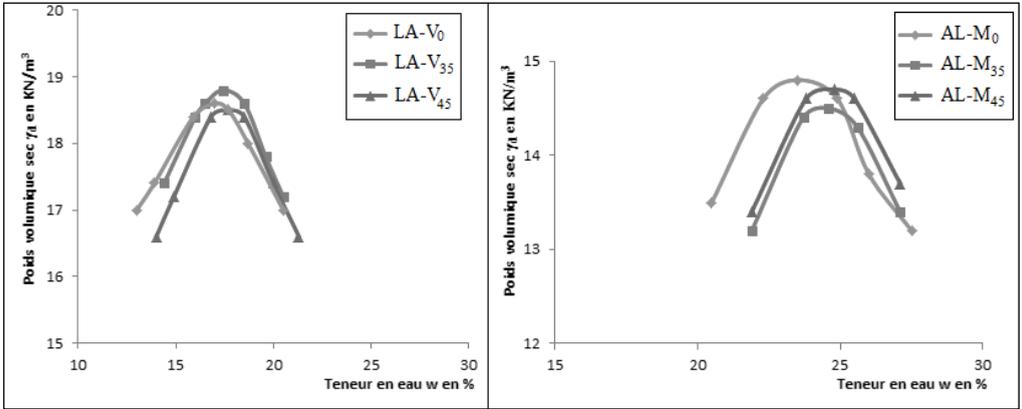


Figure 6 : Courbe Proctor modifié de LA-V (à gauche) et de AL-M (à droite) en utilisant les différentes teneurs en sel.

Tableau 7 : Caractéristiques de compactage respectif des sols SL-T et de LAT-M mélangés à la fois avec de l’eau de robinet et de l’eau de mer à l’état naturel et à l’état stabilisé

Type de sol	SL-T		SL-T-S ₃₀		LAT-M		LAT-M-S ₁₅	
	Eau	Mer	Eau	Mer	Eau	Mer	Eau	Mer
Eau de compactage	Eau	Mer	Eau	Mer	Eau	Mer	Eau	Mer
TEO w_{opt} en %	13,4	13,6	9,4	9,6	15,3	16,9	14,8	14,5
DSM $\gamma_d max$ (KN/m ³)	19,5	19,4	20,10	19,30	19,9	19,6	21,4	20,3

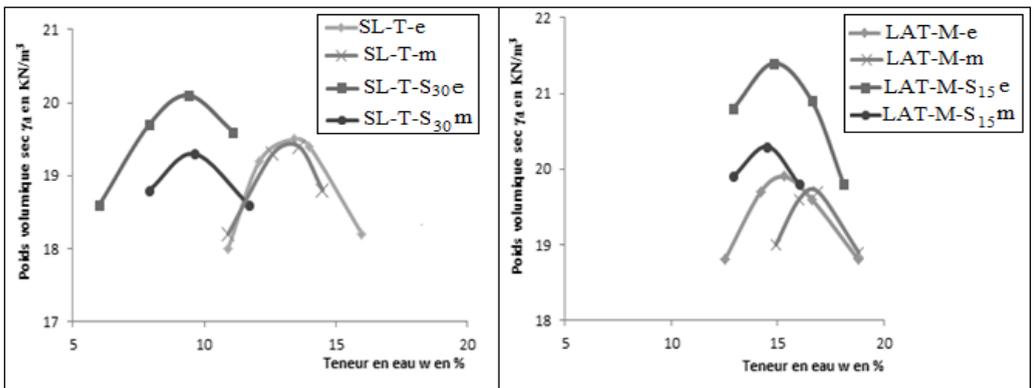


Figure 7 : Courbe Proctor modifié de SL-T (à gauche) et de LAT-M (à droite) mélangé à la fois avec de l’eau de robinet et de l’eau de mer à l’état naturel et à l’état stabilisé

Effet de la salinité de l'eau sur les caractéristiques de consolidation

Tableau 8 : Résultats de la mesure du gonflement et des tests CBR après immersion des sols AL-M et LA-V en utilisant des différents teneurs en sels

Type de Sol	AL-M ₀	AL-M ₃₅	AL-M ₄₅	LA-V ₀	LA-V ₃₅	LA-V ₄₅
Gonflement (en %)	3,38	3,54	2,33	2,72	2,31	3,66
ICBR (en %)	4	5	4	3	4	3

Tableau 9 : Résultats de mesure du gonflement et des tests CBR de SL-T en utilisant à la fois de l'eau de robinet et de l'eau de mer à l'état naturel et à l'état stabilisé

Type de sol	SL-T		SL-T-S ₃₀		LAT-M		LAT-M-S ₁₅	
	Eau	Mer	Eau	Mer	Eau	Mer	Eau	Mer
Eau de compactage et d'imbibition								
Gonflement relatif (en %)	0,55	0,65	0,40	0,42	0,12	0,11	0,08	0,06
ICBR	16	18	33	25	16	20	31	24

DISCUSSION

Caractéristiques géotechniques

Selon le guide pour une classification des matériaux routiers (GTR, 1992), le diamètre maximal de tous les échantillons, d'après le Tableau 5, est inférieur à 50 mm et la proportion de tamisât à 80 µm est tous supérieure à 35 %. Les échantillons des sols étudiés sont donc classés dans la catégorie des sols fins A. Du point de vue argilosité, avec un indice de plasticité (Ip) compris entre 12 et 25, à l'exception de celui de AL-M (32%), les sols sont classés moyennement argileux.

Effet de l'eau salée/ eau de mer sur les caractéristiques de compactage

Les résultats de l'eau salée sur les caractéristiques de compactage (Tableau 6) ne sont pas différents de ceux trouvés dans la littérature (Randriamalala T. et *al*, 2015, Campbell N. et *al*, 2009, Ben Dhia, 1998). L'effet est relativement faible, il n'y a pas de différences distinctes entre les courbes (Figure 6) : les valeurs des TEO de AL-M et de LA-V varient respectivement entre 23,5 à 24,8 %, et 17 à 17,7 %, tandis que celles des DSM entre 14,5 à 14,8 KN/m³ et 18,5 à 18,8 KN/m³. La tolérance de 2% est autorisée pour la TEO et la différence entre le plus élevé et le plus bas de DSM est

inférieure à 5%, quantité inférieure à la tolérance autorisée. En effet, le sol n'est pas saturé et ainsi il n'y a pas d'interaction libre entre les particules de sol et les sels dans l'eau. Les petits changements peuvent être liés au pourcentage d'argile élevé (supérieur à 10 %) des deux types de sols. Selon l'une des théories de l'effet double couche sur les propriétés de l'argile, la double couche diffuse influence l'argile en suspension mais elle n'influence pas les propriétés géomécaniques de l'argile compactée (Schmitz, 2006). On peut attribuer aussi la différence des résultats trouvés dans cette étude à ceux décrits dans la majorité de la littérature, par la concentration de sel dans l'eau qui est très faible par rapport à celle mentionnée dans la littérature qui atteint jusqu'à 300 g/L et même plus de 500 g/L (mer Morte).

Sur les tests de compactage des sols stabilisés (Tableau 7), si certains auteurs (Azadi *et al.*, 2008) ont rapporté une diminution de TEO et une augmentation de DSM, nos résultats ont montré que les valeurs des TEO diminuent clairement quelle que soit l'eau utilisée à cause de fortes concentrations de sable. À l'état naturel, la valeur de DSM de SL-T est de 19,5 KN/m³ avec l'eau de robinet alors que celle-ci devient 19,3 KN/m³ à l'état stabilisé avec l'eau de mer. Pour le type de sol LAT-M, par rapport à son état initial, la valeur de DSM augmente quelle que soit l'eau utilisée mais le niveau est relativement faible avec l'eau de mer. Ces résultats confirment que la stabilisation avec ajout de sable a eu lieu lors de traitement avec l'eau de mer : le mélange stabilisé a une densité sèche maximale inférieure à celle d'un sol non stabilisé pour un degré de compactage donné (Sherwood, 1993)

Effet de l'eau salée sur les caractéristiques de consolidation

D'après le tableau 8, la portance de AL-M et LA-V, quelle que soit la teneur en sel de l'eau de compactage et de l'immersion, est mauvaise à cause du taux élevé des limons et des argiles. L'effet considérable de l'eau salée sur ces sols, repose sur la mesure du gonflement après immersion. Les valeurs sont clairement supérieures à 2%. Ces deux types de sol ne doivent pas être directement utilisés dans les terrassements routiers mais nécessitent une amélioration de leur constituant granulaire en étant mélangé avec d'autres constituants, comme le sable.

Par contre, la portance des sols SL-T et de LAT-M s'est améliorée avec l'eau de mer (Tableau 9) en passant respectivement de 16 à 18 % et de 16 à 20 %. Ceci peut être dû au faible taux des particules fines de ces sols. En plus, la stabilisation de ces sols par augmentation des concentrations de sable selon leur proportion respective, renforce la portance avec l'eau de mer : celle-ci devient respectivement 25 et 24 %. Pourtant, le niveau est légèrement en baisse avec l'eau de mer par rapport à l'eau de robinet. Ainsi, on peut dire que la stabilisation a eu lieu mais la liaison également formée entre les particules par soluté dans l'eau et la sédimentation des cristaux de sel dans les pores du sol n'a pas pu empêcher la dilatation en raison de l'immersion. Dans les études antérieures (Azadi *et al.*, 2008, Arumairaj et Sivajothi, 2011, Alainachi et

Alobaidy, 2010), il est démontré que le CBR de sol, sans l'immersion, augmente de manière significative en ajoutant de l'eau salée dans le compactage. Cependant, comme la portance est rarement atteinte quand les matériaux subissent une immersion, le trempage avec l'eau salée diminue la résistance, comme prévu non seulement grâce à la littérature (Randriamalala T. *et al.*, 2015) (Ben Dhia, 1998) (Campbell N. *et al.*, 2009). Cependant, dans notre étude, la diminution est tolérable : les valeurs trouvées avec l'eau de mer pour le cas de SL-T-S₃₀ et LAT-M-S₁₅ (Tableau 9) sont nettement à un niveau élevé supérieur à 15 %, limite de l'indice portant CBR après 96 h d'imbibition, d'après le GTR, pour la construction des couches de formes. De même pour la mesure du gonflement : nettement inférieur à 1% pour les deux types de sol. Ainsi, ces derniers stabilisés remplissent les conditions de GTR, et peuvent être utilisés en tant que matériaux de remblai et comme couche de forme pour la construction routière tout en utilisant l'eau de mer.

CONCLUSION

Le but de cette étude est de voir les effets de l'intrusion de l'eau de mer sur le comportement géotechnique des sols concernant la caractéristique de compactage, la caractéristique de consolidation. Les conclusions suivantes peuvent être tirées.

L'ajout de sel à l'eau d'essai n'a pas eu d'influence majeure sur les caractéristiques de compactage des sols testés à l'état naturel. L'effet est très faible et dans la tolérance autorisée sur la TEO et la DSM. A l'état stabilisé par ajout granulaire de sable, l'utilisation de l'eau de mer, par rapport à l'utilisation de l'eau de robinet et à l'état initial des sols, a généré une nette diminution de la TEO et une légère augmentation de la DSM de ces sols.

Nos tests CBR après immersion des sols stabilisés par ajout granulaire de sable ont donné une diminution avec l'eau de mer par rapport à l'eau de robinet mais une augmentation par rapport à leur état initial. Pourtant, il est démontré que le CBR des échantillons de sol reste à un niveau élevé lorsque le pourcentage de particules fines est négligeable avec une teneur en argile aussi faible que 10 %. C'est ainsi que l'effet considérable de l'utilisation de l'eau salée repose sur les propriétés de gonflement des sols sauf pour ceux des sols ayant des quantités non négligeables de sables.

Sur la base de la littérature publiée et des résultats de cette étude, il semble que l'utilisation d'eau saline pendant le compactage du sol peut être bénéfique dans certains projets, en particulier lorsque les travaux de constructions sont proches de la mer de Madagascar. Cependant, des études devraient être menées pour déterminer les directives de limitation de l'eau saline dans les travaux de constructions routières.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Abbasi, N., Oveysiha, M. and Movahedan, M. (2013). Investigating the impact of pore water salinity on the consolidation and compaction behavior of clayey soils, In *Journal of Agricultural Engineering*, No.3, 67-82.
- 2) Alainachi, I. H., and Alobaidy, G. A. (2010). The effects of Basra Gulf salt water on the proctor compaction and CBR test results of soil samples at Baniyas City, Abu Dhabi, UAE. In *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15 A, 1–17.
- 3) Al-Obaidi A., Ihssan A., Allawi H. (2018). *Studying of the combined salts effect on the engineering properties of clayey soil*, MATEC Web of Conferences 162, 01011, BCEE-2017.
- 4) Amar Prit Singh Arora¹, Koushik Das, Debankar Sengupta and Joyanta Maity (2018). Effect of sea water on the geotechnical properties of Cohesive soil, In *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 5(5).
- 5) Anandhanarayanan, G. and Murugaiyan, V. (2014). Effects of Salt solutions and Sea Water on the geotechnical property of soil. In *International Research Journal of Engineering and Technology*, IJERT, 3(3), march-2014.
- 6) Arumairaj D., Sivajothi A. (2011). Effect of Sea Water on Expansive Soils, In *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 15.
- 7) Azadi, M.R.E., (2008). The effects of Urmieh Lake salt water on the proctor compaction and CBR test results of a well graded gravel-sand mixed with clay (GSCW) soil samples. In *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, 15, 1-15.
- 8) Ben Dhia M. (1998). Quelques particularités de l'utilisation du sable de dune en construction routière en milieu saharien, In *Bulletin des Laboratoires des Ponts et Chaussées* 213-Jan-Fév, Réf 4159, p.33-42.
- 9) Campbell, N., Look, B., and Atamadja A. (2009). An investigation into the effect of salt water on the geotechnical properties of a residual clay, In *Australian Geomechanics*, 44(1), 19-28.
- 10) Jeffery D. Waller, William A. Kitch, (2014). Use of Saline Water in Compaction of Engineered Fills. In *Conference Paper in Geotechnical Special Publication*. February 2014
<https://www.researchgate.net/publication/261287271>
- 12) Mahasneh, B.Z. (2004). Dead Sea water as improving agent. In *Electronic Journal of Geotechnical Engineering*, Vol. 9.
- 13) Mansouri H., Ajalloeian R. and Sadeghpour A. (2013). The Investigation of Salinity Effects on Behavioral Parameters of Fine-Grained Soils. In *International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering*, 38.
https://scholarsmine.mst.edu/icchge/7icchge/session_06/38

- 14) Randriamalala, T., Randriana, N., Rakotonirina, H., Ramaroson, J., Randrianarivelo, F., Zolimboahangy, R. (2015). Etude de l'influence de la salinité de l'eau de compactage sur les caractéristiques géotechniques du sol routier. In *MadaRevues*, MADA-HARY, ISSN 2410-0315, 4.

ETUDE DES COMPORTEMENTS THERMIQUES DE REVETEMENTS DU SOL EXPOSES AU RAYONNEMENT SOLAIRE

par

RANDRIAMANAMPISOA Pierre Bénilde⁽¹⁾, RAHELIARILALAO Bienvenue⁽²⁾

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

(2) Professeur Titulaire, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

La minéralisation des espaces urbains et la réduction des espaces verts contribuent à la modification des conditions climatiques dans les villes. L'augmentation de la température pendant la saison chaude est révélatrice de ce phénomène dans les quartiers où des espaces verts sont remplacés par des revêtements du sol. La nature des matériaux utilisés et plus particulièrement, leurs propriétés thermiques radiatives, influencent la variation de la température moyenne radiante. Nos travaux d'investigation portent sur différents revêtements du sol et se focalisent sur leur comportement thermique vis-à-vis du rayonnement solaire. L'objectif de cette étude est d'identifier ceux qui procurent le meilleur confort thermique aux utilisateurs. L'approche méthodologique combine des mesures in situ, des modélisations et des simulations. Les mesures in situ permettent de collecter en même temps les données climatiques de la zone d'étude et la température de surface de divers revêtements et pavés. Les dispositifs utilisés sont une mini station météo et un thermomètre à infra-rouge. Le rayonnement solaire est estimé à partir d'un modèle programmé dans Python. Les résultats indiquent que la température superficielle du béton bitumineux est supérieure à celle du groupe de produits constitués par le pavé travertin, le pavé ajouré et le béton courant. Pour les rayonnements solaires élevés, la différence peut dépasser 15°C. Le béton bitumineux constitue une source d'îlot de chaleur notable pendant la saison chaude.

Mots clés : Béton bitumineux, Propriétés physiques, Propriétés thermiques radiatives, Température de surface

ABSTRACT

The mineralization of urban spaces and the reduction of parks contribute to the modification of climatic conditions in cities. The temperature rise during summertime reveals this phenomenon in neighborhoods where green parks are replaced by pavements. The nature of the used materials and particularly their radiative thermal

properties influence variation of the average radiant temperature. Our investigation concern different types of pavements, and it is focused on their thermal behavior with the solar radiation. The purpose of this study consists in identifying those which give the best thermal comfort to the users. The methodological approach combines in situ experiments, modeling and simulations. In situ measurements provide at the same time climatic data in the area under study and surface temperature of coatings and pavements. A weather station and an infrared thermometer were used to carry out the investigations. The solar radiation is estimated from a model programmed in Python. The results indicate that the surface temperature of asphalt concrete pavement is higher than that of travertin paver product group, previous paver, and concrete. For high solar irradiation, the difference can exceed 15°C. The asphalt concrete is a significant heat island source during summertime.

Key words : Asphalt concrete, Physical properties, Radiative thermal properties, Surface temperature

INTRODUCTION

Notre recherche s'inscrit dans le cadre du confort thermique de l'habitat. Les exigences techniques et mécaniques dictent avant tout le choix des matériaux de construction. Et pour arriver à un certain de degré de confort, plusieurs moyens peuvent être mis en œuvre tels l'isolation et/ou l'orientation. En ce qui concerne les places publiques, lieux de rassemblement par excellence et de circulation, les contraintes revêtent d'autres aspects comme l'esthétique. Le confort thermique de l'individu est occulté. Selon leurs propriétés thermiques, en milieu urbain, les matériaux utilisés peuvent contribuer au développement d'îlots de chaleur. Pour assurer un environnement agréable au niveau d'un espace public ouvert, il faut prendre en considération le climat. Il dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la température, l'état hygrométrique de l'air, le vent au voisinage du sol, la nébulosité et l'ensoleillement. Les éléments du climat suscités peuvent être modérés ou amplifiés en fonction des éléments artificiels tels que les matériaux utilisés, la couleur, la texture, la géométrie ainsi que les éléments naturels tel que la végétation. De ce fait, le choix des matériaux pour les revêtements du sol constitue un paramètre très important. Quels sont donc les plus adéquats pouvant donner une meilleure qualité de confort ? Ce travail a pour objectif d'identifier les matériaux utilisés pour les revêtements du sol qui procurent le meilleur confort thermique à l'individu. L'étude consiste à comparer 5 types de revêtements du sol exposés aux conditions climatiques de deux localités de la ville d'Antananarivo, leur influence sur la modification du microclimat dans l'environnement immédiat de la surface pavée. La méthodologie combine des simulations et des expérimentations in situ sur des cellules de mesure.

MATERIELS ET METHODES

Sites d'étude

La ville d'Antananarivo se trouve entre 18°54'49'' Sud de latitude et 47°32'10'' Est de longitude. Du point de vue administratif, elle est subdivisée en 6 arrondissements qui totalisent 192 fokontany. Située dans la zone Sud de la région Analamanga, Antananarivo Renivohitra est limitée par les districts d'Ambohidratrimo, Antananarivo Avaradrano et Antananarivo Antsimondrano.

Ce travail est réalisé dans la ville d'Ambohidratrimo et Antananarivo Antsimondrano (Vontovorona) dans des espaces ouverts et en environnement naturel. La figure 1 présente la carte de localisation des zones d'étude.

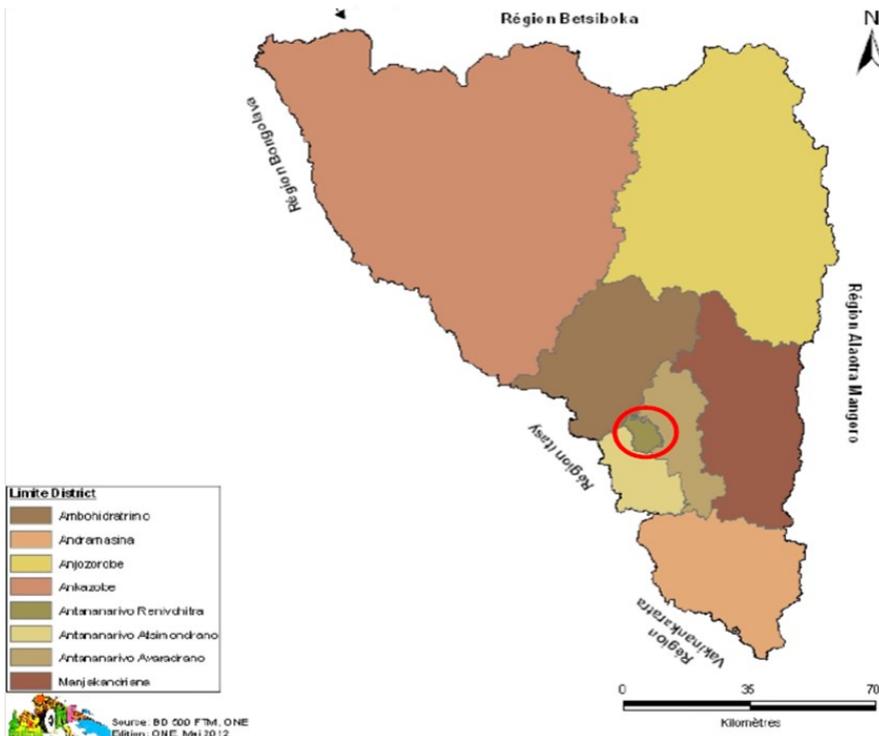
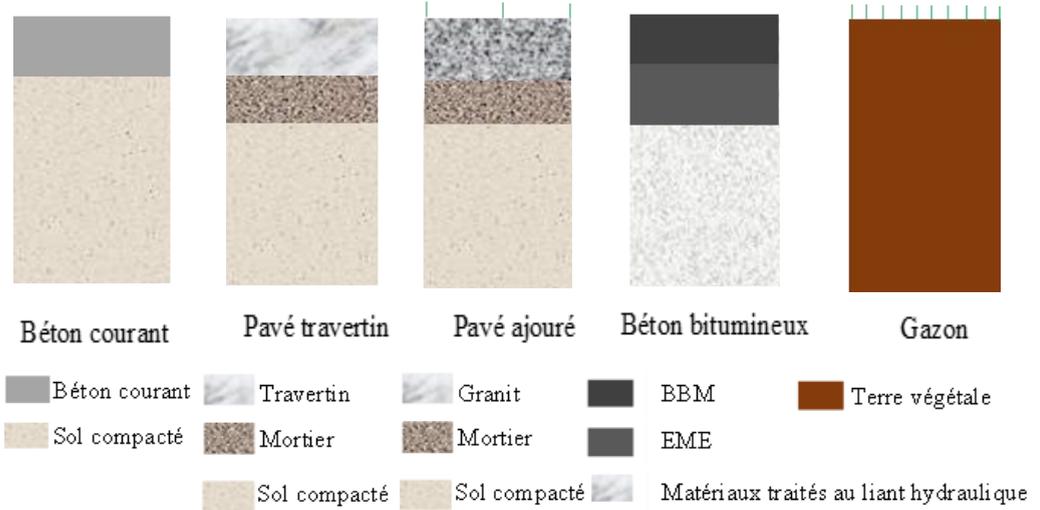


Figure 1 : Carte de localisation des zones d'étude

Protocole expérimental

Les expérimentations sont menées sur des sols pavés déjà installés dans ces deux sites. Elles ont été réalisées durant les mois de février et mars 2020. Les pavés sont montés sur les couches de base et jointoyés suivant les techniques propres à chaque structure. Les séries d'expérimentation consistent à suivre l'évolution de la température de leur surface et celle des données climatiques dont la température de l'air ambiant pendant une partie de la journée.

La Figure 2 représente les structures de revêtements retenus pour l'expérimentation.



BBM : Béton Bitumineux Mince
 EME : Emulsion à Module Elevé

Figure 2 : Structures de revêtements retenus pour l'expérimentation

Dispositifs expérimentaux

Afin d'étudier la performance thermique de ces revêtements, les températures de surface sont relevées par un thermomètre infrarouge. Les données climatiques sont relevées par une mini-station météo. Ils sont représentés par la Figure 3 et la Figure 4.



Figure 3 : Thermomètre infrarouge

Figure 4 : Mini-station météo

Cet ensemble permet de recevoir et d'afficher :

- La température intérieure et extérieure ;
- Le taux d'humidité ;
- Les prévisions météo (ensoleillé, nuageux, pluvieux, orageux) ;
- La vitesse du vent et sa direction ;
- La hauteur des précipitations ;
- L'indice de UV et de la chaleur.

La Figure 5 montre le thermomètre infrarouge qui capture la température de surface de revêtement du sol.



Figure 5 : Thermomètre infrarouge

La Figure 6 montre la mini station météo installée au-dessus de la surface de revêtement du sol à une hauteur de 1m.



Figure 6 : Installation de mini station météo sur le pavé travertin

Formules et modèles utilisés

De nombreuses étapes sont nécessaires pour pouvoir estimer le potentiel solaire d'une région. Il s'agit ici d'une estimation. Le modèle le plus fiable est celui de Perrin de Brichambaut (Benlahmidi et *al.*, 2012) et nous l'utilisons pour estimer l'ensoleillement en un temps et un lieu donné.

Selon Yaïche et *al.*, 2010, les différentes étapes de calcul sont représentées par la Figure 7 et les relations utilisées sont intégrées dans le logiciel « solar_rad » que nous avons programmé.

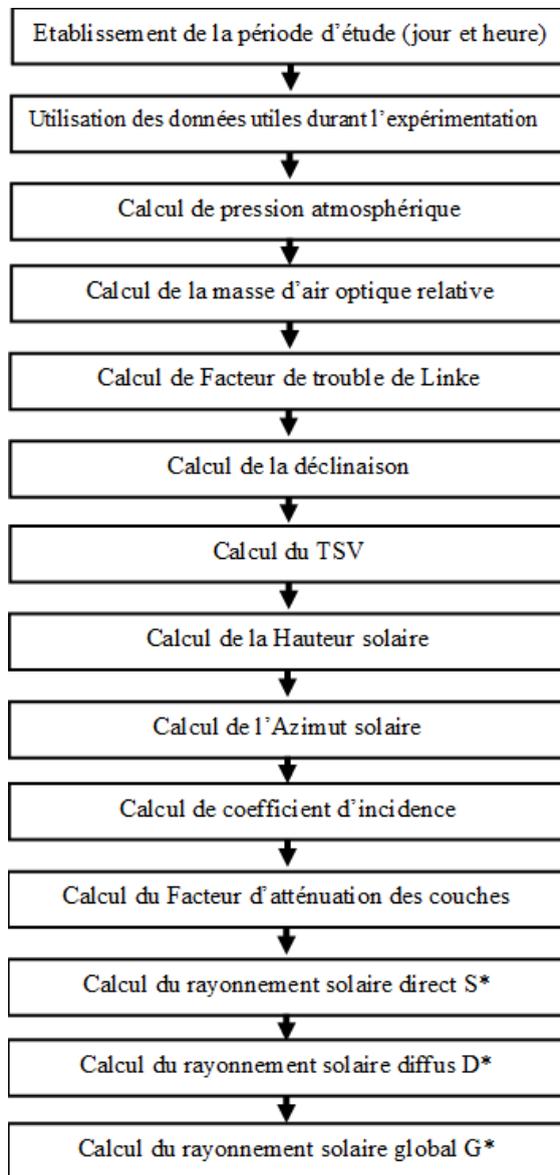


Figure 2 : Schéma fonctionnel de calcul de rayonnement selon Perrin de Brichambaut

Outils de collecte de données

Pour l'enregistrement de données durant l'expérimentation et la simulation de ce travail, nous avons conçu un logiciel nommé «solar_rad» sous le langage PYTHON.

Ce logiciel permet de calculer l'ensoleillement durant l'expérimentation. La fenêtre de «solar_rad» après son exécution est représentée sur la Figure 8.

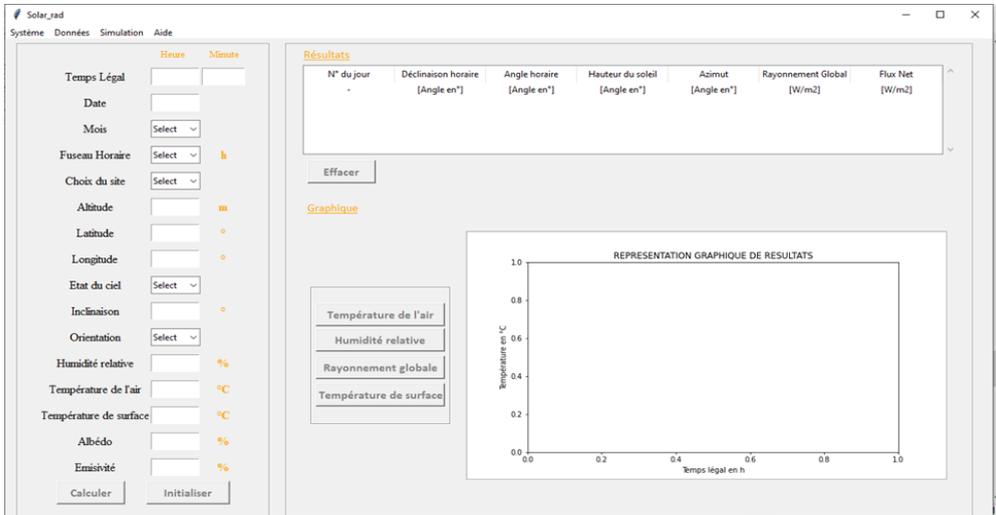


Figure 3 : Fenêtre du logiciel « solar_rad »

Outils et technique de traitement des données

Toutes les données climatiques sont insérées dans le logiciel sus cité et les données de simulation sont enregistrées dans un fichier Excel (Figure 9) pour être analysées.

	TL	Date	TL	Latitude	Longitude	Tair	Humidité Ts	D horaire	A horaire	Hauteur	Azimut	RG	FN	
2	13 21:28:23	19-10-2020	8,5	-18	47	31	39	37	-14	-53	39	-85	616	-5
3	14 21:28:23	19-10-2020	9	-18	47	30	37	37	-14	-46	45	-80	720	-94
4	15 21:28:23	19-10-2020	9,5	-18	47	36	26	37	-14	-38	53	-83	845	-243
5	16 21:28:23	19-10-2020	10	-18	47	36	26	47	-14	-31	59	-76	924	-186
6	17 21:28:23	19-10-2020	10,5	-18	47	36	26	49	-14	-23	67	-76	1012	-239
7	18 21:28:23	19-10-2020	11	-18	47	33	26	55	-14	-16	74	-76	1076	-198
8	19 21:28:23	19-10-2020	11,5	-18	47	35	20	57	-14	-8	81	-59	1109	-212
9	20 21:28:23	19-10-2020	12	-18	47	37	20	60	-14	-1	85	-11	1064	-141

Figure 4 : Feuille Excel de base des données

Propriétés radiatives de revêtements du sol

Le Tableau 1 donne les valeurs de l'albédo, l'émissivité et l'absorptivité de chacune de nos revêtements du sol (Hendel et *al.*, 2015).

Tableau 1 : Propriétés radiatives de revêtements du sol

	Albédo	Emissivité	Absorptivité
Béton bitumineux	0.05-0.12	0.98	0.88-0.95
Pavé travertin	0.4-0.5	0.99	0.6-0.7
Pavé ajouré	0.3-0.4	0.99	0.5-0.6
Béton courant	0.3-0.5	0.92	0.5-0.7

Gazon	0.25	0.98	0.75
-------	------	------	------

Avec une forte absorptivité et un faible albédo, le béton bitumineux a une grande capacité d'absorption du rayonnement incident et en réfléchit très peu. On s'attend donc à ce qu'il emmagasine plus de chaleur et, en conséquence, sa température va augmenter plus que celle des autres revêtements. Avec des caractéristiques thermiques radiatives proches, le béton courant et la pierre naturelle devraient connaître des évolutions de température pratiquement identiques. L'émissivité, qui caractérise notamment la capacité des matériaux à rayonner et donc à se refroidir, est équivalente pour tout le revêtement.

Caractères physiques de revêtements du sol

Le Tableau 2 donne les caractères physiques de 5 types de revêtements du sol utilisés pour l'expérimentation.

Tableau 2 : Caractères physiques de revêtements du sol

	Couleur	Rugosité	Perméabilité
Béton bitumineux	Noir	++++	-
Pavé travertin	Gris	+	-
Pavé ajouré	Gris	+++	+++
Béton courant	Gris	++	-
Gazon	Vert	+++++++	++++

La réflexion est diffuse pour une surface rugueuse. Elle se dirige pratiquement dans toutes les directions ce qui diminue le facteur de réflexion du rayonnement solaire à la surface de revêtements. Par contre, la réflexion est régulière pour une surface lisse. L'égalité entre l'angle d'incidence et l'angle de réflexion augmente le facteur de réflexion de la surface de revêtements.

Les matériaux perméables ont une température basse pour une haute quantité d'eau échangée entre la surface et le sol le plus profond.

RESULTATS

Données de la simulation

La valeur moyenne du rayonnement global dans les zones d'études est donnée dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Rayonnement global durant les expérimentations

Date	Rayonnement global [W/m ²]	Etat du ciel
10 février 2020	912.58	Légèrement nuageux
13 février 2020	751.63	Partiellement nuageux
19 février 2020	864.27	Légèrement nuageux
20 février 2020	522.64	Très nuageux
06 mars 2020	729.47	Partiellement nuageux

Données expérimentales

Les valeurs moyennes de la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent sont données dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Données expérimentales

Date	Station	Température de l'air [°C]			Humidité relative [%]	Vitesse du vent[m/s]
		Moyenne	Max	Min		
10-févr-20	B	30.4	36.1	26.3	41	2.5
13-févr-20	A	35.1	40.6	28.4	34	1.1
19-févr-20	A	36.4	40.4	29.7	26	4.9
20-févr-20	B	34.9	37.3	31.0	25	3.5
06-mars-20	A	27.4	31.0	22.3	55	4.9

Observations du premier jour de la station A

La Figure 10 montre les résultats de mesure des températures de surface de chaque revêtement exposé au rayonnement solaire au cours de la journée du 13 février 2020.

Les températures des 5 revêtements augmentent jusqu'à midi et diminuent ensuite progressivement. Elles varient en fonction du rayonnement solaire. Au cours de la première heure d'expérimentation, les courbes des pavés minéraux sont pratiquement confondues. Alors que celles du béton courant et du pavé ajouré le restent toute la matinée, celle du pavé travertin se détache et domine tout le reste. L'après-midi, celle du pavé ajouré rejoint celle du pavé travertin. Le comportement du gazon est remarquable ; les différences de température avec les pavés sont très marquées, avec un pic de plus de 15°C vers midi.

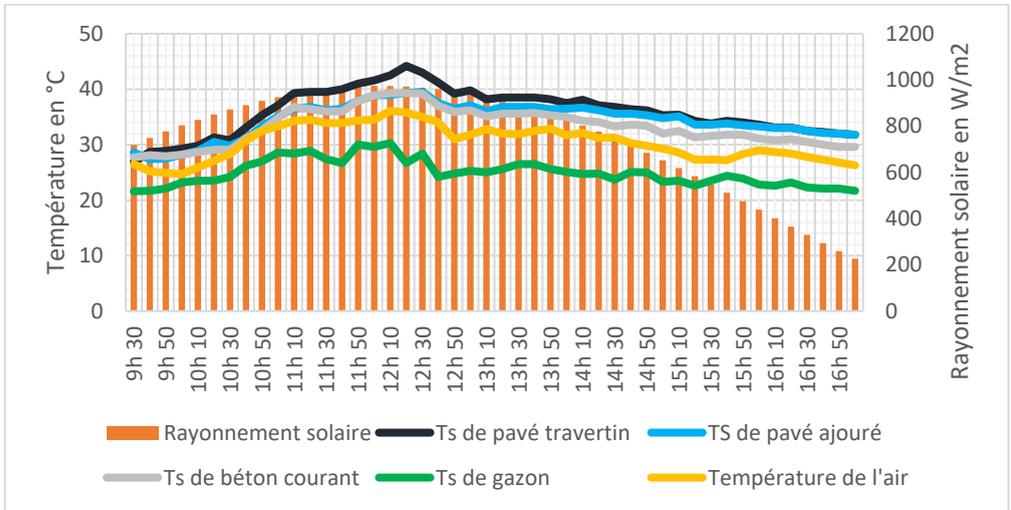


Figure 5 : Température de surface au bout du premier jour dans la station A

Observations durant le deuxième jour dans la station A

Les courbes de variation des températures de surface de chaque revêtement pendant la journée du 19 février 2020 sont représentées par la Figure 11.

Pour les résultats du deuxième jour d'expérimentation, les courbes de pavé travertin, pavé ajouré et béton courant sont pratiquement confondues du matin jusqu'à l'après-midi. Le comportement du gazon reste toujours remarquable par les différences de température avec les pavés.

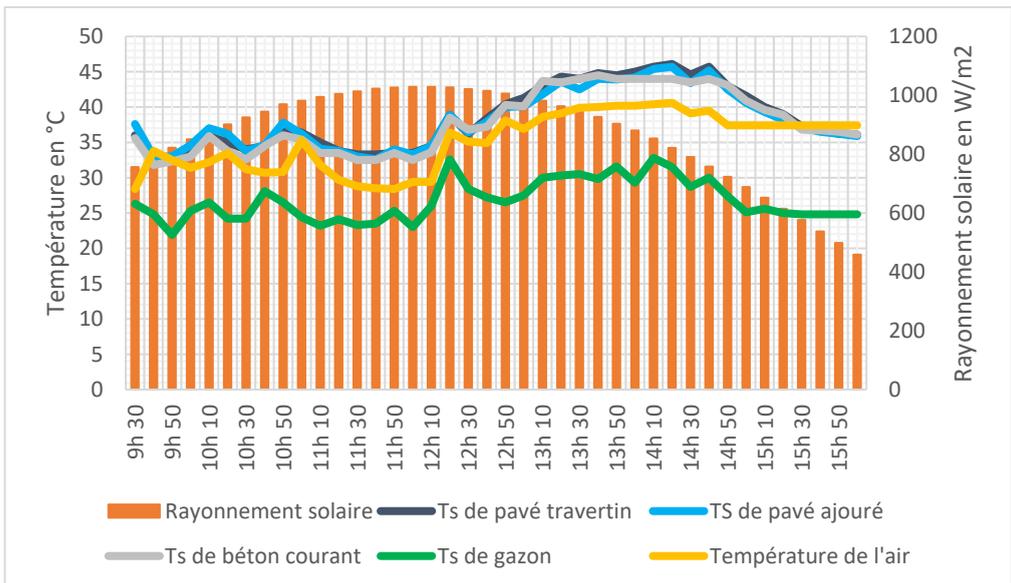


Figure 11 : Températures des surfaces durant le deuxième jour dans la station A

Observations durant le troisième jour dans la station A

La Figure 12 ci-dessous montre les courbes de la température de surface de chaque revêtement exposé au rayonnement solaire pendant la journée du le 6 mars 2020.

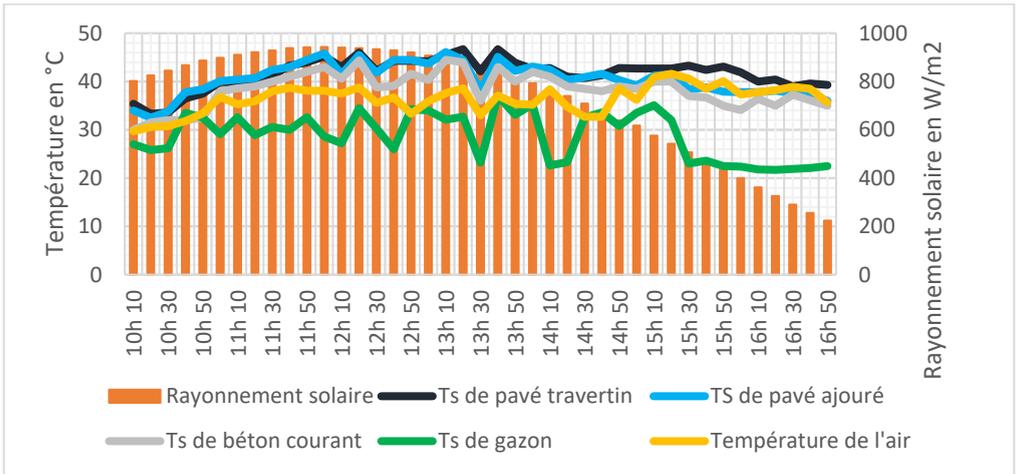


Figure 6 : Températures des surfaces durant le troisième jour dans la station A

Les courbes des pavés minéraux sont pratiquement confondues notamment le pavé travertin et ajouré qui se superpose presque toute la matinée. L'après-midi, toutes les courbes se sont détachées. Le comportement du gazon est remarquable ; les différences de température avec les pavés sont très marquées, avec un pic de plus de 15°C vers midi.

Observations durant le premier jour dans la station B

La Figure 13 représente la variation de températures de surface de béton bitumineux le 10 février 2020 de 8 h 30 min jusqu'à 12 h 00 min.

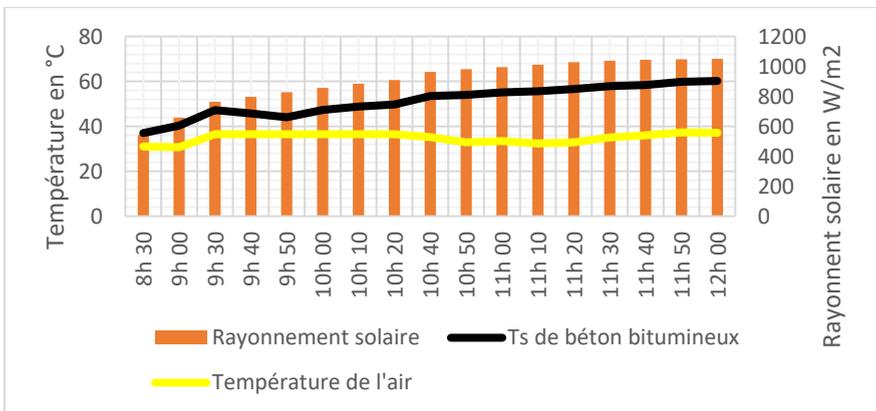


Figure 13 : Températures de surface durant le premier jour dans la station B

- La valeur moyenne de températures de surface de béton bitumineux est de 51.2°C. Sa valeur minimale est de 37°C.
- Avant-midi, la température de surface augmente progressivement jusqu'à atteindre un maximum de 60.2°C. Cela s'explique par l'ensoleillement important noté durant cette période.

Observations durant le deuxième jour dans la station B

La Figure 14 représente la variation de températures de surface de béton bitumineux le 20 février 2020.

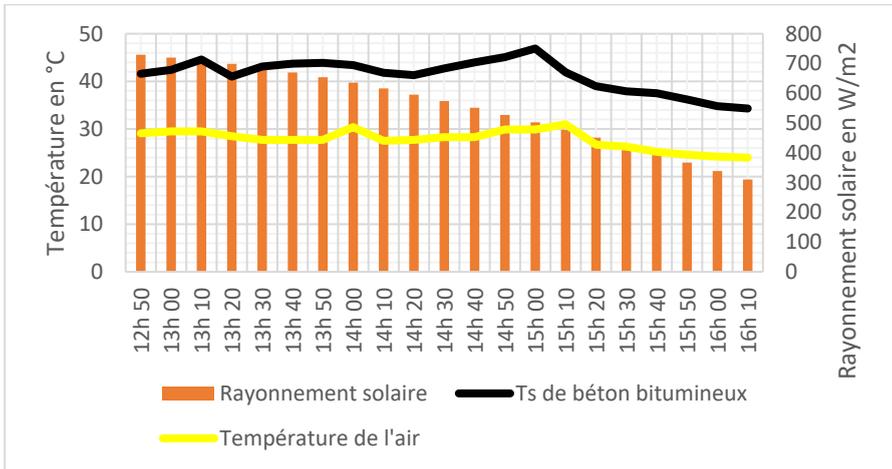


Figure 14 : Températures de surface durant le deuxième jour dans la station B

Au cours de l'après-midi, il a été constaté que la température de surface augmente lentement jusqu'à atteindre un maximum de 46.9°C, puis décroît.

Interprétation générale des résultats graphiques

D'après les résultats cités précédemment, les remarques suivantes peuvent être émises :

- ❖ Les courbes ont même allure ;
- ❖ Les températures superficielles des pavés minéraux sont supérieures à celles de l'air ambiant pendant toute la durée de l'expérience. Le pavé travertin a le plus grand écart tandis que le gazon a le plus petit écart. L'écart le plus élevé est enregistré autour de midi ;
- ❖ La température du gazon reste inférieure à celle de l'air ambiant pendant toute la durée de l'expérience avec un écart de 10°C.

Comparaison de tous les résultats

Pour un état du ciel légèrement nuageux, la température de surface de revêtement du sol est très élevée. Le béton bitumineux est le plus chaud. Sa température de surface atteint 60°C. Les trois autres ont une performance thermique similaire et ils sont modérément chaud. Le gazon présente le plus d'avantages par rapport au confort thermique.

Pour un état du ciel partiellement nuageux, le béton bitumineux maintient toujours sa place. Le pavé travertin et le pavé ajouré restent en deuxième position.

Interprétation générale

D'après les résultats obtenus précédemment, les matériaux utilisés pour le revêtement du sol ont été classés selon leur performance thermique et les propriétés physiques en matériaux « frais » et « chaud ». L'impact de couleur, la rugosité et la perméabilité ont été analysés également. Le matériau de couleur sombre comme le béton bitumineux absorbe plus de rayonnement solaire et provoque une augmentation de la température de surface. Le matériau de couleur claire comme le béton courant reflète plus de rayonnement qui favorise le confort thermique au niveau de sa surface. En matière de rugosité, le matériau lisse comme le pavé travertin possède la capacité de réfléchir le rayonnement solaire tandis que le matériau rugueux comme le béton bitumineux est le moins réfléchissant.

Le matériau perméable comme le pavé ajouré joue un rôle très important sur le rafraîchissement de la place publique car l'eau absorbée assure le refroidissement à l'intérieur du revêtement et la diminution de la température de surface.

La Figure 15 interprète la définition de matériau frais et chaud, cité précédemment.



Figure 15 : Matériau frais et chaud

DISCUSSIONS

Les matériaux noirs, à faible albédo, sont les plus chauds, tandis que les matériaux plus clairs sont plus frais. Pour autant, l'albédo ne suffit pas à expliquer toutes les observations. En effet, le gazon, pourtant plus sombre que les matériaux clairs, est de loin le plus frais des revêtements. Cela est attribuable au rafraîchissement fourni par l'évapotranspiration de l'eau qu'il contient.

La comparaison des résultats avec ceux obtenus dans le cadre de l'étude réalisée par l'Atelier Parisien d'Urbanisme affiche des différences.

Tableau 5 : Conditions météorologiques appliquées aux échantillons

Paramètres	
Température de l'air	35°C
Humidité relative	35%
Rayonnement solaire	1300W/m ²

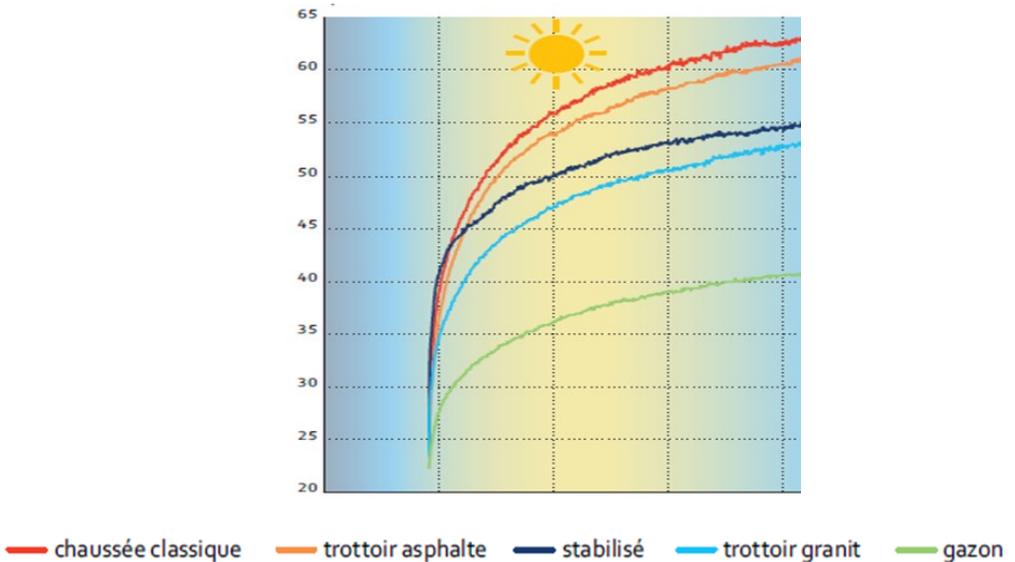


Figure 16 : Evolution de la température de surface de cinq revêtements parisiens

Nous pouvons dire que la température de surface de revêtements à Madagascar est faible par rapport à celle de Paris avec des conditions similaires. Il y a une différence de plus de 15°C concernant la température de surface ainsi que la température de l'air.

CONCLUSION

Ce travail vise à concevoir des places urbaines agréables à vivre, et surtout offrir des conditions confortables notamment du point de vue thermique. Il s'agit d'étudier les comportements thermiques de revêtement du sol exposés au rayonnement solaire qui avait pour objectif d'identifier les matériaux utilisés pour les revêtements du sol qui procurent le meilleur confort thermique. Ainsi, l'étude met en exergue le fait que la nature des matériaux utilisés en milieu urbain de couleur sombre et la surface rugueuse participent à augmenter la température de la surface et de l'air. Par contre, la couleur claire et la surface lisse favorisent leur diminution.

Nous avons enregistré pour le cas de la ville, des différences de températures qui sont surtout marquées pendant la journée, avec un écart d'une moyenne de 10°C pour la température de surface, et un écart maximum de 2.5°C pour la température de l'air. Dans cette étude, les matériaux sont classés en deux catégories selon leur performance thermique. Le béton bitumineux est un matériau chaud tandis que le pavé travertin, le pavé ajouré et le béton courant sont des matériaux modérément chauds. Le gazon est une référence climatique qui constitue un matériau frais. Pour améliorer sa performance, on doit augmenter l'albédo de surface en utilisant une couleur claire et une surface lisse. Il est très avantageux aussi d'utiliser un revêtement perméable. Il est également très important d'approfondir les études de la géométrie et la végétation pour diminuer les effets de l'îlot de chaleur urbain. Par conséquent, la demande énergétique de la ville pour rafraîchir la cour et pour climatiser le bâtiment est diminuée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Martin Hendel, Morgane Colombert, Arnaud Grados, Youssef Diab. (2015). Quel est le meilleur revêtement pour limiter la formation des îlots de chaleur urbains ? France. Page 3
- 2) M. R Yaïche, S.M.A Bekkouche. (2010). Estimation du rayonnement solaire global en Algérie pour différents types de ciel. In Revue des Energies Renouvelables Vol. 13 N°4, Algérie. Pages 2,3.
- 3) S. Benlahmidi, N. Moummi, a. Moummi, K. Aoues, A. Labed. (2012). Réalisation d'une interface de simulation des performances des insolateurs plans. In Courrier du Savoir – N°13, Algérie. Page 6.

PRINCIPES ACTIFS DES ALICAMENTS : ALLIES PHARMACOLOGIQUES PARFAITS POUR UN DEVELOPPEMENT DURABLE

par

RANDRIAMANANTENA A. Andrin'Iranto⁽¹⁾, RASOAZANANY Elise O⁽²⁾,
RAFALIMANANTSOA Jules⁽¹⁾, RATIARIMANANJATOVO Narindra⁽¹⁾,
RAZAFINDRAKOTO Fanoina⁽¹⁾, RAKOTONDRAJAO Manampanirina F.⁽¹⁾,
ROBIJAONA R. Baholy⁽¹⁾

(1) Doctorant de l'Ecole Doctorale Génie des Procédés, des Systèmes Industriels, Agricoles et Alimentaires (ED GP SIAA) – Ecole Supérieure Polytechnique Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Enseignant-Chercheur, Département de Fluorescence X et Environnement, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) - Antananarivo, Madagascar

RESUME

Madagascar regorge de richesses naturelles qui servent de remèdes pour les maladies courantes liées aux effets du changement climatique ou aux mauvaises habitudes alimentaires. Certaines plantes très connues pour leurs propriétés pharmacologiques anti oxydantes, cardiovasculaires, hypoglycémiantes sont des alliées incontournables d'un parfait rétablissement. Il s'agit des rhizomes de curcuma (*Curcuma longa L.*) de l'écorce de cannelle (*Cinnamomum zeylanicum*), de feuilles de moringa (*Moringa oleifera*), de feuilles de voafotsy (*Aphloia theiformis*).

La curcumine et l'aldéhyde cinnamique, respectivement principes actifs du curcuma et de la cannelle permettent d'améliorer l'état du système cardio-vasculaire de par leurs propriétés anti oxydantes, antivirales et antibactériennes. La richesse du moringa en acides aminés essentiels et polyvitamines approvisionne les organes. Les polyphénols du voafotsy avec ses propriétés antioxydantes, purifiantes, stabilisantes, antivirales complètent le pack. Ces plantes poussent localement et les techniques culturales adoptées se focalisent sur les techniques d'agro écologie. Ce système de culture favorise la disponibilité des matières actives qui sont indispensables pour le traitement des patients. Sous un autre angle, la présente recherche révèle les propriétés physico-chimiques de ces plantes thérapeutiques par le biais de l'utilisation de spectrophotométrie d'absorption atomique. L'art d'accompagner les aliments-médicaments appelés « alicaments » pour se soigner est nécessaire. Hippocrate l'a dit : « ton aliment est ton médicament ! »

Mots clés : Alicaments, Antioxydant, Cannelle, Système Cardiovasculaire, Curcuma, Moringa, Remède, Madagascar

ABSTRACT

Madagascar is rich in natural resources that serve as remedies for common illnesses related to the effects of climate change or bad eating habits. Some plants well known for their pharmacological properties, antioxidant, cardiovascular, hypoglycemic, are essential allies for a perfect recovery. These are rhizomes of turmeric (*Curcuma longa*), cinnamon bark (*Cinnamomum zeylanicum*), moringa leaves (*Moringa oleifera*), voafotsy leaves (*Aphloia theiformis*).

Curcumin and aldehyde acid, respectively active ingredients of turmeric and cinnamon will improve the state of the cardiovascular system through its antioxidant, anti-viral and anti-bacterial properties. Moringa is rich in essential amino acids and polyvitamins supplies the organs. The poly-phenols of voafotsy with its antioxidant, purifying, stabilizing properties complete the pack. These plants grow locally and the cultivation techniques adopted for planting focus on agro-ecological techniques. This cultivation system promotes the availability of active ingredients in the plants which are essential for the treatment of patients. From another angle, the present research exposes the physico-chemical properties of these therapeutic plants through the use of atomic absorption spectrophotometry. The art of accompanying the food-drugs also called alicaments to treat oneself is necessary as Hippocrates said “your food is your medicine!”

The art of accompanying food-medicine for healing is necessary as Hippocrates said : “*your food is your medicine!*”

Keywords: Antioxydant, Cinnamon, Cardiovascular System, Turmeric,, Moringa, Remedy, Madagascar

FINTINA

Madagasikara dia manana harena voajanahary ampiasaina ho fanafana amin'ireo karazan'aretina mpahazo vokatry ny fiovaovan'ny toetrandro ankehitriny sy ny fahazaran-dratsy amin'ny fomba fisakafoana. Misy zavamaniry sasany fantatra tsara noho ireo asany amin'ny fitsaboana ala arefesina, ny fikorinana sy ny fo, mandanja ny siramamy izay tena tsy azo ihodivirana. Antoky ny fahazoana fanasitranana ny fampiaraha-na azy ireo. Tsy inona izany fa ny tamotamo (*Curcuma longa L.*) ny hoditra havozomanitra (*Cinnamomum zeylanicum*), ny ravina ananambo (*Moringa oleifera*), ary ny ravimboafotsy (*Aphloia theiformis*).

Ny curcumine sy ny aldéhyde cinnamique, izay singa fototry ny tamotamo sy ny havozomanitra dia manatsara ny fikorinana sy ny fo noho ireo toetra ala arafesina, ala

mikroba sy ala otrikaretina ananany. Ny ananambo dia mamatsy ireo taova ao anaty noho ireo asidra fototra sy vitamina isan-karazany ananany. Ny ravimboafotsy moa no mameno azy ireo noho ireo toetra ala arefesina, fanadiovana ary fampitoniana sy ala otrikaretina ana-nany. Ireo zavamaniry ireo moa dia hita eto an-toerana avokoa ary ny fomba fambolena dia mifanaraka tsara amin'ny fepetra fambolena natoraly miaro ny tontolo iainana. Io fomba fambolena io dia miantoka ny fisian'ireo singa fototra ao aminy, miantoka ny fitsaboana ny marary. Amin'ny lafiny iray, ity fikarohana ity dia manasongadina ireo toetra fizika sy simikan'ireo zavamaniry fanao fanafody ireo amin'ny alalan'ny « spectrophotométrie » izay mijery ireo atoma ao aminy. Ny kanto fampiarahana azy ireo ho sakafo sady fanafody antsoina hoe « sakafo fanafody » dia tena mahasoa tokoa. Hippocrate dia nilaza hoe : « aoka ny sakafonao no fanafodinao ! »

Teny fototra : Sakafo fanafody, Ala arafesina, Havozomanitra, Fikorinana sy fo, Tamotamo, Ananambo, ody, Madagasikara

INTRODUCTION

Le Curcuma, *Curcuma longa L.*, est abondante en Asie (Chen, D.Y., 2010). *Curcuma longa* est l'épice traditionnelle la plus populaire dans la médecine indienne et chinoise utilisée comme anti-inflammatoire (Akinyemi, A.J., 2018) - (Latham, M. 2001), antibactérien pour guérir les blessures (Mehrotra, S., 2013), antioxydant (Iqbal, J., 2010) et contre le cancer (Abdel-Lateef, E., 2016). Il a été rapporté que *Curcuma longa L.* possède de multiples propriétés pharmacologiques antioxydant, antiviral, anti-inflammatoire, anti-carcinogénique, anticoagulante, antidiabétique et renforce l'immunité (Jansen, P.C.M., 2005), (Liju, V. B., 2013). L'étude a été réalisée non seulement pour augmenter l'immunité mais aussi améliorer l'alimentation des femmes enceintes à Madagascar (Norajit, K, 2007), (Oh, S., 2014). La médecine traditionnelle malagasy "prescrit" la soupe de riz mixé dont le curcuma est la principale composante pour les femmes stériles qui souhaitent d'enfants. Dans les pays de l'Ouest, le rhizome de curcuma est utilisé dans l'industrie alimentaire, en particulier comme agent colorant (E 100 in the European Union) dans le processus de fabrication d'aliments et de sauces. Le Curcuma est une plante médicinale aromatique importante qui dis-pose d'un immense potentiel à l'exportation notamment, entre autres, pour des usages en cosmétique et pra-tique culinaire (Damalas, C.A., 2011). Par ailleurs, les jus frais, extrait alcoolique et aqueux, et les huiles essentielles de *Curcuma longa L.* ont été démontré comme ayant des effets insecticides et répulsifs contre un bon nombre d'insectes (Cronin, J. R. 2003), (Frautschy, S. A., 2001) (Shoba, G., 1998), (Siviero, A., 2015). En outre, les facteurs climatiques et génétiques, le temps de la récolte, le type de sols, la fertilisation, le processus de séchage, et la période de stockage affectent la composition chimique des extraits de *Curcuma longa L.* (Sharma, R.A., 2001).

Le moringa, agent bio-fortifiant qui peut être associé, notamment, au curcuma. De par ses propriétés, il est fortement conseillé de beaucoup prendre, c'est pourquoi il est nécessaire de les accompagner avec de la ti-sane de cannelle (*Cinnamomum zeylanicum*) et de voafotsy (*Aphloia theiformis*).

La curcumine, composition chimique du Curcuma, a été proposée comme thérapie de support dans le traitement de la COVID-19 ainsi que dans les effets létaux de SARS-CoV-2 (Liju, V. B., 2011). Elle n'a pas de toxicité sévère pour une dose de 8g par jour, et sur une courte période. Cependant, l'étude faite auprès de l'humain montre que la curcumine avec une dose prise entre 0.9 et 3.6g par jour pendant 1 à 4 mois peut entraîner de nausées et des diarrhées (Sharma, R.A., 2001).

L'objet de cette étude est de caractériser le *Curcuma longa L.* de Madagascar, et plus particulièrement la composition de son huile essentielle par chromatographie en phase gazeuse (CPG) de 3 sociétés locales ainsi que les métaux lourds et éléments minéraux présents dans 2 échantillons de rhizome poudre de *Curcuma longa L* provenant d'Anivorano et de Manjakandriana (Madagascar).

Pour une meilleure synergie du point de vue culinaire et nutraceutique, le curcuma est combiné avec le *Cinnamomum zeylanicum*, le Moringa oleifera, sans oublier de prendre l'*Aphloia theiformis* comme infusion. Le tout constitue ainsi un alicament.

MATERIELS

Matériels végétaux : Curcuma, cannelle, moringa, aphloia

Les plantes étudiées, issues d'endroits différents, sont toutes de nature biologique. La méthode culturale s'est basée sur les règles de l'agroforesterie et, par conséquent, n'a pas utilisé de produits de synthèse et a respecté la traçabilité du produit, et ce, depuis sa culture. Par ailleurs, la maturité des plantes a été une condition préalable avant de passer à leur transformation y compris le séchage.

Les produits ainsi obtenus ont été analysés pour connaître les valeurs nutraceutiques et minéralogiques respectives.



Figure 1 : Chips de Curcuma en cours de séchage
(HORDEA - septembre 2020)

La Figure 1 montre une fraction du lot de Curcuma fraîchement lavé et mis en chips et étalée finement sur un sac perméable prévu à cet effet. Le séchage se fait durant 4 à 5 jours ensoleillés.

Matériels de Laboratoire et d'usine

Diverses verreries de laboratoire ont été utilisées, notamment dans le cadre du nettoyage, du séchage, du broyage et de la distillation d'huiles essentielles.

METHODE

Méthode physique

Les matières végétales ont été réduites en poudre. Elles ont été séchées à une température de 40 ° C durant 24 heures dans le four GALLENKAMP SANYO.

Les échantillons sont par la suite mis en comprimés ou en tablettes. Ils sont comprimés sous une pression de 10 tonnes par cm², donc sous 109 Pascal. Les tablettes ainsi obtenues ont été analysées par la méthode énergie dispersive fluorescence X.

Méthodes d'analyses

Le Département Technique et Environnemental de rayon X Fluorescence de l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) Madagascar possède un spectromètre fluorescence rayon X de marque SPECTRO X- Lab Pro pour l'analyse des échantillons. Ce spectromètre a été équipé de plateforme pouvant accueillir douze (12) échantillons à analyser simultanément. Il a été connecté à un

ordinateur pour contrôler les analyses et sortir les résultats en utilisant le logiciel X-LabPro 5.1.

L'analyse Chromatographique en Phase gazeuse des huiles essentielles a été effectuée au sein du Laboratoire de Contrôle des Pesticides LCP du Ministère de l'Agriculture. C'est le chromatographe de marque SHIMADZU GC-14A qui a été utilisé.

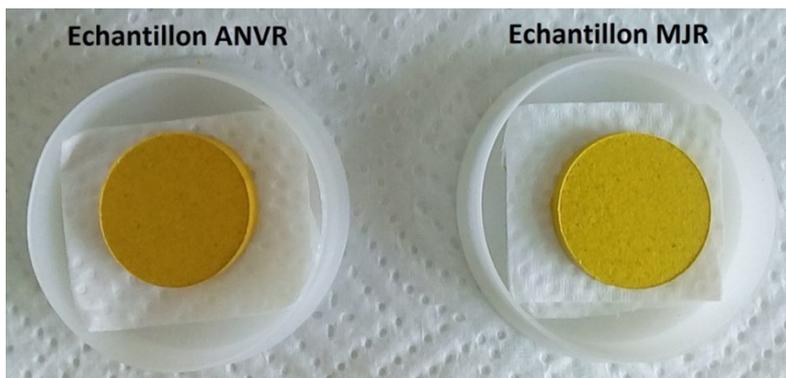


Figure 2 : Curcuma mis sous forme de pastille

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Le *Curcuma longa* L.

Résultats

Détermination des métaux lourds et des éléments minéraux

Le Tableau 1 suivant montre les concentrations d'éléments minéraux présents dans le Curcuma en 2014 et 2020 de différentes régions de Madagascar.

Les études antérieures ont mis en exergue un taux inférieur en Calcium de 929,2 mg/ kg à 1142%, mg/ kg par rapport aux valeurs trouvées dans notre étude : 1196,0 mg/ kg pour Anivorano et 1236,5 mg/ kg pour Manjakandriana.

Notons que dans le cadre de cette étude à l'échelle industrielle, on a concentré les recherches seulement dans les deux régions en 2020, à savoir Anivorano et Manjakandriana. Il faut remarquer que l'appellation Man-jakandriana est similaire à Anjirô (Circonscription dans le district) en 2014.

Tableau 1: Etude comparative de la concentration d'éléments minéraux présents dans le Curcuma en 2014 et 2020

2014									2020			
Element	Concentration (mg/kg)							Tech	Element	Concentration (mg/kg)		
	Mandritsara ¹	Ambatondrazak ²	Anivorano ³	Brickaville ³	Moramanga ²	Anjiro ²	Tolongoina ⁴			Anivorano ³	Manjakandrian ⁵	Tech
Ca	1112,1 ± 54,5	1051,8 ± 71,5	941,4 ± 63,9	929,2 ± 60,9	1142,4 ± 85,6	966,6 ± 68,1	1037,1 ± 44,4	SAAF	Ca	1196,0 ± 95,7	1236,5 ± 111,3	DEXRF
Cr	< 9,3	< 9,3	< 9,3	< 9,3	< 9,3	< 9,3	< 9,3	TXRF	Cr	1,2 ± 0,1	3,2 ± 0,3	DEXRF
Fe	34,8 ± 2,9	55,4 ± 3,2	80,1 ± 5,4	51,1 ± 3,3	49,3 ± 3,5	53,3 ± 4,5	51,3 ± 2,5	SAAF	Fe	294,6 ± 23,6	1102,0 ± 110,2	DEXRF
Co	< 6,8	< 6,8	< 6,8	< 6,8	< 6,8	< 6,8	< 6,8	TXRF	Co	< 3,0	< 3,0	DEXRF
Ni	< 5,9	< 5,9	< 5,9	< 5,9	< 5,9	< 5,9	< 5,9	TXRF	Ni	1,3 ± 0,1	2,0 ± 0,2	DEXRF
Cu	18,5 ± 0,6	21,9 ± 1,4	16,5 ± 1,1	18,3 ± 1,1	23,3 ± 1,7	20,1 ± 1,6	19,7 ± 0,7	SAAF	Cu	8,8 ± 0,7	8,8 ± 0,7	DEXRF
Zn	11,4 ± 0,7	14,1 ± 0,1	19,8 ± 0,3	14,7 ± 0,6	13,2 ± 1,0	24,3 ± 1,8	23,4 ± 1,5	TXRF	Zn	65,0 ± 5,9	76,7 ± 6,9	DEXRF
As	< 3,7	< 3,7	< 3,7	< 3,7	< 3,7	< 3,7	< 3,7	TXRF	As	< 0,5	< 0,5	DEXRF
Br	< 7,6	< 7,6	< 7,6	< 7,6	< 7,6	< 7,6	< 7,6	TXRF	Br	3,5 ± 0,3	3,3 ± 0,3	DEXRF
Rb	28,9 ± 2,7	42,8 ± 0,7	38,7 ± 2,7	28,7 ± 2,2	38,7 ± 1,6	39,1 ± 5,5	29,5 ± 2,6	TXRF	Rb	55,0 ± 5,0	90,7 ± 9,1	DEXRF
Pb	< 0,9	< 0,9	< 0,9	< 0,9	< 0,9	< 0,9	< 0,9	SAAF	Pb	< 0,1	2,3 ± 0,2	DEXRF

DEXR F	: Direct Excitation X-Ray Fluorescence	1:	Région SOFIA
TXRF	: Total réflexion X-Ray Fluorescence	2:	Région ATSINANANA
SAAF	: Spectrométrie d'Absorption Atomique en Flamme	3:	Région ALAOTRA MANGORO
Tech	: Technique	4:	Région VATOVAVY-FITOVINANY
		5:	Région ANALAMANGA

Détermination de la Composition chimique de l'Huile essentielle par Chromatographie en Phase Gazeuse (CPG)

L'analyse par Chromatographie en phase Gazeuse (CPG) d'huile essentielle est réalisée avec le Chromato-graphe SHIMADZU GC-14A du Laboratoire LPN du Ministère de l'Agriculture, utilisant la colonne capil-laire (30 m × 0.32 mm, épaisseur 0.25µm). La température du four varie de 60 à 210°C avec un taux de scan de 3°C/min. L'azote est le gaz vecteur utilisé avec 3 µL /min. 0.5 µL d'huile essentielle a été dilué avec 1.5 µL d'hexane. Après dilution, les échantillons d'huiles essentielles de 0,8µL sont injectés manuellement.

Les spectres de 3 échantillons d'huiles essentielles fournies sont représentés dans les Figures 3, 4 et 5.

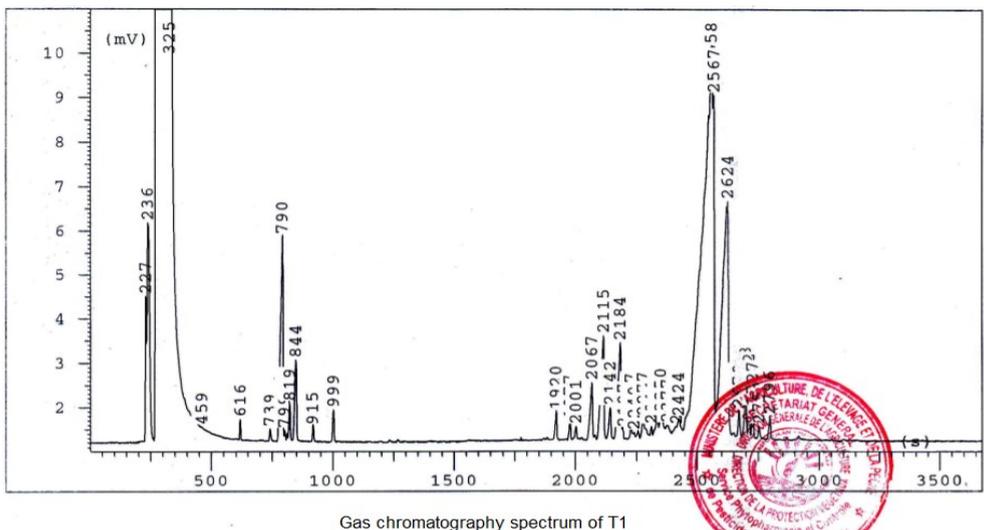


Figure 3 : Spectre (T1)

Note : Le cachet du Laboratoire LPN sur chaque figure assure l'authenticité des résultats chromatogramme.

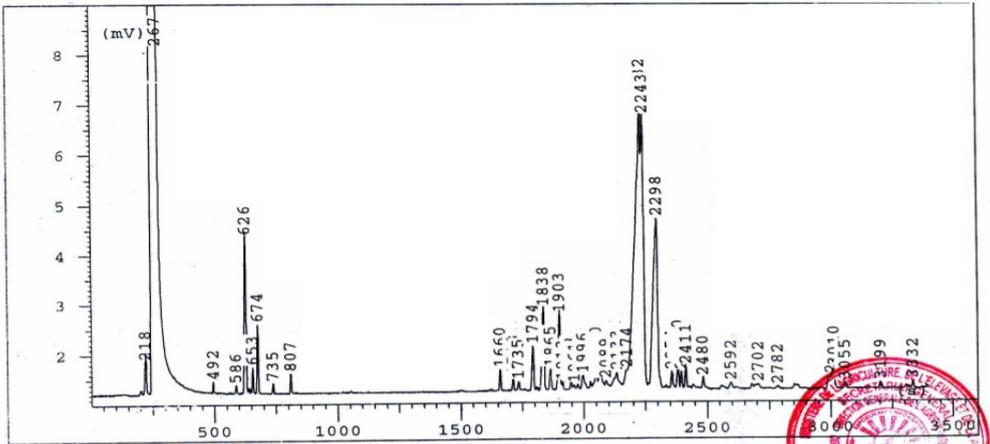


Figure 4 : Spectre (T2)

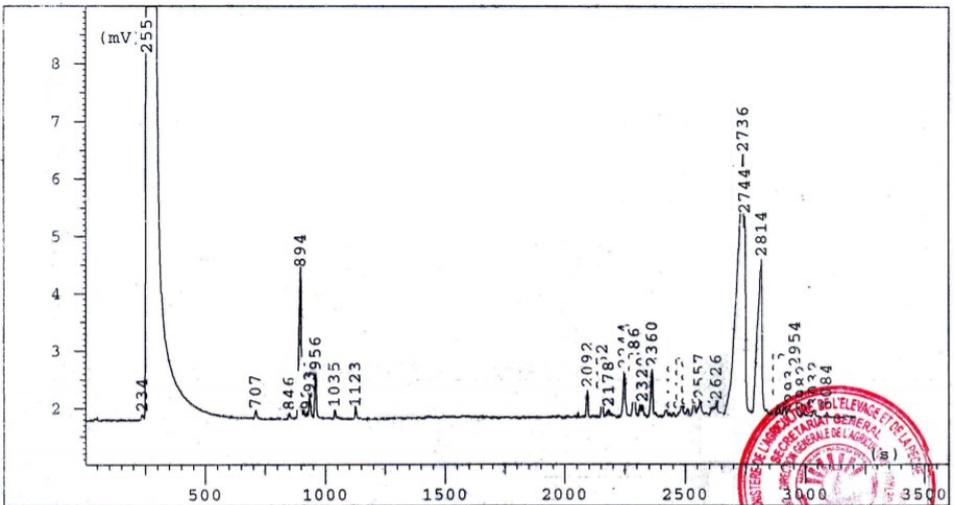


Figure 5 : Spectre (T3)

La composition de l'huile essentielle de *Curcuma longa L.* de différentes études est synthétisée dans le tableau 2.

Tableau 2 : Étude comparative de l'étude de la composition chimique des Curcumas

	Echantillon 1 (T1)	Echantillon 2 (T2)	Echantillon 3 (T3)	Valeurs limites trouvées au Laboratoire LCP	Lahatsaravita, B.A. (2003)	Guimarães,A.F. and <i>al.</i> (2020)	Le,T.B and <i>al.</i> (2019)	Sahoo, A. and <i>al.</i> (2019)	Zhang, L. and <i>al.</i> (2017)
					Vangaindrano Atsimo- Atsiinanana	Brazil	Vietnam	India (8 échantillons)	China (20 échantillons)
Ar-Turmerone (%)	42,41	47,32	42,19	25,80-41,30	43,10	31,31	09,93	39,5-45,50	00,92-42,85
β -Turmerone (%)	09,63	07,26	07,75	07,53-26,70	-	20,73		09,8-11,70	05,13-42,54
α -Turmerone (%)	16,78	17,59	17,11	11,40-17,60	12,60	22,41	10,28	-	-
β - caryophyllene (%)	00,61	00,56	02,25	00,30-00,50	06,30	-	trace	00,30-00,56	00,00-01,53
α -zingiberene (%)	03,95	3,88	02,19	00,50-03,50	-	-	26,38	-	00,50-15,70

T1 : Floramad (haut plateau et littoral) ; T2 : Floribis (littoral nord-est et haut plateau) ; T3 : Mab (littoral est-nord)

Les échantillons analysés sont majoritairement constitués par Ar-Turmérone (Tableau 2). Il a une activité potentielle hypoglycémique contre α -glucosidase et α -amylase (Labban, L., 2014). En effet, Ar-Turmérone inhibe l'oxydation du cuivre dans le LDL (Hucklenbroich, J., 2014). L'oxydation de LDL joue un rôle important dans le développement de l'athérosclérose. Cette dernière favorise le développement du cholestérol (plaque) sur la paroi des artères ce qui entraîne le blocage de la circulation sanguine. Les plaques peuvent détruire et entraîner l'occlusion des artères. L'athérosclérose est souvent asymptomatique jusqu'à ce que les plaques soient détruites ou la circulation sanguine bloquée. L'Ar-Turmérone, isolé à partir de l'huile essentielle de curcuma montre une activité potentielle cytotoxique contre de nombreuses cellules, y compris HeLa (Salehi, B., 2020). Il est aussi un puissant agent anti-inflammatoire et inhibe la production de cytokines inflammatoire (Montoro, P., 2016). L'étude de Yue et *al.* (2010) évalue l'activité antiproliférative des composés isolés (trois curcuminoïdes et deux turmérone) du *Curcuma longa L.*, en utilisant la ligne de la cellule cancéreuse hu-main HepG2, MCF-7 et MDA-MB-231. Les activités immunomodulatoires des Turmérone (alpha et aromatique) isolés à partir de *Curcuma longa L.* sont aussi examinées en utilisant les cellules mononucléaires périphériques du sang humain (PBMC). Les résultats montrent que les curcuminoïdes (curcumine, de-methoxycurcumine et bisdemethoxycurcumine) et alpha-Turmerone inhibent significativement la prolifération des cellules cancéreuses avec une dose dépendant des cas du patient (Tavares, W.S., 2013). Il a aussi une activité puissante antifongique contre *Aspergillus flavus* (Das, K., 2016). L'Ar-Turmérone n'a pas détecté de toxicité. Cependant, Ar-Turmérone est classé parmi les agents causant des réactions allergiques de la peau (H317) et l'irritation des yeux (H319) (Le, T. B., 2019).

Discussions

La variation du niveau d'Ar-Turmérone, β -Turmérone, α -Turmérone dans les trois échantillons est uniforme. Ils sont respectivement entre 47.32 à 42.19; 9.63 à 7.26; 17.59 à 16.78. Ceci est dû à la confirmation de l'existence de la conformité aux propriétés chimiques énoncées.

La tracabilité des produits ; qui se traduit par la qualité de la culture des matières premières jusqu'à leur transformation et conditionnement, a permis d'enregistrer au niveau de T1 le maximum de valeur en matière de Ar-Turmérone. La pluviométrie sur les Hautes terres et sur les côtes affecte certainement la qualité. De plus, le microclimat chaud et humide (pluviométrie, qualité du sol, et température) de la partie Est des Haut-Plateaux est favorable à la plantation.

Obtenir Ar-Turmerone, l'actif ingrédient principale au niveau industriel, demande un savoir-faire et une expérience, empirique ou pas, sur le terrain. Alors que

le concept de traçabilité du produit (culture, col-lecte) exige une expertise technique de la part des opérateurs (maturité du produit, adultération, degré de séchage, etc.). La maîtrise des processus de transformation avec des matériels performants ne garantit pas l'obtention d'un produit standardisé et normalisé.

La valeur maximale de β -Turmerone au niveau de T2 (9.63) comparée à T1 (7.26) et T3 (7.75) pourrait être due au problème de maturité des matières traitées.

Le taux de β -caryophyllène enregistré au laboratoire LCP est entre 0.3 et 0.5. Or, la valeur des trois échantillons dépasse ces limites à savoir 0.56 - 0.61 et 2.25. Plus les terpènes augmentent, plus le taux des principes actifs diminue. Une des raisons d'augmentation de ces terpènes est la qualité des matières à transformer (niveau d'humidité, immaturité, etc.). Il peut être aussi dû à l'humidité du climat pluvieux de la partie Est et littorale Est. Si l'on compare les trois échantillons, T3 possède le maximum de valeur de β -caryophyllène qui est de 2.25. Ceci explique que le produit pousse dans une région pluvieuse presque toute l'année où, cependant, le niveau d'humidité est loin d'être atteint. Un simple système de séchage utilisé traditionnellement par les paysans pourrait améliorer la qualité de séchage.

Effets nutraceutiques des ingrédients actifs de Curcuma longa L

Cette étude se concentre essentiellement sur la caractérisation phytochimique d'extraits du *Curcuma longa L*. Les extraits de *Curcuma* ont été isolés et analysés par rayons X fluorescence - SPECTRO X-Lab Pro. L'intérêt de ce travail a été d'explorer le potentiel thérapeutique des plantes médicinales connues pour leurs valeurs et vertus nutraceutiques. Dans cette perspective, le présent travail a évalué les propriétés nutraceutiques et bio-fonctionnelles de *Curcuma longa L*. Selon l'analyse par spectrophotométrie d'absorption atomique, il est noté exceptionnellement que *Curcuma longa L* a un potentiel significatif nutraceutique. La Spectrophotométrie par absorption atomique est essentiellement une méthode d'analyse quantitative qui est beaucoup plus intéressante pour la détermination de traces et des composants majeurs. *Curcuma longa L*, d'une part, a une large variété d'éléments phytochimiques, nutraceutiques et d'autre part, une plante médicinale avec un large potentiel.

Selon la composition chimique et phytochimique de *Curcuma longa L*, cette plante possède un vaste spectre d'éléments nutraceutiques et bio-fonctionnels qui peuvent être valorisés.

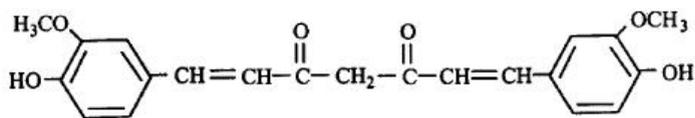


Figure 6 : Structure de la molécule de curcumine (55)

Tableau 3 : Composition minérale dans le rhizome de *Curcuma longa L.*

Eléments	Concentration (mg/kg)
Sodium (Na)	< 100,0
Magnésium (Mg)	1298,5 ± 116,9
Aluminium (Al)	1467,5 ± 146,8
Silicon (Si)	2881,5 ± 288,2
Phosphore (P)	2434,0 ± 243,4
Soufre (S)	1409,0 ± 126,8
Chlore (Cl)	2930,0 ± 293,0
Potassium (K)	28000,0 ± 280,0
Calcium (Ca)	1236,5 ± 111,3
Titane (Ti)	132,9 ± 12,0
Chrome (Cr)	3,2 ± 0,3
Manganèse (Mn)	233,6 ± 21,0
Fer (Fe)	1102,0 ± 110,2
Cobalt (Co)	< 3,0
Nickel (Ni)	2,0 ± 0,2
Cuivre (Cu)	8,8 ± 0,7
Zinc (Zn)	76,7 ± 6,9
Arsenic (As)	< 0,5
Sélénium (Se)	< 0,1
Brome (Br)	3,3 ± 0,3
Rubidium (Rb)	90,7 ± 9,1
Strontium (Sr)	13,8 ± 1,2
Plomb (Pb)	2,3 ± 0,2
Mercure (Hg)	5,1 ± 0,4

Le rhizome de *Curcuma* est riche en amidon (45-55%), fibre (2-7%) et carbohydrates (60-70%). Il contient également 6-8% de protéines y compris turmerine, un peptide hydrosoluble (43), et un texu de lipide environ 5%. La poudre de *Curcuma longa L.* possède des éléments minéraux de 3-7 % (57) qui est très bénéfiques pour le renforcement des activités métaboliques et immunitaires des êtres humains. Les résultats de spectrophotométrie par rayon X-ray fluorescence montre, entre autres, l'abondance du Potassium (K) 19g/kg. La fluidité du Potassium contribue dans la maintenance de la pression du sang, sa fluidité, la balance de l'électrolyte et la composition sanguine. Il joue également un rôle important dans les nerfs, les fonctions cervicales et le développement de muscle. Le manque de Potassium est manifesté par une diarrhée et des nausées ou une insuffisance d'urine [52]. Le curcuma rhizome est la source de fer avec un taux de 1.102g

comme déterminé par l'analyse par rayon X fluorescence). Chaque cellule dans le corps contient du fer. Ce minéral est essentiel pour le transport de l'oxygène et la formation des cellules rouges dans le sang. Il joue aussi le rôle dans la production de nouvelles cellules, hormones et neurotransmetteurs (messagers dans les nerfs). Il est à noter que le fer contenu dans les plantes (comme le curcuma) est beaucoup plus facile à absorber par le corps que le fer d'origine animale. Cependant, l'absorption de Fer contenu dans les plantes n'est pas bonne lorsqu'il est consommé avec d'autres nutriments, comme la vitamine C (Salehi, B.,2019).

Le *Moringa oleifera*

Le *Moringa oleifera* L. est considéré comme la plante la plus riche en nutriments au monde. Les feuilles de *Moringa* sont consommées par les Asiatiques depuis des millénaires. Des études menées dans d'autres pays indiquent que les feuilles ont une immense valeur nutritive, elles sont particulièrement riches en β -carotène, protéines, vitamines, minéraux et acides aminés (Busani et al., 2011). Selon Fahey (Fahey, J. W. 2005), la teneur en vitamine C des feuilles de *Moringa* est sept fois supérieure à celle des oranges, la teneur en vitamine A est quatre fois supérieure à celle des carottes, le calcium est quatre fois supérieur à celui du lait, la teneur en protéines est deux fois supérieure au lait, et le potassium est trois fois plus élevé que celui des bananes. A Madagascar, cette plante pousse dans les régions côtières de Toamasina, Antsiranana, à Mahajanga, à Fianarantsoa et à Toliara, et occasionnellement sur les Hauts-Plateaux. Elle pousse à proximité des habitats ou sert de haie, sa culture progresse dans la brousse et les potagers scolaires. Des études ont confirmé que la protéine de *Moringa oleifera* L. est soluble dans une solution aqueuse et peut être totalement digérée (Fan et al., 2016)

Résultats

Avec l'Office National de la Nutrition (ONN) des études ont été faites réalisées à partir de la poudre de feuilles séchées de *Moringa oleifera* L., ont été faites et ont donné les résultats suivants : la poudre est obtenue à partir des feuilles séchées de *Moringa oleifera*. Les feuilles de *Moringa oleifera* contiennent des protéines de hautes valeurs biologiques composées de 9 acides aminés indispensables qu'on ne trouve pas dans les autres légumes, ces feuilles peuvent être considérées comme le meilleur légume dans le contexte nutritionnel. Les valeurs nutritionnelles du *Moringa oleifera* pour 100g sont données dans le tableau suivant.

Tableau 4 : Valeurs nutritionnelles de *Moringa oleifera* L. [14]

	Gousses (100 g)	Feuilles (100 g)	Poudre de feuilles (100g)
Teneur en eau (g)	86,9	75,0	25
Calories (Kcal)	26,0	92,0	205
Constituants alimentaires (par rapport à la matière sèche)			
Protéines(g)	2,5	6,7	27 84 %AJR* chez l'enfant
Lipides (g)	0,1	1	2,3
Glucides (g)	3,7	13,4	38,2
Fibres végétales (g)	4,8	0,9	17,2
Ca (mg)	30	440	2000 250%AJR*chez l'enfant
Mg (mg)	24	24	368 84 %AJR* chez l'enfant 71 %AJR* chez la mère
Vit.A (mg)	0,11	6,8	16,3 143%AJR* chez l'enfant 271%AJR*chez la mère
Vit. B (mg)	423	423	
Vit.C (mg)		220	17,3 9%AJR* chez l'enfant 22% AJR*chez la mère

*: Apport Journalier Recommandé

Pour obtenir des résultats fiables sur les valeurs qualitatives et quantitatives du *Moringa oleifera* L., des analyses physico-chimiques des feuilles de *Moringa oleifera* L. ont été réalisées au niveau du laboratoire de Centre National de Recherche pour l'Environnement (CNRE) dont les résultats sont exposés dans le tableau qui suit.

Tableau 5 : Compositions des feuilles de *Moringa oleifera* L.

Constituants	Valeurs obtenues pour 100g de matière sèche
Protéines brutes	15,6g
Lipides	5,10g
Cendre	9,21 g
Humidité	15,08 g

Calcium	1,58 g
Zinc	4,78mg
Fer	27,13mg

Les résultats d'analyse physico-chimique des feuilles de *Moringa oleifera* réalisés au sein du CNRE démontrent la présence assez élevée de taux de calcium 1,58g/100g par rapport aux données bibliographiques dans le tableau 16 (taux de calcium dans 100g de matière sèche : 440mg). Il en est de même pour la teneur en lipides (5, 10g/100g de matière sèche : 440 mg) largement supérieure à celle donnée par la référence (Tableau 6). Par contre, le taux de protéines obtenu (15,6g/100g de matière) est très faible par rapport à la valeur donnée par la référence (67g/100g de matière sèche). En fait, la détermination des autres minéraux et vitamines a été limitée par le coût élevé des analyses.

Discussions

La variation des résultats peut se traduire par :

- le changement écologique du milieu de culture de *Moringa oleifera* L.; c'est-à-dire que la composition minéralogique du sol de plantation a une influence directe sur la composition physico-chimique de la plante ;

- la période de collecte des échantillons d'analyses : pendant la période de pluie les éléments constitu-tifs du sol sont quasiment éliminés par l'abondance de pluies ou bien la plante absorbe beaucoup d'eau au lieu des éléments nutritifs, d'où la carence en ces éléments ;

- le temps de conservation des échantillons avant l'analyse pourrait influencer sur certains éléments, entre autres, la vitamine C qui est très labile et peut disparaître rapidement au cours de la conservation à l'état frais.

En effet, d'après les résultats susmentionnés, on peut évoquer un tableau montrant la comparaison des constituants physico-chimiques du *Moringa oleifera* L. par rapport aux besoins journaliers.

Tableau 6 : Composition des feuilles de *Moringa oleifera L.* par rapport aux besoins journaliers (ONN/RD ; 2007)

Constituants	Valeurs obtenues pr 100g mat. sèche	Besoins nutritionnels / jour					
		6-11 mois	1-3ans	4-9ans	Femmes 18-59ans	Femmes enceintes	Femmes allaitantes
Protéine	15,6 g	14,1	14	22,2-	41	47	58,5
Calcium	1,58 g		0,5g/j	0,6g/j			47
Zinc	4,78 mg	0,8	8,4	10,3-	9,8	15	16,3
Fer	27,13 mg	9	6	6-9	29	Elevé	15

Ce tableau montre une teneur importante en micronutriments, spécialement le fer (27,13mg dans 100g de matière sèche), dans le *Moringa oleifera L.* La consommation de ce dernier est effectivement importante non seulement pour les enfants mais aussi pour les femmes enceintes.

Ainsi la consommation de 100g des feuilles de *Moringa oleifera L.* peut couvrir les besoins nutritionnels par jours en micronutriments des enfants et surtout les femmes enceintes.

Le *Cinnamomum zeylanicum*

Des études que menées sur l'écorce de cannelle différemment prélevée (non grattée, grattée, proche pied) ont montré que les composants de l'Huile Essentielle de cette plante est très bénéfique pour la santé. Le principe actif majeur est le cinnamaldéhyde.

Résultats

En fait, "grattée" veut dire que l'on a d'abord retiré la cuticule qui couvrait l'écorce, et « proche pied » signifie que le prélèvement a été fait à environ 10 cm du sol du pied de cannellier. Par de multiples hydro distillations à l'échelle industrielle avec Phael-Flor, un des pionniers des Huiles Essentielles BIO de Madagascar, nous avons fait des analyses en chromatographie en phase gazeuse et voici récapitulés dans le tableau ci-après nos résultats.

Tableau 7 : Composition des HE des 4 types d'écorce de cannelle étudiés

N° pic	I _k	Constituants identifiés	% relatif dans l'HE totale d'écorce de cannelle non grattée	% relatif dans l'HE fraction lourde d'écorce de cannelle non grattée	% relatif dans l'HE totale d'écorce de cannelle grattée	% relatif dans l'HE totale d'écorce de cannelle proche pied	% relatif de la littérature
1		α -pinène	2,0	-	1,1	2,5	0,7
2	1083	Camphène	0,7	1,2	0,5	1,3	1,2
3	1123	β -pinène	0,6	0,9	0,5	1,3	0,6
4	1126	α -phellandrène	0,2	0,4	0,1	0,3	0,6
5	1214	β -phellandrène	1,5	1,2	0,4	1,6	-
6	-	α -terpinène	0,7	1,9	0,4	0,7	0,4
7	1226	cinéole-1,8	0,9	2,2	1,3	3,1	2,0
8	-	-	-	8,8	2,6	4,2	-
9	-	-	0,3	0,9	0,7	3,5	-
10	-	-	1,5	2,2	1,3	2,5	-
11	1490	linalol	0,4	0,8	0,7	0,2	2,4
12	1516	camphre	1,3	6,6	7,3	37,5	-
13	-	-	0,4	0,3	0,3	0,2	-
14	-	β -caryophyllèn	2,0	6,0	1,3	1,5	3,0
15	-	α -humulène	2,3	8,6	6,4	-	-
16	-	-	0,3	0,8	0,5	1,3	-

17	-	-	-	16,5	-	-	-
18	-	-	0,4	1,2	1,1	0,4	-
19	-	-	0,7	0,4	0,9	2,4	-
20	-	-	-	0,2	0,3	1,7	-
21	-	-	0,4	0,5	0,7	0,3	-
22	-	--	-	0,2	-	-	-
23	-	-	0,2	-	0,5	-	-
24	-	-	0,3	26,1	0,6	0,2	-
25	-	cinnamaldéhyde	60,7	4,0	33,7	24,8	75,0
26	-	acétate de cinnamyle	12,6	0,9	29,4	1,7	5,0
27	-	Eugénol	2,2	0,6	2,6	1,9	2,2
28	-	Acétate d'eugényle	0,6	-	0,6	-	0,2

Pour les monoterpènes et les sesquiterpènes dont l' α -pinène, le camphène, l' β -pinène, l' α -phellandrène, l' α -terpinène, le β -phellandrène et l' α -humulène, leur teneur dans les différents types d'écorces par rapport à la littérature est de l'ordre de 7% (Jansen, P.C.M., 2005) et (Jantan, I.,2012).

HE totale de l'écorce non grattée	10%
Fraction lourde de l'HE de l'écorce non grattée	23%
HE totale de l'écorce grattée	12%
HE totale de l'écorce proche pied	9%

On enregistre une proportion élevée en terpènes pour la fraction lourde de l'HE de l'écorce non grattée, en particulier le β -caryophyllène qui est de 6%. Ceci pourrait être dû à la matière première qui n'a pas été bien séchée. La hauteur en terpènes nuit à la qualité de l'HE. Cependant, ces résultats permettent d'avancer que ces HE sont de qualité moyenne.

Pour le cinnamaldéhyde, constituant majeur, on note des valeurs comprises entre 24,8% et 60,7%, alors que la littérature donne entre 60 et 75% (Chen, J.,2013), (Imdad, A., 2012), (Jansen, P.C.M., 2005) et (Jantan, I.,2012). La catégorie non grattée fournit la meilleure teneur en cinnamaldéhyde que l'échantillon d'écorce grattée.

Pour la variété non grattée, la teneur en cinnamaldéhyde de 60,7% n'est pas loin de celle donnée par la littérature et préconisée par les normes (60 à 75%). Le pic de l'acétate de cinnamyle qui suit le cinnamaldéhyde est présent avec un pourcentage plus que le double de la teneur annoncée par la littérature. Ceci pourrait provenir de la dégradation du cinnamaldéhyde.

La fraction lourde de l'HE de la catégorie non grattée contient 26,1% de cinnamaldéhyde. On pourrait expliquer cette faible teneur du fait qu'elle contient un taux peu significatif, d'où la nécessité de bien gérer le temps d'extraction afin de ne pas perdre la partie lourde qui, généralement, sort vers la fin de l'extraction, la partie dense de l'HE étant difficilement extraite et entraînée par l'eau.

Toutefois, il convient de noter que cette faible teneur en cinnamaldéhyde et dérivés est anormale du moins si l'on compare les résultats des deux HE de la catégorie non grattée : les produits aromatiques oxygénés, en l'occurrence le cinnamaldéhyde, plus denses que l'eau, devraient être décantés dans la partie lourde.

On pourrait également penser que l'échantillon végétal extrait n'était pas bien préparé pour l'extraction, que l'extraction elle-même a dégradé l'HE, que l'HE s'est dégradée durant le laps de temps entre l'extraction et l'analyse, ou qu'il y a eu adultération naturelle et/ou anthropique de l'espèce et/ou de l'HE, ou plusieurs de ces arguments entrant en synergie.

Pour l'écorce grattée, une teneur en cinnamaldéhyde de 33,7% est observée, on reconnaît le pic de l'acétate de cinnamyle avec un pourcentage de 29,4%. Ce résultat inciterait à dire qu'il y a certainement une dégradation du cinnamaldéhyde, pouvant être dû aux artéfacts lors du stockage des produits (oxydation et effet de la lumière), ou durant l'extraction elle-même (dégradation thermique et acide), ou encore durant l'analyse chromatographique en phase gazeuse par dégradation thermique lors de l'évaporation dans l'injecteur.

Pour l'HE d'écorce de la catégorie « proche pied », la teneur en camphre de 37,5% est un résultat logique puisque l'odeur elle-même de l'essence légère contenant 24,8% de cinnamaldéhyde pourrait provenir de mé-lange des écorces. Le produit obtenu n'est pas commercialisable, car il ne faut pas oublier que le cambium, méristème primaire générateur, et le phloème, conducteur ascendant des produits nutritifs, sont situés près de la partie corticale et peuvent être endommagés lors du prélèvement de l'écorce au moment du raclage de l'arbre.

Tous ces résultats montrent néanmoins que l'espèce considérée s'apparente beaucoup plus à *Cinnamomum zeylanicum* (*C. verum*), plutôt qu'à *C. cassia* dont la teneur élevée en cinnamaldéhyde supérieure à 85% la différencie chimiquement de la première.

Voici les résultats des analyses faites à l'INSTN pour des échantillons d'écorce de cannelle grattée dont le premier provient d'un tronc d'arbre très âgé, le second d'un arbre mature et le dernier d'un jeune arbre.

Tableau 8 : Compositions élémentaires de 3 types d'écorce de cannelle selon leur maturité

Eléments	Unité	Vieille écorce	Ecorce mature	Jeune écorce
Sodium (Na)	mg/kg	762,50 ± 68,63	1144,50 ± 103,01	700,50 ± 63,05
Magnésium (Mg)	mg/kg	572,25 ± 51,50	405,45 ± 32,44	162,20 ± 12,98
Aluminium (Al)	mg/kg	226,25 ± 20,36	43,75 ± 3,06	53,70 ± 3,76
Silicium (Si)	mg/kg	444,35 ± 39,99	290,20 ± 23,22	249,30 ± 19,94
Phosphore (P)	mg/kg	954,40 ± 95,44	978,15 ± 88,03	698,50 ± 62,87
Soufre (S)	mg/kg	1043,00 ± 104,30	910,55 ± 91,06	703,05 ± 70,31
Chlore (Cl)	mg/kg	376,70 ± 30,14	279,55 ± 22,36	169,45 ± 13,56
Potassium (K)	mg/kg	8774,50 ± 789,71	5638,00 ± 507,42	6668,00 ± 600,12
Calcium (Ca)	%	0,98 ± 0,08	1,37 ± 0,12	1,65 ± 0,16
Titane (Ti)	mg/kg	35,75 ± 2,86	21,95 ± 1,76	9,45 ± 0,76
Chrome (Cr)	mg/kg	2,45 ± 0,17	4,85 ± 0,34	2,45 ± 0,17
Manganèse (Mn)	mg/kg	308,20 ± 24,66	317,70 ± 25,42	225,05 ± 20,25
Fer (Fe)	mg/kg	327,10 ± 29,44	238,30 ± 16,68	88,75 ± 7,10
Cobalt (Co)	mg/kg	< 3,00	< 3,00	< 3,00

Nickel (Ni)	mg/kg	1,20 ± 0,08	1,70 ± 0,12	1,05 ± 0,07
Cuivre (Cu)	mg/kg	9,25 ± 0,74	8,10 ± 0,65	5,75 ± 0,46
Zinc (Zn)	mg/kg	16,60 ± 1,49	11,90 ± 1,07	7,00 ± 0,63
Arsenic (As)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Sélénium (Se)	mg/kg	< 0,50	< 0,50	< 0,50
Brome (Br)	mg/kg	1,55 ± 0,11	0,95 ± 0,07	0,80 ± 0,06
Rubidium (Rb)	mg/kg	37,65 ± 3,01	16,85 ± 1,35	14,70 ± 1,18
Strontium (Sr)	mg/kg	72,35 ± 6,51	74,85 ± 6,74	61,55 ± 5,54
Plomb (Pb)	mg/kg	0,65 ± 0,05	0,65 ± 0,05	< 0,1

Tous ces résultats montrent que l'écorce mature qui est la plus prisée, est riche en éléments minéraux.

L'Aphloia theiformis

Extrêmement répandue dans les îles de l'océan Indien, l'*Aphloia theiformis* est très utilisée contre diverses maladies. Les recherches bibliographiques effectuées permettent d'affirmer que les Ntaolo (anciens) malagasy ont bien su bénéficier au maximum des bienfaits de l'*Aphloia theiformis* notamment dans ses propriétés anti-inflammatoires et immunostimulantes.

En 2018, Elodie Clain et *al.* de l'île de La Réunion a même montré que l'extrait d'*Aphloia theiformis* exerce un puissant effet antiviral contre les souches ZIKV (Zoonotic Zika virus) des lignées africaines et asiatiques, y compris les souches épidémiques. L'effet antiviral de cet extrait d'*Aphloia theiformis* a été étendu aux isolats cliniques du virus de la dengue (DENV) des quatre sérotypes d'hépatocytes humains. L'*Aphloia theiformis* a inhibé l'entrée du virus dans les cellules hôtes en agissant directement sur les particules virales, altérant ainsi leur attachement à la surface cellulaire. Les observations au microscope électronique ont révélé que l'organisation des particules de ZIKV a été gravement affectée par l'*Aphloia theiformis*.

Elodie Clain et *al.* (2018) propose un modèle d'action antivirale pour l'*Aphloia theiformis* contre les favivirus qui mettent en évidence le potentiel des plantes médicinales comme prometteuses sources de composés antiviraux d'origine naturelle pour prévenir les infections ZIKV et DENV.

CONCLUSION

Le *Curcuma longa* L. fait partie des aliments incontournables dans notre vie de tous les jours, pour notre système immunitaire et notre bien-être.

Le Curcuma de Madagascar est constitué en majeure partie par la famille Turmerone, à savoir :

- pour Ar-Turmerone, entre 42,19 à 47,32%
- pour α -Turmerone, entre 16,78 à 17,59%
- pour β -Turmérone, entre 07,26 à 09,63%.

La région de Manjakandriana constitue la zone fournissant les échantillons de poudre de rhizome de *Curcuma longa* L qui présentent des composés minéraux majeurs dont le Magnésium ($28000,0 \pm 280,0$), le Calcium ($1236,5 \pm 111,3$ mg/kg) et le Fer ($1102,0 \pm 110,2$).

La combinaison de la Cannelle, avec son actif majeur, du cinnamaldéhyde et ses éléments minéraux dont le Calcium situé entre 0,98% et 1;65%, du Moringa et ses macro et micro nutriments, dont le Fer avec un taux de 27,13% par 100 gr de poudre de feuilles séchées, et du Voafotsy avec ses polyphénols en infusion, pour ses activités antioxydantes, drainante, anti-virale, entre autres, constitue une opportunité réelle pour booster la santé de la population de Madagascar.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Abdel-Lateef, E. et al. (2016) - Bioactive chemical constituents of *Curcuma longa* L. rhizomes extract inhibit the growth of human hepatoma cell line (HepG2). (2016). In *Acta Pharmaceutica*, 66(3), 387-398.
- 2) Akinyemi, A.J., & Adeniyi, P.A.. (2018) - Effect of essential oils from ginger (*Zingiber officinale*) and turmeric (*Curcuma longa*) rhizomes on some inflammatory biomarkers in cadmium induced neurotoxicity in rats. In *Journal of Toxicology*.
- 3) Bergel, E. et al. (2010)- Maternal calcium supplementation during pregnancy and dental caries of children at 12 years of age: follow-up of a randomized controlled trial. In *Acta Obstetricia et Gynecologica Scandinavica*, 89, 1396-1402.
- 4) Blanco-Rojo, R. & Vaquero, M. P. (2019) - Iron bioavailability from food fortification to precision nutrition..In *A review. Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 51, 126-138.
- 5) Bonjour, J.P. et al. (2013) - Dairy in adulthood: from foods to nutrient interactions on bone and skeletal muscle health. In *Journal of the American College of Nutrition*, 32(4), 251–263.

- 6) Busani et al., Ogunsina et al. (2011) - Nutritional characterization of Moringa (*Moringa oleifera* Lam.) leaves. In Afr. J. Biotechnol, 10, 12925–12933.
- 7) Ogunsina, B.S., et al. (2010) - Physico-chemical and functional properties of full fat and defatted *Moringa oleifera* kernel flours.. In International Journal of Food Science and Technology, 45, 2433–2439.
- 8) Chen, D.Y. et al. . (2010) - Curcumin inhibits influenza virus infection and haemagglutination activity. In Food Chemistry, 119, 1346-1351.
- 9) Chen, J. et al. (2013) - Chromosome numbers and ploidy levels of Chinese Curcuma species. In Hort. Sci, 48, 525-530.
- 10) Chen, W. F. et al. (2006) - (2006) - Curcumin and its analogues as potent inhibitors of low density lipoprotein oxidation: H-atom abstraction from the phenolic groups and possible involvement of the 4-hydroxy-3-methoxyphenyl groups. In Free radical biology & medicine, 40(3), 526–535.
- 11) Cormick, G. et al. (2015) - Calcium supplementation for prevention of primary hypertension. In Cochrane Database Syst Rev, 2015(6):CD010037.
- 12) Cronin, J. R. (2003) - Curcumin: Old spice is a new medicine. In Alternative and Complementary Therapies, 9, 34-38.
- 13) Damalas, C.A. (2011)- Potential uses of turmeric (*Curcuma longa*) products as alternative means of pest management in crop production. In Plant Omics 4, 136-141.
- 14) Das, K. (2016) - Turmeric (*Curcuma longa*) oils. In: Preedy, V.R. (Ed.), Essential Oils in Food Preservation, Flavor and Safety. Academic Press, San Diego (pp. 835-841).
- 15) Delveau P.; Boiteau P. (1980) « Huile à intérêt pharmacologique, cosmétologique et diététique IV ». In Plantes médicinales et phytothérapies, 14 (1), p 29 – 33.
- 16) Dias Ferreira, F. et al. (2013) - The inhibitory effects of *Curcuma longa* L. essential oil and curcumin on *Aspergillus flavus* link growth and morphology. In The Scientific World Journal, 2013, 343804.
- 17) Duvoix, A. et al. (2005) - Chemopreventive and therapeutic effects of curcumin. In Cancer letters, 223(2), 181–190.
- 18) Fahey, J. W. (2005) - *Moringa oleifera* : A review of the medical evidence for its nutritional, therapeutic, and prophylactic properties. In Part 1. Trees for Life Journal, 1, 1–15.
- 19) Fan, Y. et al. (2016) - Determination on nutritional components in seeds of *Moringa oleifera*. In Food and Nutrition in China, 22(5), 69–72.

- 20) Fan, Y. et al. (2020) - Food as medicine: a possible preventive measure against coronavirus disease (COVID-19). In *Phytotherapy Research*, PTR, 10.1002/ptr.6770.
- 21) Frautschy, S. A. et al. (2001) - Phenolic anti-inflammatory antioxidant reversal of Abeta-induced cognitive deficits and neuropathology. In *Neurobiology of aging*, 22(6), 993–1005.
- 22) Guimarães, A.F. et al. (2020) - Essential Oil Of *Curcuma longa* L. Rhizomes Chemical Composition, Yield Variation And Stability. In *Química Nova*, 43(7), 909-913.
- 23) Hucklenbroich, J. et al. (2014) - Aromatic Turmerone induces neural stem cell proliferation in vitro and in vivo. In *Stem Cell Res. Ther.*, 5, 100.
- 24) Imdad, A. & Bhutta, Z.A. (2012) - Effects of calcium supplementation during pregnancy on maternal, fetal and birth outcomes. In *Paediatr Perinat Epidemiol.* 26(1), 138-152.
- 25) Iqbal, J., Jilani, G. & Aslam, M. . (2010). - Growth inhibiting effects of plant extracts against the grain moth, *Sitotroga cerealella* (Oliv.) (Gelechiidae : Lepidoptera). In *Pak. J. Zool.* 42, 597-601.
- 26) Jansen, P.C.M. (2005) - *Curcuma longa* L. In: Jansen, P.C.M. & Cardon, D. (Eds). *PROTA (Plant Resources of Tropical Africa / Ressources végétales de l’Afrique tropicale)*. Wageningen, Netherlands.
- 27) Jantan, I. et al. (2012) - Correlation between Chemical Composition of *Curcuma domestica* and *Curcuma xanthorrhiza* and Their Antioxidant Effect on Human Low-Density Lipoprotein Oxidation. In *Evidence-based complementary and alternative medicine : eCAM*, 438356.
- 28) Jayaprakasha, G.K., Singh, R.P., Sakariah, K.K. . (2001) - Antioxidant activity of grape seed (*Vitis vinifera*) extracts on peroxidation models in vitro. In *Food Chemistry*, 73(3), 285-290.
- 29) Kodjio, N. et al. (2016) - Antioxidant Effect of Aqueous Extract of *Curcuma longa* Rhizomes (Zingiberaceae) in the Typhoid Fever Induced in Wistar Rats Model. In *Journal of Advances in Medical and Pharmaceutical Sciences*, 7(3), 1-13.
- 30) Labban, L. (2014) - Medicinal and pharmacological properties of turmeric (*Curcuma longa*): In A review. *Int. J. Pharm. Biomed. Sci.*, 5(1), 17-23.
- 31) Lahatsaravita, B. A. (2003) - Etude comparative des Compositions Chimiques des Huiles Essentielles de Feuilles et de Rhizomes de *Curcuma longa* L. Approche biogénétique Synthèse biomimétique de certains composants.
- 32) Latham, M. (2001) - La Nutrition dans les Pays en Voie de Développement. FAO.

- 33) Le, T. B. et al. (2019) - Evaluation of the anti-trypanosomal activity of Vietnamese essential oils, with emphasis on *Curcuma longa* L. and its components. In *Molecules*, 24(6), 1158.
- 34) Lekshmi, P.C. et al. (2012) - Turmeric (*Curcuma longa* L.) volatile oil inhibits key enzymes linked to type 2 diabetes. In *Int. J. Food Science. Nutr*, 63, 832-834.
- 35) Liao, J. C. et al. (2013) - Antidepressant-like activity of Turmerone in behavioral despair tests in mice. In *BMC complementary and alternative medicine*, 13, 299.
- 36) Liju, V. B., Jeena, K. &Kuttan, R. (2011) - "An evaluation of antioxidant, anti-inflammatory, and antinociceptive activities of essential oil from *Curcuma longa* L.". In *Indian Journal of Pharmacology*, 43(5), 526-531.
- 37) Liju, V. B., Jeena, K. &Kuttan, R. Acute and Subchronic Toxicity as Well as Mutagenic Evaluation of Essential Oil from Turmeric (*Curcuma longa* L). (2013). *Food and Chemical Toxicology*, 53, 52-61.
- 38) Lim, G.P. et al. (2001) - The Curry Spice Curcumin Reduces Oxidative Damage and Amyloid Pathology in an Alzheimer Transgenic Mouse. In *Journal of Neuroscience* 1, 21 (21) 8370-8377.
- 39) Maheshwari, R. K. et al. (2006) - Multiple biological activities of curcumin : a short review. In *Life sciences*, 78(18), 2081–2087.
- 40) Manoharan, Y. et al. (2020) - Curcumin: a Wonder Drug as a Preventive Measure for COVID19 Management. In *Indian Journal of Clinical Biochemistry*, 35(3), 373-375.
- 41) Mehrotra, S. et al. (2013) - Immunomodulatory potential of *Curcuma longa* : A review. In *South Asian J. Exp. Biol.* 3, 299-307.
- 42) Montoro, P. et al. (2016) - Extraction, Sample Preparation, and Analytical Methods for Quality Issues of Essential Oils. In G. Bagetta, M. Cosentino, & T. Sakurada (Ed.). In *Aromatherapy: Basic Mechanisms and Evidence-Based Clinical Use*. (pp. 153). CRC Press: Boca Raton, FL.
- 43) Musallam, K.M. et al. (2011) - Preoperative anaemia and postoperative outcomes in non-cardiac surgery : a retrospective cohort study. In *Lancet* (London, England), 378(9800), 1396–1407.
- 44) Naz, S. et al. (2011) - Composition and Antibacterial Activity of the Essential Oil from the Rhizome of Turmeric (*Curcuma longa* L.). In *Asian Journal of Chemistry*, 23, 1639-1642.
- 45) Norajit, K., Laohakunjit, N., &Kerdchoechuen, O. (2007) - Antibacterial effect of five Zingiberaceae essential oils. In *Molecules* (Basel, Switzerland), 12(8), 2047–2060.

- 46) Oh, S. et al. (2014) - Suppression of inflammatory cytokine production by ar-Turmerone isolated from *Curcuma phacaulis* essential oil. In Chem. Biodivers, 11, 1034-1041.
- 47) Pawitan, J. A. . (2020) - Curcumin as Adjuvant Therapy in COVID-19: Friend or Foe. In Journal of International Dental and Medical Research, 13(2), 824-829.
- 48) Ramírez-Tortosa, M. C. et al. (1999) - Oral administration of a turmeric extract inhibits LDL oxidation and has hypocholesterolemic effects in rabbits with experimental atherosclerosis. In Atherosclerosis, 147(2), 371–378.
- 49) Randrantoarimbola, L. et al. (2020) - Formulation of *Moringa oleifera* Lam. based Bio-fortified Food Supplement for Pregnant Women in Madagascar, Indian Ocean. In Britain International of Exact Sciences (BIOEx) Journal , 2, 533-540.
- 50) Ratiarimananjatovo, N. et al. (2020) - Development Of A Food Supplement “Rice Cake” For Women In Gestation Case Of Antsirabe-Madagascar. In American Journal of Food Science and Health.
- 51) Sahoo, A. et al. (2019) - Qualitative and Quantitative Evaluation of Rhizome Essential Oil of Eight Different Cultivars of *Curcuma longa* L.(Turmeric). In Journal of Essential Oil Bearing Plants, 22(1), 239-247.
- 52) Salehi, B. et al. (2020) - Areca catechu-From farm to food and biomedical applications. In Phytotherapy research : PTR, 34(9), 2140–2158.
- 53) Salehi, B., et al. (2019a) - Convolvulus plant-A comprehensive review from phytochemical composition to pharmacy. In Phytotherapy Research, 34, 315-328.
- 54) Salehi, B. et al. (2019b) - Therapeutic potential of α -and β -Pinene: A miracle gift of nature. In Biomolecules, 9, 738.
- 55) Salehi, B. et al. (2019c) - Piper Species: A Comprehensive Review on Their Phytochemistry, Biological Activities and Applications. In Molecules, 24, 1364.
- 56) Schmidt, E. et al. (2015) - Cytotoxic active constituents of essential oils of *Curcuma longa* and *Curcuma zanthorrhiza*. In Nat. Prod. Commun, 10, 139-141.
- 57) Settaluri, V.S. et al. (2012) - Peanuts and Their Nutritional Aspects-A review. In Food and Nutrition Sciences, 3(12), 1644 - 1650.
- 58) Sharifi-Rad, J. et al. (2019) - Malva species: Insights on its Chemical Composition towards Pharmacological Applications. In Phytotherapy Research, 34, 564-567.
- 59) Sharifi-Rad, M. et al. (2018) - Ethnobotany of the genus *Taraxacum*-Phytochemicals and antimicrobial activity. In Phytotherapy research : PTR, 32(11), 2131–2145.

- 60) Sharma, R.A. et al. (2001) - Pharmacodynamic and pharmacokinetic study of oral Curcuma extract in patients with colorectal cancer. In Clin Cancer Res, 7(7), 1894-1900.
- 61) Shoba, G. et al. (1998) - Influence of piperine on the pharmacokinetics of curcumin in animals and human volunteers. In Planta medica, 64(4), 353–356.
- 62) Siviero, A. et al. (2015) - Curcumin, a golden spice with a low bioavailability. In Journal of Herbal Medicine.
- 63) Skikne B., &Hershko C. (2012) - Iron Deficiency. In: Anderson G., McLaren G. (Eds.) Iron Physiology and Pathophysiology in Humans. Nutrition and Health. In Humana Press. Iron Physiology and Pathophysiology in Humans (pp 251-282).
- 64) Somasundaram, S. et al. (2002) - Dietary curcumin inhibits chemotherapy-induced apoptosis in models of human breast cancer. In Cancer research, 62(13), 3868–3875.
- 65) Sukari, M.A. et al. (2010) - Larvicidal Activity of Some *Curcuma* and *Kaempferia* Rhizome Extracts Against Dengue Fever Mosquito *Aedesaegypti* Linnaeus (Diptera: Culicidae). In Asian Journal of Chemistry. 22. 7915-7919.
- 66) Tavares, W.S. et al. (2013) - Ar-Turmerone from *Curcuma longa* (Zingiberaceae) rhizomes and effects on *Sitophilus zeamais* (Coleoptera: Curculionidae) and *Spodoptera frugiperda* (Lepidoptera: Noctuidae). In Ind. Crop Prod, 46, 158-164.
- 67) Tilak, J. C. et al. (2004) - Antioxidant availability of turmeric in relation to its medicinal and culinary uses. In Phytother, 18(10),798-804.
- 68) Vanisree, A. J., &Sudha, N. . (2006) - Curcumin combats against cigarette smoke and ethanol-induced lipid alterations in rat lung and liver. In Molecular and cellular biochemistry, 288(1-2), 115–123.
- 69) Willcox, J. K., Ash, S. L., &Catignani, G. L. . (2004) - Antioxidants and prevention of chronic disease. In Critical reviews in food science and nutrition, 44(4), 275–295.
- 70) Yue, G.G. et al. (2010) - Evaluation of in vitro anti-proliferative and immunomodulatory activities of compounds isolated from *Curcuma longa*. In Food and chemical toxicology: an international journal published for the British Industrial Biological Research Association, 48(8-9), 2011-2020.
- 71) Zhang, L. et al. (2017) - Composition and bioactivity assessment of essential oils of *Curcuma longa* L. collected in China. In Industrial Crops and Products, 109, 60-73.

EMISSIONS DE GAZ A EFFET DE SERRE DE L'ÉLECTRICITÉ DÉRIVÉE DE LA BALLE DE RIZ

par

RAHELIARILALAO Bienvenue⁽¹⁾

(1) Pofesseur Titulaire, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Avec une production annuelle de paddy oscillant entre 3,4 et 4,7 millions de tonne entre 2005 et 2017, on estime à 800.000 tonnes en moyenne annuelle le potentiel en balle de riz de Madagascar. Cet article se focalise sur la production d'électricité à partir de deux scénarios de procédé de conversion de la balle de riz, le premier basé sur sa combustion (CBC), le second sur sa gazéification (CBG). Ce sont des alternatives potentielles aux centrales thermiques à combustibles fossiles dans les principales régions productrices de riz à Madagascar. Notre objectif est d'estimer les facteurs d'émissions de gaz à effet de serre (GES) notés FE de ces types d'installation dans le contexte de la région Boeny par l'Analyse de Cycle de Vie (ACV) et les émissions qu'ils permettraient d'éviter. Les processus qui composent le système d'étude sont la plantation et la récolte du riz, le transport et l'usinage du paddy, le transport de la balle de riz et sa conversion en électricité. L'originalité de l'approche réside dans la conception de modèles mathématiques de facteurs d'émission rapportés à la balle de riz au niveau de chaque processus. Les FE sont largement inférieurs à ceux de l'électricité d'origine fossile qui oscillent autour de 1 000g éq.CO₂/kWh. Jusqu'à 84% des émissions totales de GES proviennent des cultures de riz sous des régimes hydriques irrigués ou pluviaux. Avec la balle de riz mobilisable du bassin de Marovoay, les centrales thermiques CBR et GBR peuvent assurer respectivement 13,6 % et 9,5% de la production d'électricité de la Région Boeny.

Mots clés : Analyse de Cycle de Vie, Balle de riz, Facteurs d'émission de gaz à effet de serre, Production d'électricité, Région Boeny

ABSTRACT

With an annual paddy production ranging from 3.4 to 4.7 million tons between 2005 and 2017, the rice husk potential of Madagascar is estimated at 800 000 tonnes the average per year. This paper focuses on two scenarios of electricity generation, one based on rice husk combustion (RHC) and one based on rice husk gasification (RHG). These are potential alternatives to fossil fuel power plants in Madagascar's

main rice-producing regions. Our objective is to estimate greenhouse gases emission factors (EF) of these types of power plants in Boeny region using life cycle assessment and to deduce the emissions their establishment would avoid. The processes that make up the study system are rice cultivation and harvesting, paddy transport, rice milling, rice husk transport and its conversion into electricity. The originality of the approach lies in designing mathematical models of emission factors reported to rice husk at the level of each process. EF are largely lower than of electricity generated by fossil fuel around 1000g CO₂.eq/kWh. Up to 84% of GHG emissions come from rice crop when fields are irrigated or rainfed. With the power plants proposed, RHC and RHG, the rice husk potential of Marovoay basin can insure respectively 13,6 % and 9,5% of the electricity production of Boeny region.

Key words : Life Cycle Assessment, Rice husk, , GHG emission factors, Electricity production, Boeny region.

INTRODUCTION

La biomasse désigne l'ensemble des matières organiques d'origine végétale, animale ou fongique pouvant se transformer en énergie. Elle n'est considérée comme une source renouvelable que si sa régénération est au moins égale à sa consommation, ce qui est le cas de la plupart des résidus agricoles. La production annuelle de paddy de Madagascar a oscillé entre 3,4 et 4,7 millions de tonne entre les années 2005 et 2017 (COI, 2018). Sur la base d'une production moyenne annuelle de 4 millions de tonnes, le potentiel en balle de riz est estimé à 800 000 t. La Figure 1 représente les grands périmètres irrigués qui englobent les principales zones rizicoles de la Grande Ile. Leurs productions en paddy au titre de l'année 2018, les rendements ainsi que les surfaces cultivées sont présentés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Production de riz des principales zones rizicoles de Madagascar en 2018

Bassin, plaine et région rizicoles	Production de paddy en tonnes	Rendement rent paddy /ha	Surfaces totales (ha) Irriguées – Pluviales
Plaines de l'Alaotra	540 000	5	30 000 – 70 000
Région Sofia	471 010	2,4	196 125
Région Vakinankaratra	441 840	3 - 3,5	142 203
Région Amoron'i Mania	131 203	2,9	34 868 – 2 040
Bassin du Menabe – Dabara - Ankilizato	146 782	Non disponible	72 035
Bassin de Marovoay	72.000	2,5	19 750 – 8 820
Bassin Mangoky	32.400	3 – 6	5 500
Bassin de l'Itasy	40.000	3 – 5	10 000

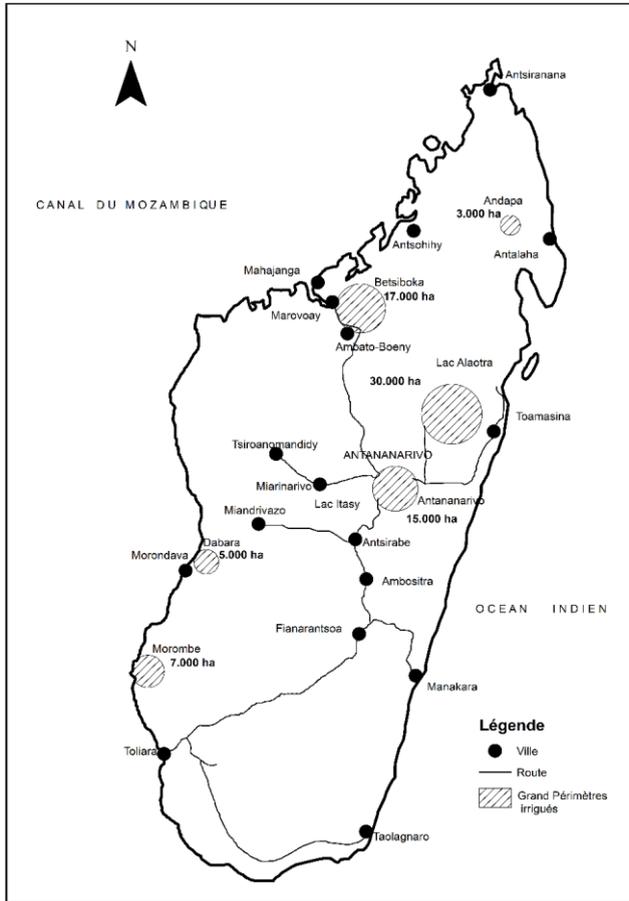


Figure 1 : Les grands périmètres irrigués de Madagascar

L'objectif de cette étude est de déterminer les facteurs d'émissions de gaz à effet de serre (GES) notés FE, de centrales thermiques utilisant potentiellement cette source renouvelable dans le contexte du bassin de Marovoay situé en partie dans la région Boeny et celles des émissions évitées en se référant aux installations existantes.

MATERIELS ET METHODES

Choix du site

L'expérience d'Anjajia, une commune rurale du district d'Ambato Boeny, est un des éléments de justification du choix du Bassin de Marovoay. Dans le cadre de l'électrification rurale, une centrale thermique à balle de riz d'une puissance de 60kW a été installée en 2008 à Anjajia. La matière première était collectée dans un rayon de 12km. La centrale a cessé de fonctionner au début de l'année 2014 suite à un problème technique non résolu sur la chaudière. Un groupe électrogène de 80kVA a pris le relais depuis. Par ailleurs, l'activité liée à la production de riz, avec deux à trois récoltes par

an, s'étale sur 210 à 239 jours. La localité concentre en outre des unités de traitements du paddy de petite taille, ce qui constitue un atout majeur pour le circuit de collecte de la balle de riz. Les utilisations de cette dernière en tant que combustible dans la cuisson des briques d'argile et amendement du sol une fois brûlée sont considérées comme marginales dans cette partie de Madagascar. Dans le rapport final de la Commission de l'Océan Indien (COI, 2018), il est estimé qu'elles n'entament que 3% de la production totale. Avec l'hypothèse que les pertes au niveau de l'entreposage, du chargement et des transports soient de 1%, le potentiel mobilisable de balle de riz pour la production d'électricité est estimé à 13 824 t au titre de l'année 2018. Et comme la plupart des régions circonscrites ou attenantes aux grands centres rizicoles, Boeny est alimentée exclusivement en électricité d'origine fossile délivrée par des centres autonomes (ORE, 2017, ORE, 2018).

Tableau 2 : Production et source et d'électricité des principaux régions et districts producteurs de riz

Région	Répartition	Production 2017 en kWh	Production 2018 en kWh	Source de l'électricité
AlaotraMangoro	Totale régionale	10 162 681	10 675 187	Diesel
Boeny	Totale régionale	30 050 070	47 172 892	Fuel lourd
		43 242 635	31 029 497	Diesel
	Marovoay	2 373 780	2 673 508	Diesel
Amoron'i Mania	Totale régionale	4 786 953	4 920 425	Diesel
	Ambatofinandrahana	271 789	263 082	Diesel
	Ambositra	4 405 161	4 544 799	Diesel
Menabe	Totale régionale	12 558 035	12 582 827	Diesel
	Mahabo	728 187	751 323	Diesel
Soafia	Totale régionale	12 670 672	13 858 454	Diesel
	Bealalana	850 815	833 017	Diesel
	Befandriana Nord	1 142 723	1 142 723	Diesel

Procédés de production d'électricité

Les schèmes au sein des centrales thermiques proposées se réfèrent à des procédés de conversion largement répandus dans plusieurs pays de l'Asie. Le CBR consiste en la combustion de la balle de riz en lit fluidisé. L'énergie thermique dégagée sert à produire de la vapeur à haute pression activant une turbine reliée à une génératrice. Dans le GBR, chauffée à des températures élevées dans un environnement dépourvu d'oxygène, la balle de riz est transformée en gaz de synthèse formé

principalement d'hydrogène et de monoxyde de carbone. La gazéification a lieu dans une gazifière à lit fixe co-courant. Le combustible gazeux alimente ensuite une turbine pour la production d'électricité.

Mise en œuvre de l'Analyse de Cycle de Vie (ACV)

Objectif - Champ d'étude

Le champ d'étude couvre l'acquisition de la matière première, les transports et le processus de génération d'électricité (Tableau 3). L'unité fonctionnelle est fixée à 1 kWh.

Tableau 3 : Délimitation du champ d'étude

Phase du cycle de vie	Détails des opérations
Acquisition des matières premières	Plantation du riz
	Récolte– Moissonnage/Battage du riz
	Transports du paddy
	Usinage du paddy
Transport de la balle de riz	Transport de la balle de riz depuis l'unité d'usinage à la centrale thermique
Fabrication du produit principal	Génération de l'électricité

Inventaire du Cycle de Vie

En ACV, l'inventaire des flux de matières entrants et sortants au niveau de chaque phase est classiquement mis à l'échelle de l'unité fonctionnelle. Dans notre approche, les flux sont d'abord déclinés par unité de balle de riz. Le passage à l'unité fonctionnelle s'appuie ensuite sur les données du Tableau 4.

Tableau 4 : Masse de balle de riz M_{BR} , nécessaire à la production de 1 kWh d'électricité

Procédés de conversion	CBR	GBR
M_{BR} en kg	1,3	1,86
Source	(Singh R. I., 2007)	(Islam K., 2008)

Des modèles mathématiques de facteurs d'émissions de GES par unité de balle de riz ont été élaborés pour les phases plantation, moissonnage/battage et usinage du riz, respectivement FE_1 , FE_2 et FE_3 , exprimés en kg éq.CO₂/kg BR.

Modèle mathématique du facteur d'émissions de la plantation du riz

Les émissions de GES imputables à la riziculture sont constituées de méthane issu de la décomposition anaérobie de la matière organique dans les rizières (FAO, 2015). La procédure présentée par la FAO pour estimer les émissions nationales annuelles exprimées en $\text{Gg CH}_4.\text{an}^{-1}$ s'appuie sur l'équation (1) :

$$EM_{\text{riziculture}}(\text{CH}_4) = \frac{1,4 \times EF(C_1S_1 + C_2S_2)}{10^5} \quad (1)$$

C_1 : facteur d'échelle relatif au régime hydrique irrigué de superficie S_1 (ha) récoltée en paddy

C_2 : facteur d'échelle relatif au régime hydrique pluvial de superficie S_2 (ha) récoltée en paddy

1,4 est le facteur de correction imputé à l'utilisation d'amendements organiques

EF désigne le facteur d'émission saisonnier de méthane exprimé en $\text{g m}^{-2}\text{an}^{-1}$ spécifique à chaque pays producteur de riz.

Deux principaux produits sont générés par la riziculture, le paddy et les pailles. Anasontzis *et al.* (2017) ont rapporté que la production de 1t de paddy génère 1t à 1,5t de paille de riz. Le ratio de paddy dans les plants de riz sur pied peut alors être estimé à 40%. L'application de la règle d'allocation de l'ACV au prorata de la masse de paddy α , permet d'accéder à la part des émissions attribuées à ce dernier :

$$EM_{\text{paddy}}(\text{CH}_4) = \frac{1,4 \alpha \times EF(C_1S_1 + C_2S_2)}{10^5} \quad (2)$$

À partir de cette relation, le modèle mathématique développé décline les émissions de méthane dans un premier temps en $\text{Gg éq.CO}_2/\text{tonne de paddy}$:

$$EM_{\text{paddy}}(\text{GES}) = \frac{1,4 \alpha \times EF(C_1S_1 + C_2S_2)}{10^5} \times \frac{\text{PRG}}{P} \quad (3)$$

P : production annuelle de riz paddy, en tonne

PRG : pouvoir de réchauffement global du méthane.

Pour accéder au modèle mathématique du facteur d'émissions de GES par unité de balle de riz lors de phase plantation, on applique une deuxième fois la règle d'allocation de l'ACV au prorata de la masse de balle de riz dans le paddy, noté β . Il en résulte la relation (4). Les données nécessaires à la détermination du facteur d'émission figurent dans le Tableau 5. La production annuelle de paddy correspond à celle de l'année 2018 (Cf. Tableau 1).

$$FE_1 = \beta \frac{1,4 \alpha X EF(C_1 S_1 + C_2 S_2)}{10^2} X \frac{PRG}{P} \quad (4)$$

Tableau 5 : Données de calculs

Grandeur	C ₁	C ₂	EF	PRG	α	β
Unité	ha.an ⁻¹	ha.an ⁻¹	g m ⁻² an ⁻¹	-	%	%
Valeur	1	0,7	20	21	40	20

Modèle mathématique du facteur d'émissions du moissonnage/battage du riz

Cette phase de récolte de riz prévoit l'utilisation de machines agricoles motorisées. Les consommations en diesel spécifiques à l'activité, notées C_{S_m}, sont exprimées en l.ha⁻¹. La moyenne de celles des moissonneuse/batteuses issues de l'étude à grande échelle menée par Xangsayasane et *al.* (2019) dans plusieurs provinces du Laos de 2014 à 2017 s'élève à 11,76 l.ha⁻¹. La valeur qui sera retenue pour les calculs, 12 l.ha⁻¹ est également proche des consommations rapportées par Sharanakumar et *al.* (2011) relatives à des investigations menées en Inde et par Farag et *al.* (2013) correspondant à des études de cas en Égypte. Le modèle mathématique du facteur d'émissions de GES relativement à cette étape est exprimé par la relation (5) :

$$FE_2 = \beta \frac{C_{S_m} X d X DE_m}{10^3 X r X PS} \quad (5)$$

r : rendement de la production de paddy, en t.ha⁻¹.

d : masse volumique du diesel en kg.l⁻¹ _ d = 0,840 kg.l⁻¹

PS : poids spécifique du diesel, en kg.kWh⁻¹ _ PS = 84,38310⁻³kg.kWh⁻¹

DE_m : donnée d'émissions spécifique au fonctionnement de la moissonneuse/batteuse en kg éq.CO₂/kWh_{gasoil}

Modèle mathématique du facteur d'émissions de l'usinage du paddy

La plupart des unités de traitement du paddy disséminées dans les périmètres rizicoles sont alimentées par des groupes électrogènes. De ce fait, le modèle est conçu dans l'hypothèse d'une unité d'usinage alimentée en diesel. Les consommations spécifiques à l'opération, notées C_{S_u}, sont exprimées en litre par tonne de paddy traité. Dans le cas du bassin de Marovoay, pour une rizerie qui arrive à transformer 7t de paddy par jour, les dépenses énergétiques s'élèvent à environ 35l de diesel, soit 5l par

tonne de paddy (COI, 2018). Le facteur d'émissions de cette phase intègre alors des caractéristiques propres au fonctionnement des appareillages.

$$FE_3 = \beta \frac{CS_u \times d \times DE_u}{10^3 \times PS} \quad (6)$$

DE_u : donnée d'émissions spécifique au fonctionnement de la décortiqueuse en kg éq.CO₂/kWh_{gasoil}.

L'usinage par pilonnage manuel du riz paddy est exclu de l'étude.

Facteurs d'émissions des transports

Les facteurs d'émission de transports notés FE_T, se rapportent aux émissions engendrées par les transports de 1t de produit sur une distance de 1km. Ils sont exprimés en kg éq.CO₂/tkm. Les émissions engendrées par les transports d'une masse M de produit en tonne pour générer 1 kWh d'électricité, sur des trajets longs de L km lorsque divers moyens sont mobilisés, sont alors calculées selon la relation (7) :

$$EM_T(\text{en kg éq. CO}_2/\text{kWh}) = M \sum_{i=1}^n FE_{Ti} \times L_i \quad (7)$$

- Transports de combustible

95% des produits pétroliers importés sur le territoire national proviennent des régions du Golfe Persique (Emirats Arabes Unis). Ils sont ensuite acheminés vers des dépôts disséminés dans toute l'Ile depuis le terminal principal d'importation, le port de Toamasina, avant d'être livrés aux centres autonomes et stations-services (OMH, 2019). L'estimation des distances L_i pour chaque moyen de transport i, s'appuie sur le circuit de distribution de l'OMH et les données de Google Earth.

Les quantités de diesel à transporter, exprimées en kg, pour les besoins des machines agricoles sont calculées sur la base de la masse de balle de riz requise pour la production de 1 kWh d'électricité. Dans les relations (8) et (9), les indices m et u font respectivement référence au moissonnage du riz et à l'usinage du paddy :

$$M_m = M_{BR} \frac{\beta \times CS_m \times d}{10^3 \times r} \quad (8)$$

$$M_u = M_{BR} \times \beta \times CS_u \times d \times 10^{-3} \quad (9)$$

- Transports du paddy et de la balle de riz

Les quantités de produits à transporter sont ramenées aux besoins de la génération de 1 kWh d'électricité. On retient l'hypothèse que les transports sont effectués avec le

même type de véhicule caractérisé par le facteur d'émissions FE_T . Par ailleurs, du fait de la concentration des unités de traitement du paddy dans le périmètre des régions rizicoles, on suppose que les distances de transport n'excèdent pas 50km, les distances minimales sont fixées à 10km. Dans tous les cas, la règle sur les transports en ACV prévoit des chargements à 50% de la capacité des moyens de transport et un retour à vide. Les distances sont ainsi multipliées par 2 dans les calculs.

Les facteurs d'émission de transports sont issus du logiciel d'analyse de cycle de vie Global Emission Model for Integrated Systems GEMIS5.0. (Tableau 6). "Ship – Ocean 2005" représente le processus décrivant les transports par bateaux des produits pétroliers du Golfe Persique au port de Toamasina. Les données des processus dits génériques sont dédiées aux pays en développement. "Truck-med-diesel-rural-generic" a été retenu pour les transports par camion et camion-citerne de puissance moyenne sur des routes à faible trafic. "Dieselmotor-generic-agriculture (end energy)" et "Dieselmotor-small-generic" sont les sources des données spécifiques adaptées aux moissonneuses/batteuses et décortiqueuses. Elles sont liées aux transformations de l'énergie du diesel dans les moteurs en énergie mécanique et tiennent compte des rendements de la conversion.

Facteurs d'émissions du processus de génération de l'électricité

Pour le procédé CBR, on adopte le FE établi par Chungsangunsit et *al.* (2014) qui est de 17,16g éq.CO₂/kWh. Dans le cas du GBR, la donnée retenue qui est de 93,63 g éq.CO₂/kWh correspond bien à la production d'électricité par gazéification de résidus de bois, qui a été relevée dans le tableau ci-après.

Tableau 6 : Données d'inventaire relevées dans le logiciel GEMIS 5.0

Phases	Nom du processus	Données d'émission	FE
Moissonnage / Battage du riz	Dieselmotor-generic-agriculture (end energy)	$DE_m = 269,47 \cdot 10^{-3} \text{ kg éq.CO}_2/\text{kWh}_{\text{gasoil}}$	Non pertinent
Usinage du riz	Dieselmotor-small-generic	$DE_u = 1,003 \text{ kg éq.CO}_2/\text{kWh}_{\text{gasoil}}$	Non pertinent
Transports	Ship – Ocean 2005	Non pertinent	$8,9 \cdot 10^{-3} \text{ Kg éq.CO}_2/\text{tkm}$
	Truck-med-diesel-rural-generic	Non pertinent	$305,08 \cdot 10^{-3} \text{ Kg éq.CO}_2/\text{tkm}$
Génération de l'électricité par GBR	bio-SNG-wood forest-EU-ICE-cogen-10MW-2020/an	Non pertinent	$93,63 \cdot 10^{-3} \text{ Kg éq.CO}_2/\text{kWh}_{\text{el}}$

Facteurs d'émissions du processus de génération de l'électricité

Pour le procédé CBR, on adopte le FE établi par Chungsangunsit *et al.* (2014) qui est de 17,16g éq.CO₂/kWh. Dans le cas du GBR, la valeur retenue 93,63 g éq.CO₂/kWh correspond à la production d'électricité par gazéification de résidus de bois issue du processus "bio-SNG-wood forest-EU-ICE-cogen-10MW-2020/an" (Tableau 6).

RESULTATS ET DISCUSSION

Présentation des résultats

Les calculs effectués avec les distances minimale de 10 km et maximale de 50 km dans les transports de paddy et balle de riz ont conduit à des fourchettes de valeurs pour les facteurs d'émission FE.

Tableau 7 : Émissions de GES en g éq.CO₂/kWh

Processus	Procédés de conversion	
	CBR	GBR
Plantation	220,18	315,03
Moissonnage/Battage	3,28	4,70
Usinage du paddy	13,02	18,63
Transports de combustible	0,55	0,79
Transports du paddy et de la balle de riz (10km-50km)	7,93 - 39,66	11,35 - 56,75
Génération de l'électricité	17,16	93,63
Total avec la plantation	262,12– 293,85	444,11– 489,53
Total sans la plantation	41,94 – 73,67	129,10 - 174,50

Analyse des résultats

Deux raisons sont à l'origine de FE plus élevé dans le cas du GBR : la quantité de balle de riz requise pour la génération de 1 kWh d'électricité et les phénomènes plus complexes liés au processus de conversion.

Malgré les distances conséquentes et les différents moyens mobilisés, le processus de transports de combustibles s'avère le moins impactant. Il est suivi de l'utilisation de machine agricole motorisée dont la contribution plafonne au plus à 1% des charges totales.

Les émissions de méthane attribuées à la décomposition anaérobie de la matière organique dans les lames d'eau des rizières inondées constituent les principales sources d'émissions de GES. Avec les deux configurations de technologie de production d'électricité et les hypothèses de l'étude, la phase de plantation cumule à elle seule 64,35 à 84% des émissions totales.

Il est intéressant de relever que, sur un domaine limité à la seule production de paddy comme dans les travaux de recherche menés par Farag A. A. et *al.* (2013) en Egypte, la charge environnementale de la plantation sur champ inondé combinée avec l'usage de fertilisant est prépondérante. En outre, l'investigation a également mis en relief la part minimale de l'utilisation d'engins agricoles motorisés (Tableau 8).

Tableau 8 : Émissions de GES de la production de riz suivant les processus retenus par Farag A. A. et *al.* (2013)

Phase	Plantation (champ inondé)	Brûlage de la paille de riz	Fertilisation à l'azote	Mécanisation motorisée
Emissions de GES en %	53,25	35,82	9,92	1

La phase de plantation exclue, les performances de la balle de riz sont comparables à celles des autres sources d'énergie renouvelables (Tableau 9). Il est cependant intéressant de discerner que l'on peut faire le parallèle avec les centrales hydroélectriques de grande puissance implantées dans certaines régions tropicales caractérisées par de précipitations abondantes, des températures élevées et une forêt dense. Les grands réservoirs où sont piégées les matières végétales sont le siège du même phénomène de dégagement de méthane favorisé par des températures élevées. Il en résulte un FE particulièrement élevé (GEMIS 5.0, 2019). Dans tous les cas, nos résultats sont inférieurs aux valeurs de FE de l'électricité d'origine fossile (Tableau 10).

Tableau 9 : FE de l'électricité générée par des sources renouvelables

Énergies renouvelables sources	Processus / Systèmes de production d'électricité	FE en g éq.CO ₂ /kWh
Eau / Chutes d'eau	Barrage en milieu tropical	750
	Barrage	10 – 30
	Au fil de l'eau	1 – 40
Soleil	Thermique (Dishstirling)	65
	Photovoltaïque	20 – 130
Vent	Eolien – Ferme – Offshore – Onshore	4 – 30

Biomasse	Bagasse	Combustion - Turbine à vapeur	5 – 10
	Biogaz	Méthanisation - Turbine à gaz – Cogénération	5 – 210
	Bois solide	Combustion - Turbine à vapeur	30 – 35
	Résidus bois	Gazéification - Turbine à gaz	93,63 – 104, 64

Source : GEMIS 5.0

Tableau 10 : FE de l'électricité générée par les énergies fossiles

Sources fossiles		Systèmes de production d'électricité	FE en g éq.CO ₂ /kWh
Gaz naturel		Turbine à vapeur – Turbine à gaz	450 – 790
Charbon (Brut – Pulvérisé)		Turbine à vapeur	970 – 1500
Dérivés du pétrole	Fuel lourd	Turbine à vapeur – Turbine à gaz	780 – 1280
	Diesel	Moteur diesel	660 – 1300

Source : GEMIS 5.0

Par contre, la comparaison des nos résultats avec ceux de la littérature qui sont par ailleurs très disparates, s'avère difficile. L'approche commune aux études mentionnées ici est l'ACV. La différence majeure réside d'une part dans les processus sélectionnés, et d'autre part, au niveau des matières et énergies considérées dont certaines sont par ailleurs spécifiques au contexte. La plantation du riz fait partie de ceux de Shafie *et al.* (2012). Cependant, les émissions liées aux régimes hydriques ne sont pas évoquées. Par contre, l'investigation intègre l'usage de fertilisants chimiques et de pesticides. Le modèle mathématique (1) n'inclut que l'usage d'amendements organiques, ce qui correspond plus à la pratique dans le bassin de Marovoay.

La production d'électricité de la majorité des centres autonomes de la région Boeny est assurée par des moteurs diesel alimentés en gasoil. En tenant compte des charges induites par les transports des combustibles, il a été établi que cette électricité est caractérisée par un FE égal à 1328 g éq.CO₂/kWh. Le Tableau 11 présente les productions des systèmes CBR et GBR sur la base d'une quantité de balle de riz annuelle mobilisable identique à celle de 2017, et les émissions de GES que leur implantation permettrait d'éviter.

Tableau 11 : Emissions de GES évitées

Procédé de conversion	CBR	GBR
FE moyen (sans plantation) en g éq.CO ₂ /kWh	57,81	151,8
Production estimée en kWh	10 633 846	7 432 258
Émissions évitées en kg éq.CO ₂	13, 507 10 ⁶	8,742 10 ⁶

CONCLUSION

L'ACV permet de mettre en exergue les charges imputées aux différents processus, depuis l'acquisition des matières premières à la génération de l'électricité.

L'étude a permis de démontrer que les performances de la balle de riz vis-à-vis de l'impact réchauffement global sont comparables à celles des autres sources d'énergie renouvelables dont l'utilisation dans la production d'électricité est plus courante.

Pour réduire la dépendance énergétique aux énergies fossiles, la filière balle de riz pour la production d'électricité mérite d'être exploitée dans les zones à forts potentiels. Malgré des technologies génériques, les spécificités du contexte de l'étude sont déterminantes, les facteurs d'émission de GES devenant ainsi des grandeurs spécifiques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Anasontzis, G.E., Thuy, N.T., Hang, D.T.M., Huong, H.T., Thanh, D.T., Hien, D.D., Thanh, V.N., Olsson, L. (2017). Rice straw hydrolysis using secretomes from novel fungal isolates from Vietnam. In *Biomass and Bioenergy*. 99 : 11-20. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biombioe.2017.02.008>
- 2) Anshar, M., Ani, F.N., Kader, A.S. (2016). Electrical energy potentiel of ricehusk as fuel for power generation in Indonesia. In *Journal of Engineering and Applied Science*. 11 (6). Asian Research Publising Network (ARPN)
- 3) Assanee, N. and Boonwan, C. (2011). State of The Art of Biomass Gasification Power Plants in Thailand. In *Energy Procedia* ,9:299-305. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.09.032>
- 4) Bureau pays du PAM à Madagascar (2019). La filière riz à Madagascar face à la fortification. Rapport de mission. Antananarivo : PAM. 36 p.
- 5) Chungsangunsit, T.,Gheewala, S.H., Patumsawad, S. (2005). Environmental, Assessment of Electricity Production from Rice husk : A case Study in Thaïland. In *International Energy Journal*, 6 (1) : 3.47-3.55.
- 6) Chungsangunsit, T., Gheewala, S.H., Patumsawad, S. (2010). Emission assessment of ricehusk combustion for power production. In *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 2-4 2010, :185-190.
- 7) COI (2018). Étude du potentiel de valorisation énergétique (bioélectricité) de la biomasse ligneuse par conversion thermique dans les Etats membres de la Commission de l'Océan Indien. Rapport final. COI/ENERGIE/SERV/2018/035. 138 pages.

- 8) FAO (2015). Estimation des émissions de gaz à effet de serre en agriculture. Un manuel pour répondre aux exigences de données des pays en développement. Rome : FAO 193 p.
- 9) Farag, A. A., Radwan, H. A., Abdrabbo, A. A., Heggi, M. A. M., McCarl, B. A. (2013). Carbon Footprint for Paddy Rice Production in Egypt. In *Nature and Science*, 11 (12) : 36-45
- 10) Islam, K. (2008). Senior Adviser, SED project, Dhaka : GIZ
- 11) ISO 14044 (2006). Environmental management – Life Cycle Assessment – Requirements and Guidelines.
- 12) Nguyen, H. N., Ha-Duong, M. (2014). Rice husk gasification for electricity generation in Cambodia in December 2014. [Research Report]. Université de Sciences et Technologie de Hanoi. hal-01107615v2 : 13 pages.
- 13) OMH (2019). Bulletin pétrolier. 1ère édition, 1er trimestre 2019. Antananarivo : OMH. 31 p.
- 14) Prasara, A. J., Grant, T. (2011). Comparative of life cycle assessment of uses of ricehusk for energy purposes. In *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16 : 493-502.
- 15) ORE (2017). Synoptique parc de production Décembre 2017 - Excel. www.ore.mg
- 16) ORE (2018). Synoptique parc de production Décembre 2018 - Excel. www.ore.mg
- 17) PrasaraA., J., Čuček, L., Varbanov, P. S., Klemeš, J. J. (2012). Environmental and Economic Performances of Different Technologies for Power Generation from Rice Husks. In *Chemical Engineering Transactions*, 29 : 751-756. Italie : AIDIC Servizi.
- 18) Rachman, A., Rianse, U., Musaruddin, M., Pasolon, Y. (2015). The Potential of Delivering Clean Locally Available Limitless Rice Husk Energy in the Celebes Island Indonesia. In *Energy Procedia*, 79 : 55-60.
<https://doi.org/10.1016/j.egypro.2015.11.476>
- 19) Shafie, S.M., Mahlia, T.M.L., Masjuki, H.H., Rismanchi, B. (2012). Life cycle assessment (LCA) of electricity generation from ricehusk in Malaysia. In *Energy Procedia*, 14 : 499-504. Elsevier Ltd. <http://doi.org/10.1016/j.egypro.2011.12.887>
- 20) Shafie, S.M., Othman, Z., Hami, N. (2016). Study the Development of Paddy Residues Power Generation Based on LCA: A Review. In *Journal of Engineering and Applied Sciences*, 11 (7) : 1665-1670. ©Medwells Journal.
- 21) Sharanakumar, H., Udhaykumar, R., Ramappa, K.T. (2011). Techno economic feasibility of rice combine harvester. In *Engineering And Technology In India*, 2 Issue (1&2) : 13-17

- 22) Singh, R. I. (2007). Combustion of Bio-Mass in an Atmospheric Fbc: An Experience&Study. In Energy Research Indian Institute of Bombay. Paper presented at the International Conference on Advances. December 12-15.
- 23) Xangsayasane P., Phongchanmisai S., Bounphanousai C., Fukai S. (2019). Combine harvesting efficiency as affected by ricefield size and other factors and its implication for adoption of combine contracting service. In Plant Production Science, 22 (1) : 68–76. <https://doi.org/10.1080/1343943X.2018.1561196>

MISSIONS DU CIDST

- ⇒ Valorisation et diffusion des résultats de recherches
- ⇒ Appui des acteurs du développement en information scientifique et technique pour une meilleure prise de décision



APPROCHES NEURONALES POUR LA PREDICTION DES REPONSES STATIQUES D'UNE POUTRE EN FLEXION

par

RANDRIANARISOA Santatra M.⁽¹⁾, ANDRIAMBAHOAKA Lydie C.⁽¹⁾,
RAZAFINJATO Victor⁽²⁾, RAKOTOMALALA Jean L.⁽¹⁾

(1) Ecole doctorale Ingénierie et Géosciences, Université Antananarivo, Madagascar

(2) Institut Supérieur de Technologie d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Les réseaux de neurones artificiels ou RNA sont très peu utilisés en génie civil, alors que leur application est en plein essor dans de nombreuses disciplines. Ils constituent, entre autres, une alternative intéressante aux calculs de structures pour l'approximation et la généralisation des réponses statiques d'une poutre soumise à la flexion simple.

Les réseaux de neurones non bouclés de type perceptron multi-couches ont été utilisés pour approximer les courbes du moment fléchissant et celles de l'effort tranchant. Ainsi, après évaluation des écarts d'erreurs entre les sorties prédites par notre modèle et les sorties réelles issues des équations de la statique, une meilleure performance de l'ordre de 10^{-7} et un coefficient de détermination $R^2=1.00$ ont été trouvés dans la première approche neuronale. L'apprentissage est de type supervisé et une optimisation de la fonction coût par l'algorithme de Levenberg-Marquardt a été mise en place.

Pour tester la précision des RNA à des problèmes encore plus complexes, le degré d'hyperstaticité du modèle étudié a été augmenté au fur et à mesure de notre niveau d'expérimentation. Ainsi, des résultats très satisfaisants sont obtenus en testant notre modèle avec des échantillons qui n'ont pas pu participer à l'apprentissage, et en moyenne, un carré moyen des erreurs de l'ordre de 0.001 a été trouvé.

En conclusion, les RNA sont démontrés à travers ce travail comme étant des outils mathématiques redoutables, très performants, et capables à s'adapter à des problèmes complexes de calcul de structure.

Mots clés : Algorithme Levenberg-Marquardt, Apprentissage supervisé, Calcul de structure, Flexion simple, Réseaux de neurones, Méthode des trois moments, Perceptron multi-couches, Poutre continue

ABSTRACT

Artificial neural network or ANN is not very used in civil engineering, while their application is more exploited in many disciplines. They constitute an interesting alternative to structural calculations to approximate and predict a bending beam's static responses.

Direct neural network like a Multiple Layers Perceptron were used to approximate the bending moment and cutting force. Thus, after evaluation of error between the outputs predicted and the targets, a better performance in the order of 10^{-7} and a coefficient of determination $R^2 = 1.00$ are founded in the first neural approach. The network's training is supervised and an optimization by Levenberg-Marquardt algorithm has been implemented.

To test the accuracy of ANN to even more complex problems, the degree of hyperstaticity of the model was increased as our level of experimentation increased. Thus, very satisfactory results are obtained by testing our model with samples which could not participate in the training, and on average, a mean square error 0.001 was found.

In conclusion, ANNis demonstrated through this article as formidable mathematical tools, very powerful, and able to adapt to complex problems of structural calculation.

Key words : Levenberg-Marquardt algorithm, Supervised training, Structure calculation, Simple bending, Neural network, Clapeyronmethod, Multiple layers perceptron, Continuous beam

INTRODUCTION

Parmi les bases fondamentales des neurosciences, les réseaux de neurones sont connus comme étant une modélisation informatique s'inspirant du fonctionnement du cerveau humain capable à apprendre puis décider, prédire ou classifier, et permettant ainsi de construire un modèle de comportement à partir des données qui lui sont fournies. Vu ses différents avantages, l'intelligence artificielle est très utilisée dans les domaines de la robotique et aéronautique, et dans cet article, elle nous a offert un nouvel axe de recherche en vue d'une exploitation dans les problèmes de calcul de structure.

L'objectif de ce travail consiste à utiliser les réseaux de neurones artificiels ou RNA pour approximer, générer et prédire les diagrammes de sollicitations d'une poutre soumise à la flexion simple en variant le nombre des variables d'entrées du modèle étudié. Ainsi, les sorties prédites par le réseau sont à confronter avec les sorties réelles issues des méthodes statiques de la résistance des matériaux telles que la méthode de Caquot et la méthode des trois moments, afin de mesurer les indicateurs

d'écart des erreurs et conclure sur la performance de notre réseau. Et que finalement, notre modèle peut être employé et exploité par les ingénieurs de structure avec un taux de fiabilité élevé.

MATERIELS ET METHODES

Revue des différentes méthodes

Une revue des différentes méthodes nous permettra de bien mener notre étude. Ainsi, nous pouvons citer : la méthode des trois moments et le principe des réseaux de neurones artificiels.

La méthode des trois moments

Notations et définitions d'une poutre continue

Une poutre continue (Figure 1) est une poutre reposant sur plus de deux appuis simples. Pour une poutre de n travées, on numérote les appuis de 0 à n . La travée i de portée l_i est la travée comprise entre les appuis A_{i-1} et A_i , de moment quadratique I_i suivant l'axe de flexion concerné, de module d'Young E . On appellera F_i le chargement extérieur sur la travée i .

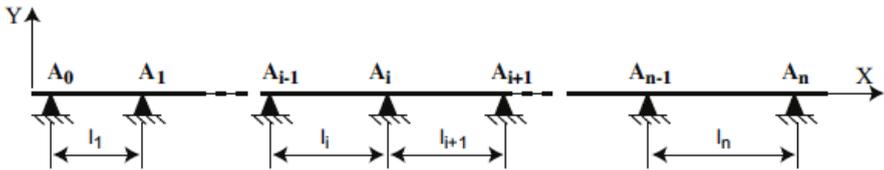


Figure 1 : Notations d'une poutre continue

Le nombre des inconnues hyperstatiques est égal au nombre des appuis intermédiaires ($n - 1$). On peut choisir comme inconnues hyperstatiques les moments fléchissant sur les appuis intermédiaires.

Poutre isostatique associée

Une poutre continue comportant n travées peut être décomposée en n poutres isostatiques sur lesquelles s'appliquent les mêmes charges que sur la poutre continue avec en plus les moments aux appuis. Nous obtenons alors pour la travée $i + 1$ la Figure 2 où :

- M_i désigne le moment sur l'appui A_i ;
- M_{i+1} désigne le moment sur l'appui A_{i+1} ;
- $M_{i+1}(x)$ désigne le moment fléchissant dans la travée $i + 1$ de la poutre continue ;

- $M_{0,i+1}(x)$ désigne le moment fléchissant dans la travée $i + 1$ isostatique associée et chargée uniquement par F_{i+1} sans les moments sur appuis ;
- $V_{0,i+1}(x)$ désigne l'effort tranchant dans la travée $i + 1$ isostatique associée et chargée uniquement par F_{i+1} sans les moments sur appuis ;
- $\Omega_{i,d}^0$ la rotation à droite de l'appui i dans la travée $i + 1$ isostatique associée et chargée uniquement par F_{i+1} sans les moments sur appuis ;
- $\Omega_{i+1,g}^0$ la rotation à gauche de l'appui $i+1$ dans la travée $i+1$ isostatique associée et chargée uniquement par F_{i+1} sans les moments sur appuis.

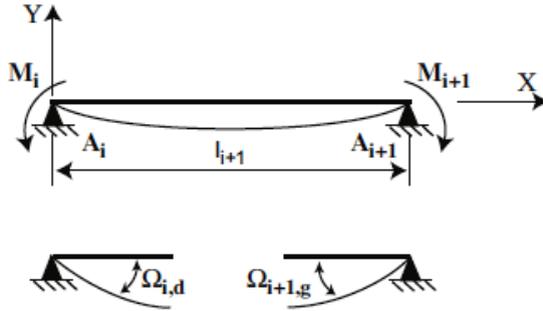


Figure 2 : Poutre isostatique associée

Formule des trois moments

L'équation des trois moments nous donne :

- Pour les travées quelconques :

$$M_{i-1} \left(\frac{l_i}{6EI_i} \right) + 2M_i \left(\frac{l_i}{6EI_i} + \frac{l_{i+1}}{6EI_{i+1}} \right) + M_{i+1} \left(\frac{l_{i+1}}{6EI_{i+1}} \right) = (\Omega_{i,d}^0 - \Omega_{i,g}^0) \quad (2.1)$$

- Pour les travées de mêmes inerties :

$$M_{i-1} l_i + 2M_i (l_i + l_{i+1}) + M_{i+1} l_{i+1} = 6EI (\Omega_{i,d}^0 - \Omega_{i,g}^0) \quad (2.2)$$

Expression des sollicitations et actions de liaison

Les sollicitations dans la travée hyperstatique i sont déterminées par superposition des sollicitations dues au chargement extérieur et celles dues aux moments sur appuis.

Soit, pour le moment fléchissant, on peut écrire :

$$M_i(x) = M_{0i}(x) + M_{i-1} \left(1 - \frac{x}{l_i} \right) + M_i \left(\frac{x}{l_i} \right) \quad (2.3)$$

De même pour l'effort tranchant :

$$V_i(x) = V_{0i}(x) + \frac{M_{i-1}}{l_i} - \frac{M_i}{l_i} \quad (2.4)$$

On déduit les actions de liaisons de l'appui A_i des valeurs de l'effort tranchant à droite et à gauche de celui-ci :

$$Y_{A_i} = V_i(l_i) - V_{i+1}(0) \quad (2.5)$$

Application

En guise d'application, considérons une poutre continue à deux travées supportant des charges courantes d'un bâtiment (charge permanente et charge d'exploitation). Les paramètres de calcul choisis aléatoirement sont :

$q_1 = 1,15$ T/ml (charge ultime de la première travée),

$q_2 = 1,57$ T/ml (charge ultime de la deuxième travée),

$L_1 = 5,20$ m (portée de la première travée),

$L_2 = 4,80$ m (portée de la deuxième travée).

Le schéma de chargement de la poutre est présenté par la Figure 3.

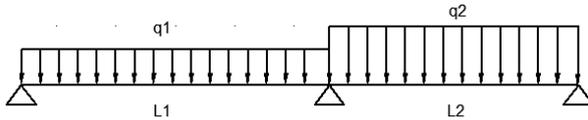


Figure 3 : Schéma de chargement de la poutre étudiée

En appliquant la méthode des trois moments sur la poutre étudiée, les diagrammes de sollicitation (M, V) sont représentés par la Figure 4.

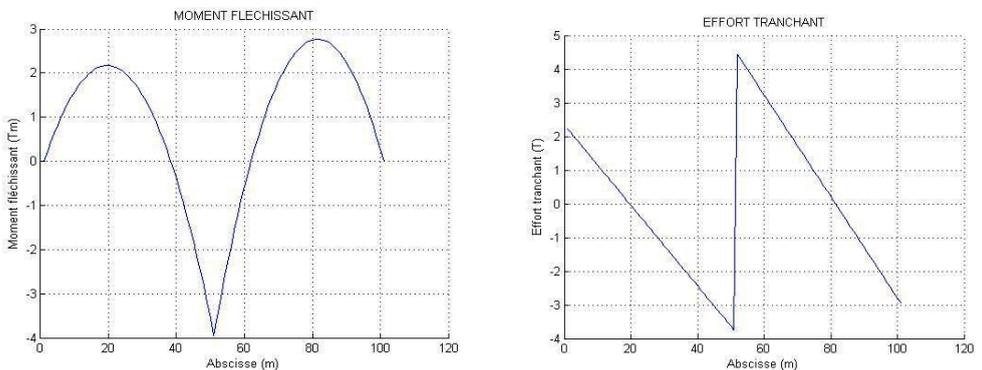


Figure 4 : Diagrammes de sollicitations (M, V) de la poutre

Les réseaux de neurones artificiels (RNA)

Notations et définitions

Un réseau de neurones est constitué d'un graphe pondéré orienté dont les nœuds symbolisent les neurones. Ces neurones possèdent une fonction d'activation qui permet d'influencer les autres neurones du réseau. Les connexions entre les neurones, que l'on nomme liens synaptiques, propagent l'activité des neurones avec une pondération caractéristique de la connexion. On appelle poids synaptique la pondération des liens synaptiques.

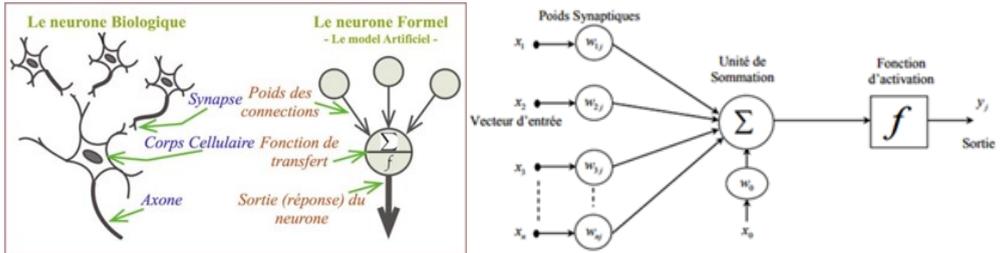


Figure 5 : Neurone biologique et Neurone Formel

Topologie des réseaux neuronaux

On appelle topologie des réseaux, la façon dont les neurones sont connectés entre eux à travers les différentes couches. En général on peut distinguer deux grandes classes de RNA selon leurs topologies.

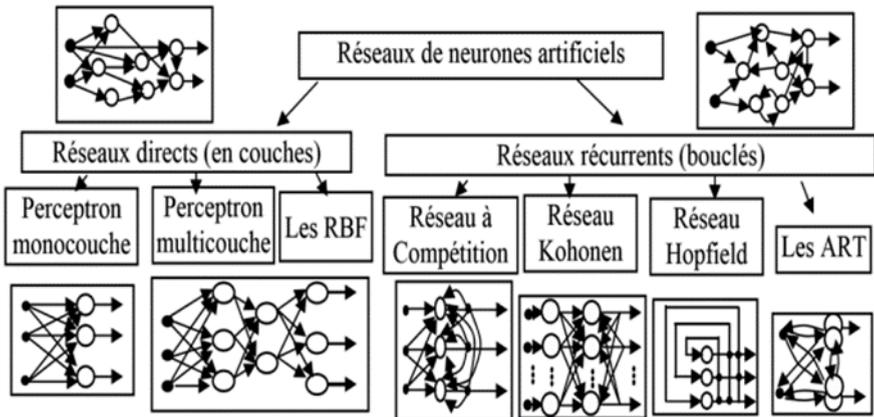


Figure 6 : Topologies des réseaux de neurones artificiels

L'objectif final de cet article consiste à créer un Réseau directe « Non Bouclé ou Statique » (*Feed forward*) afin d'évaluer la précision des réseaux de neurones dans les calculs statiques d'une poutre et d'exploiter au maximum la performance du réseau dans les problèmes plus complexes en flexion.

Les réseaux de neurones sigmoïdes (Multiple Layers Perceptron)

- Architecture

Le perceptron multi-couches PMC (ou MLP) est un des réseaux de neurones les plus utilisés pour des problèmes d’approximation, de classification et de prédiction. Il est composé d’une couche d’entrée, une couche de sortie et une ou plusieurs couches cachées. Les éléments de deux couches adjacentes sont interconnectés par des poids assurant la liaison des différentes couches comme indiqué sur la figure suivante. Sa fonction d’activation est la *tangente hyperbolique*.

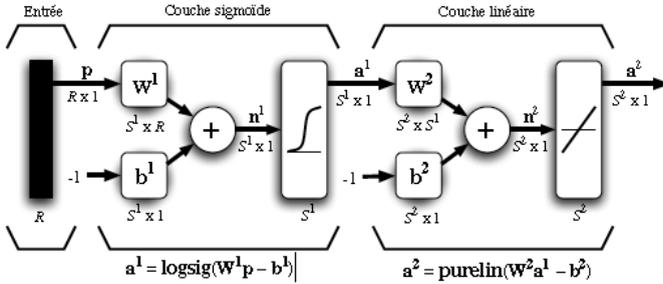


Figure 7 : Architecture du réseau MLP

Soit : w_{nm} les poids reliant la couche d’entrée avec la couche cachée ;

u_{mj} les poids reliant la couche cachée avec celle de la sortie.

Les composants du vecteur d’entrée X du MLP seront pondérés par les poids w_{nm} et ensuite transmis à la couche cachée selon les équations suivantes :

$$C_m = \sum_{n=1}^N x_n w_{nm} \tag{2.6}$$

$$y_m = f(C_m) \tag{2.7}$$

Les sorties de la couche cachée seront aussi pondérées par les poids u_{mj} et transmis ensuite à la couche de sortie selon les équations suivantes :

$$O_j = \sum_{m=1}^M y_m u_{mj} \tag{2.8}$$

$$t_j = g(O_j) \tag{2.9}$$

f et g représentent respectivement les fonctions d’activations des neurones de la couche cachée et celle de la de sortie. Pour notre cas, elles sont des sigmoïdes.

La fonction sigmoïde est : $f(x) = \frac{1}{1+e^{-\alpha x}}$ (2.10)

Sa dérivée est : $f'(x) = \alpha \cdot f(x)[1 - f(x)]$ (2.11)

- Algorithme d'apprentissage

L'apprentissage consiste à adapter les valeurs des poids afin d'obtenir le comportement désiré du MLP. Pour cela, on crée une base d'exemples où chaque exemple est constitué d'un vecteur d'entrée et d'un vecteur de sortie approprié. Un algorithme d'apprentissage connu sous le nom d'algorithme de rétropropagation du gradient a été mis en place en 1985 par Rumelhart et *al.* [1].

Ainsi l'adaptation des poids u_{mj} qui relie la couche cachée à celle de la sortie est comme suite :

$$u_{mj}^{(i+1)} = u_{mj}^{(i)} + n_1 \cdot (t_j - z_j)g'(O_j) \quad (2.12)$$

La mise à jour des poids w_{nm} reliant la couche d'entrée à celle cachée est comme suite :

$$w_{nm}^{(i+1)} = w_{nm}^{(i)} + n_2 \cdot \left\{ \sum_{j=1, i=1}^J (t_j - z_j)g'(O_j)u_{mj} \right\} \quad (2.13)$$

n_1 et n_2 sont les pas d'apprentissage.

Les approches par réseaux neuronaux

Première approche : Approximation des courbes (M, V) par RNA

Ci-après la structure du programme :

On initialise dans un premier temps la fonction à apprendre. Il s'agit ici des deux sorties qui sont les sollicitations (M, V) de la poutre étudiée ;

- Ensuite on crée un réseau de neurone statique tel que le Réseau *MLP (Multiple Layers Perceptron)* ;

- Puis on peut régler certains paramètres d'apprentissage pour trouver le meilleur résultat. Autrement dit, le nombre de couches cachées et le nombre de neurones par couche ont une influence sur la qualité de l'apprentissage ;

- Et au final on trace les courbes sorties par les réseaux (courbe prédite) et on calcule l'erreur de prédiction entre la courbe réelle et celle prédite par le RNA.

La schématique du réseau pour cette première approche est un réseau à une (01) seule variable d'entrée qui est l'abscisse $x(m)$ de l'équation (2.3) et une seule sortie qui est M ou V .

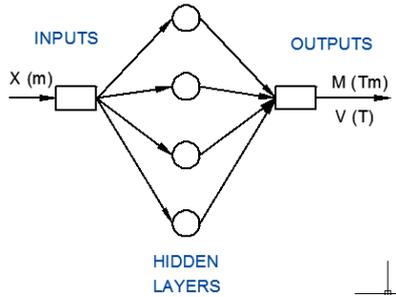


Figure 8 : Schématique du réseau pour la première approche

Deuxième approche : Généralisation des courbes (M, V) par RNA

Dans la deuxième approche, on garde les valeurs $L_1 = 5,20m$, $L_2 = 4,80m$ comme constantes. La problématique consiste à créer un modèle neuronal de type MLP pour générer les diagrammes (M, V) à partir des variables d'entrées (q_1, q_2) choisies aléatoirement par l'utilisateur. Les sorties prédites par le réseau seront ainsi confrontées avec les sorties réelles issues de l'équation (2.2) et de tester la performance des RNA.

Pour ce faire, prenons une base de données composée de 1250 échantillons dont 80% sont utilisés pour la phase apprentissage et 20% pour le test. La plage de variation des variables d'entrées est fixée à $q_i = [0 : 10]$ T/ml.

La schématique du réseau pour cette deuxième approche est un réseau à deux (02) variables d'entrées qui sont (q_1, q_2) et à deux (02) sorties qui sont (M, V) .

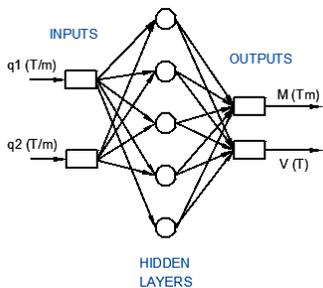


Figure 9 : Schématique du réseau pour la deuxième approche

La technique consiste donc à apprendre au réseau la variation des courbes sur l'ensemble des données relatives aux 1000 échantillons et de tester la performance du réseau pour les 250 échantillons restants.

Ci-après cinq (05) courbes tirées au hasard dans les échantillons destinés pour l'apprentissage, nommées M_1 à M_5 pour le moment et V_1 à V_5 pour l'effort tranchant et une sixième courbe sera à prédire par le réseau à partir des valeurs des variables d'entrées (q_1, q_2) choisies aléatoirement par l'utilisateur :

Tableau 1 : Echantillons d'apprentissage et échantillon de test pour la deuxième approche

Chargement		Moments sur appui intermédiaire	Courbes
$q_1(T/m)$	$q_2(T/m)$	M_{inter}	
8,1474	4,1708	-18,9041	M_1
4,8543	8,7813	-19,4552	M_2
2,7857	1,8634	-7,0326	M_3
6,7877	8,7640	-22,6310	M_4
5,2118	3,7664	-13,5218	M_5
3,1273	5,7844	à prédire par le RNA	M_6

La Figure 10 nous montre les courbes correspondantes aux cinq (05) échantillons pour base d'apprentissage du réseau :

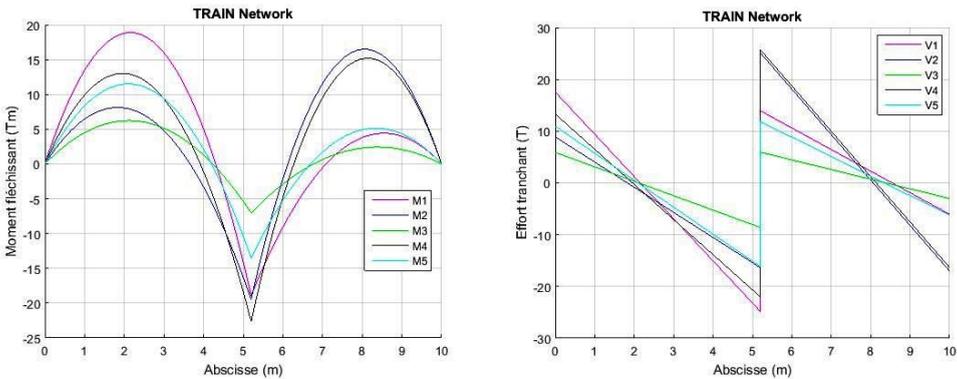


Figure 10 : Courbes pour base d'apprentissage du réseau dans la deuxième approche

Troisième approche : Prédiction des courbes (M, V) par RNA

Dans la troisième approche, on augmente toujours la complexité du système en variant toutes les variables d'entrées du modèle, c'est-à-dire aucune variable d'entrée n'est plus considérée comme constante.

Ainsi, la problématique consiste à créer un modèle neuronal pour automatiser les diagrammes (M, V) à partir des variables d'entrées (q_1, q_2, L_1, L_2) choisies aléatoirement par l'utilisateur. Les sorties prédites par le réseau seront toujours

confrontées avec les sorties réelles issues de l'équation (2.2) afin de tester la performance des RNA.

Pour ce faire, prenons une base de données composée de 375 échantillons dont 80% seront utilisés pour la phase apprentissage et 20% pour le test. Les plages de variation des variables d'entrées sont fixées à $q_i=[0 : 10]$ T/ml et $L_i=[0 : 10]$ m.

La schématique du réseau pour la troisième approche est un réseau à quatre (04) variables d'entrées qui sont (q_1, q_2, L_1, L_2) et à deux (02) sorties qui sont (M, V).

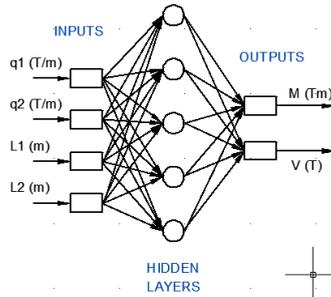


Figure 11 : Schématique du réseau pour la troisième approche

La technique consiste à apprendre au réseau la variation des courbes sur l'ensemble des données relatives aux 300 échantillons et de tester la performance du réseau pour les 75 échantillons restants.

Ci-après cinq (05) courbes tirées au hasard dans les échantillons destinés pour l'apprentissage, et la sixième courbe sera à prédire par le réseau à partir des valeurs des variables d'entrées (q_1, q_2, L_1, L_2) choisies aléatoirement par l'utilisateur.

Tableau 2 : Echantillons d'apprentissage et échantillon de test pour la troisième approche

Chargement		Portée		Moments sur appui intermédiaire	Courbes
q_1 (T/m)	q_2 (T/m)	L_1 (m)	L_2 (m)	M_{app} (Tm)	
8,1474	4,1708	3,0868	3,8977	-8,1963	M_1
2,7857	1,8634	1,7432	1,0730	-0,7126	M_2
1,4197	6,7050	4,4435	3,3446	-5,6711	M_3
1,1751	5,9915	6,4793	2,5528	-5,4617	M_4
5,0791	8,0738	5,3206	3,6475	-15,1755	M_5
3,1373	7,1242	5,4011	4,9012	à prédire par le RNA	M_6

La Figure 12 nous montre les courbes correspondantes aux cinq (05) échantillons pour base d'apprentissage du réseau.

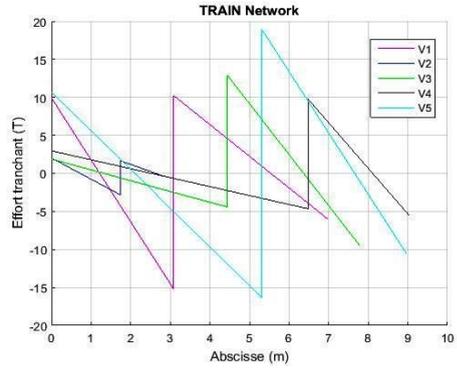
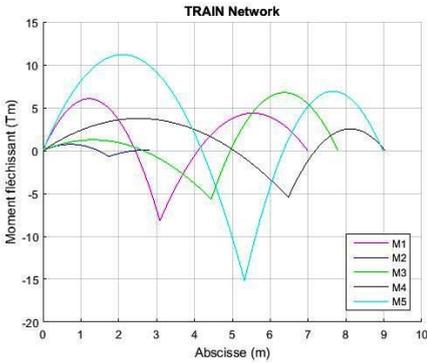


Figure 12 : Courbes pour base d'apprentissage du réseau dans la troisième approche

RESULTATS ET DISCUSSION

On donne ci-après les résultats des différentes simulations numériques faites avec le logiciel Matlab. L'apprentissage du réseau MLP est de type supervisé. La performance à atteindre est fixée à 10^{-7} .

Résultats de la première approche

On lance le programme d'apprentissage des courbes (M, V) avec un nombre de neurone dans la couche cachée égal à 4 neurones. L'architecture du réseau est de la forme MLP [1-4-1-1]. Les diagrammes approximatifs du moment fléchissant et de l'effort tranchant par le RNA sont montrés par les courbes discontinues en rouge sur la Figure 13

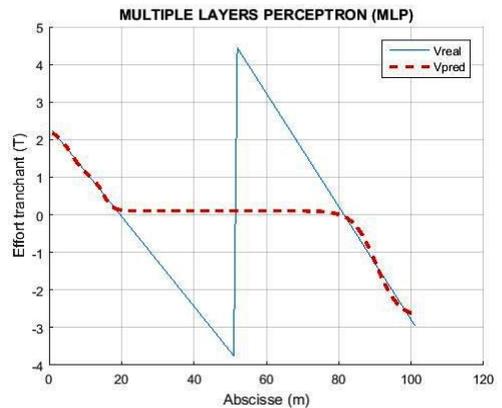
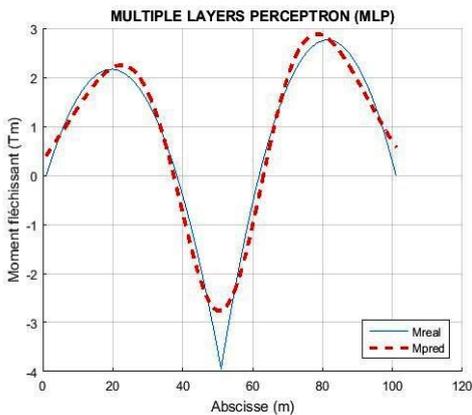


Figure 13 : Diagrammes approximatifs de M et V par le modèle MLP

On voit bien que l'écart d'erreur est trop élevé. Pour améliorer l'apprentissage, on joue sur le nombre de neurones et/ou le nombre d'epochs. Mais les valeurs optimales ne se font pas aléatoirement. Comme procédé d'optimisation, on a tracé

des nuages de points de RMSE (Root Mean Squared Error) et MAE (Mean Absolute Error) en fonction du nombre de neurone de la couche cachée. Ci-après le graphe respectivement pour M et V en fixant le nombre d’itération à 500 epochs.

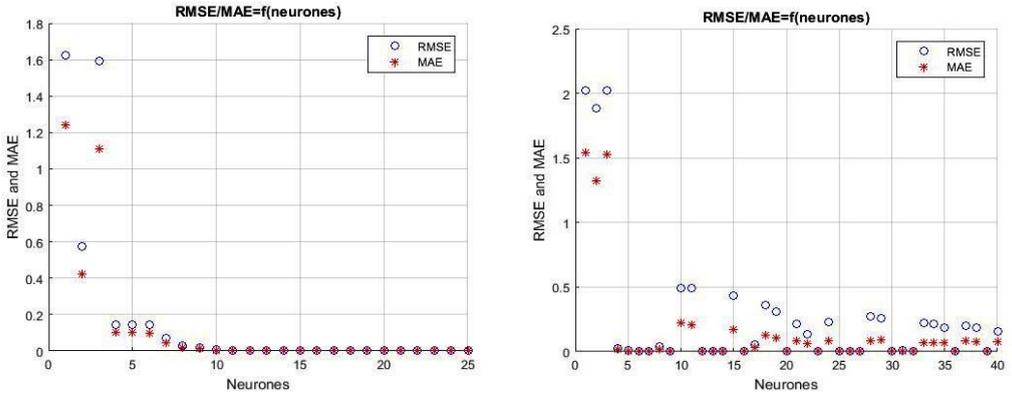


Figure 14 : Nuages de point RMSE et MAE en fonction du nombre de neurones

On en déduit qu’avec un nombre de neurones égal à 16, une performance de $9,262 \times 10^{-7}$ est atteinte pour approximer la courbe du Moment fléchissant et un nombre de 14 neurones avec une performance de $9,991 \times 10^{-8}$ pour celui de l’effort tranchant. Ci-après les diagrammes approximatifs améliorés et optimisés.

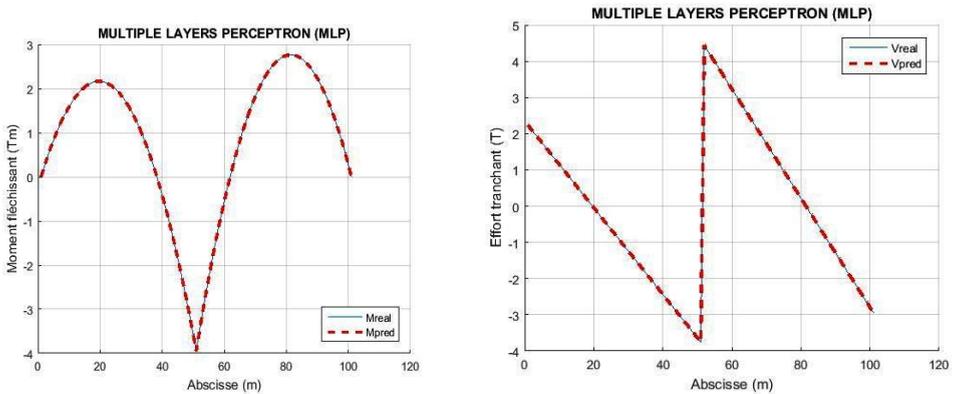


Figure 15 : Diagrammes approximatifs améliorés et optimisés de M et V par réseau MLP

Le coefficient de détermination pour chaque approximation est $R^2=1,00$. Ci-après les graphes des résidus (résidu=Sortie réelle-Sortie prédite par RNA) respectivement pour M et V.

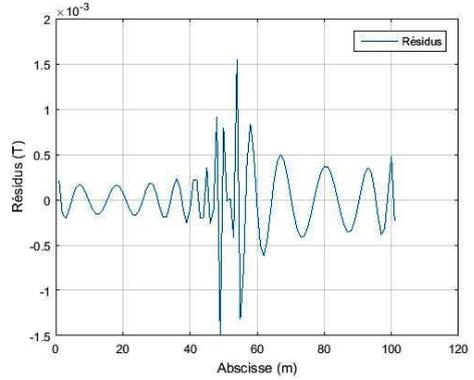
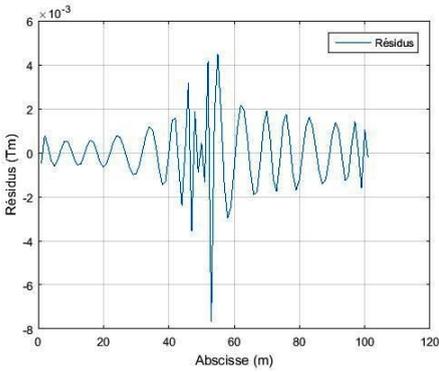


Figure 16 : Graphes des résidus d'approximation respectivement pour M et V par réseau MLP

L'erreur d'approximation est de l'ordre de 10^{-3} . On constate que plus le nombre de neurones est élevé, plus le nombre de degrés de liberté est élevé et plus la fonction modélisée par le RNA peut être complexe, ce qui peut conduire à des résultats erronés. Ainsi, une meilleure performance nécessite un bon paramétrage du réseau.

Résultats de la deuxième approche

Apprentissage

L'apprentissage est réalisé avec une architecture de type MLP [2-50-2-2]. Le nombre maximum de cycles est fixé à 500 epochs. Ci-après les résultats de l'entraînement du réseau

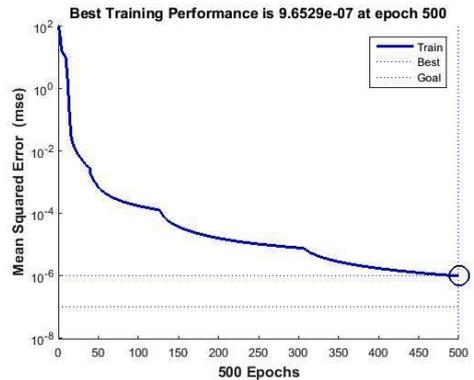
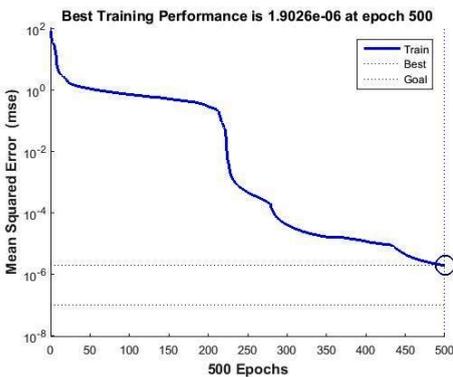


Figure 17 : Performance du réseau pour l'apprentissage de M et V dans la deuxième approche

Une performance de $1,9026 \cdot 10^{-6}$ est atteinte pour l'apprentissage du moment et $9,6529 \cdot 10^{-7}$ pour celui de l'effort tranchant. Les résultats de l'apprentissage nous semble être satisfaisant, il suffit ainsi de tester le réseau.

Test du réseau

Pour tester le réseau, il suffit d'entrer les valeurs des variables d'entrées (q_1, q_2) appartenant dans les 250 échantillons restants qui n'ont pas pu participer dans l'apprentissage. On a choisi aléatoirement $(q_1 ; q_2) = (3,1273 ; 5,7844)$ et la sixième courbe nommée M_{RNA} ou V_{RNA} est celle sortie par le réseau.

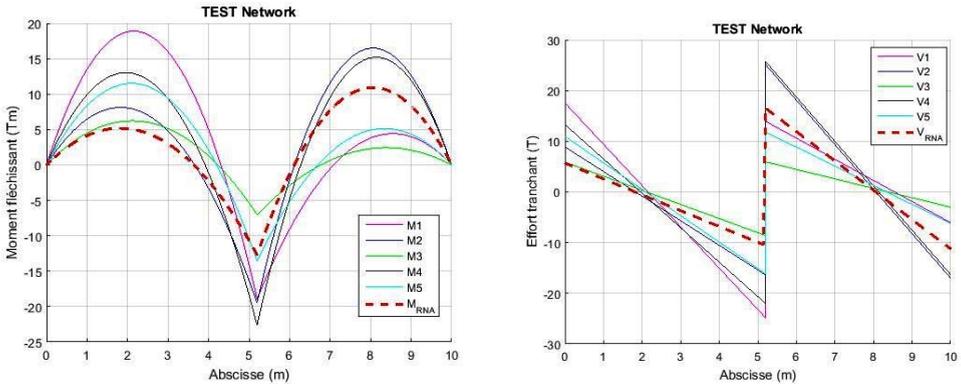


Figure 18 : Courbes du moment fléchissant et effort tranchant générées par le RNA

Le RNA a su générer le diagramme de moment fléchissant et effort tranchant à partir des données des autres courbes appartenant dans à la base d'apprentissage. Autrement dit, l'allure des deux courbes générées par le réseau est tout à fait raisonnable. Afin d'apprécier la qualité de précision du réseau, la Figure 19 nous met en évidence la courbe prédite par le réseau nommée M_{RNA} ou V_{RNA} et celle de la sortie réelle nommée $M_{réel}$ ou $V_{réel}$.

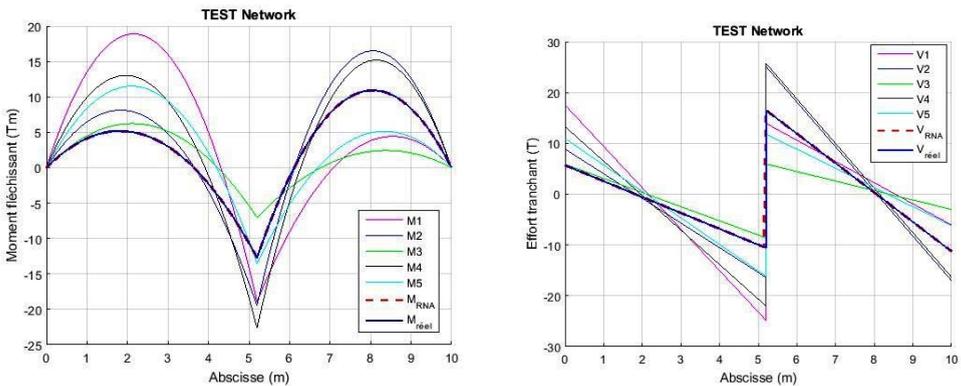


Figure 19 : Courbes des sollicitations réelles et courbes générées par le RNA

Les deux courbes sont presque confondues, la génération des courbes par le réseau est parfaite. Pour éviter la confusion des courbes, dans la Figure 20, on a enlevé les cinq courbes appartenant à la base d'apprentissage et il n'en reste plus que les deux courbes à comparer.

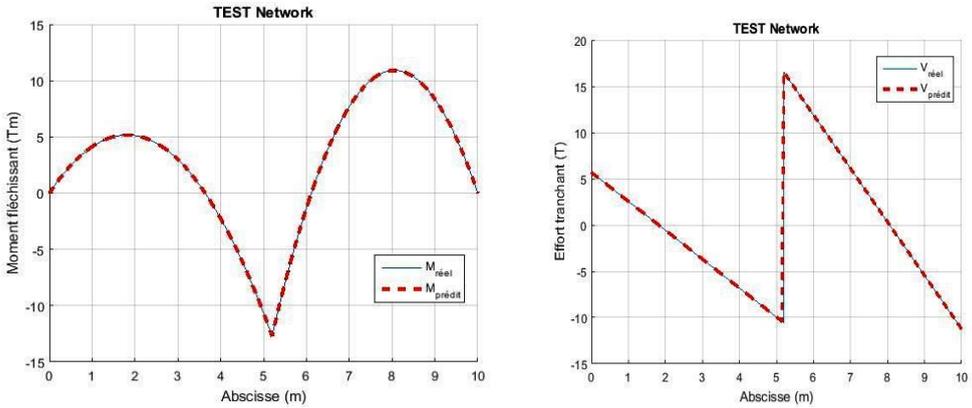


Figure 20 : Comparaison des courbes de sollicitations réelles et générées par le RNA

Les Tableaux 3 et 4 nous montrent les valeurs prédites par le réseau et celles des valeurs réelles sur les points particuliers de la poutre étudiée.

- Pour le moment fléchissant

Taleau 3 : Comparaison des valeurs des moments fléchissant prédites par RNA et valeurs réelles

	Moments sur appuis (Tm)		Moments en travée (Tm)	
	M_{app}	M_{t1}	M_{t2}	
Modèle RNA	-12,6993	5,1741	10,9152	
Modèle réel	-12,6992	5,1736	10,9145	
Ecart absolu	0,0001	0,0005	0,0007	

- Pour l'effort tranchant

Tableau 4 : Comparaison des valeurs des efforts tranchant prédites par RNA et valeurs réelles

	Efforts travée 1 (T)		Efforts travée 2 (T)	
	V_{g1}	V_{d1}	V_{g2}	V_{d2}
Modèle RNA	5,6859	-10,4088	16,5310	-11,2362
Modèle réel	5,6888	-10,5731	16,5282	-11,2369
Ecart absolu	-0,0029	0,1643	0,0028	0,0007

La Figure 21 permet d'apprécier qualitativement les erreurs de prédiction du réseau tout au long de la poutre étudiée.

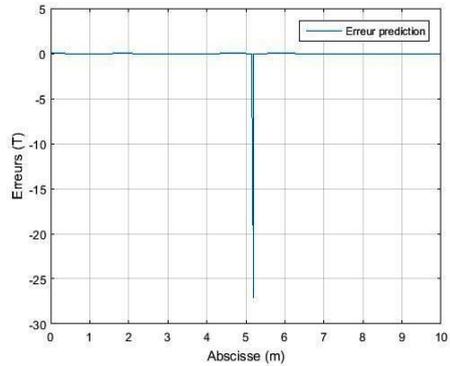
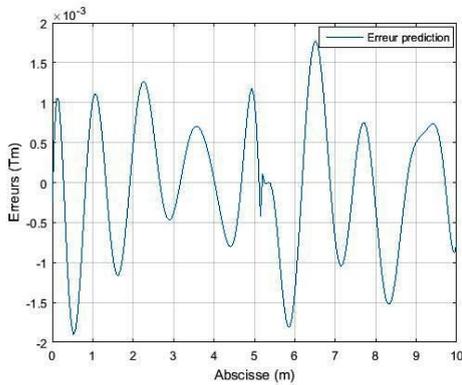


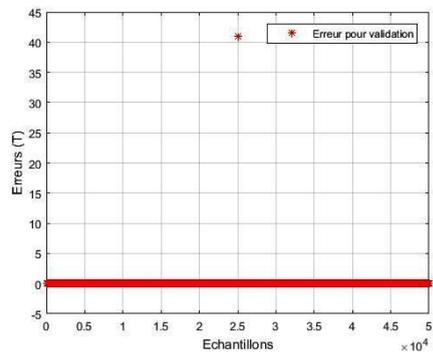
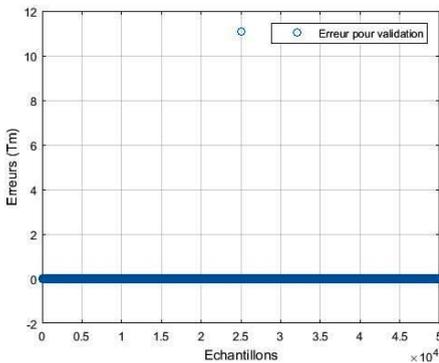
Figure 21 : Courbes des erreurs de prédiction du réseau respectivement pour M et V

L'erreur de prédiction du réseau MLP [2-50-2-2] pour générer la courbe du moment fléchissant est de l'ordre de 10^{-3} tandis que pour celui de l'effort tranchant, l'erreur est quasiment nulle tout au long de la poutre sauf au droit de l'appui intermédiaire où l'on a constaté une valeur importante. En fait, la variation brusque au niveau des courbes de référence est la principale cause. En dépit de cela, on a un bon résultat sauf au niveau de la droite verticale où un petit décalage est observé. En réalité, cette droite n'existe pas, elle sert tout simplement à relier l'effort tranchant de gauche à l'effort de droite de l'appui intermédiaire.

Afin de quantifier la précision du réseau, les indicateurs d'écart d'erreurs calculés sont : $MSE = 7,1753 \cdot 10^{-7}$; $RMSE = 8,4707 \cdot 10^{-4}$; $MAE = 7,0707 \cdot 10^{-4}$.

Validation

Pour pouvoir valider la performance du réseau, nous allons tester tous les 250 échantillons de charge et évaluer les valeurs des indicateurs d'écart afin de conclure la qualité prédictive du RNA. La Figure 22 nous montre les erreurs de prédiction du réseau respectivement pour le moment fléchissant (extrême gauche) et l'effort tranchant (extrême droite). Un zoom a été fait de chaque, afin d'apprécier les valeurs



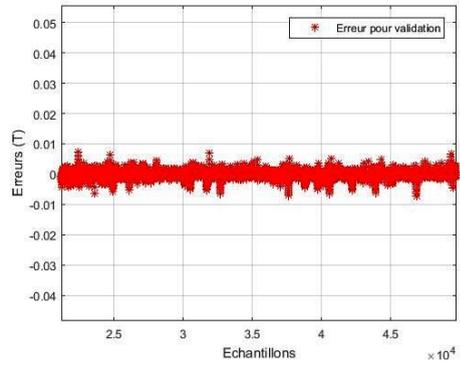
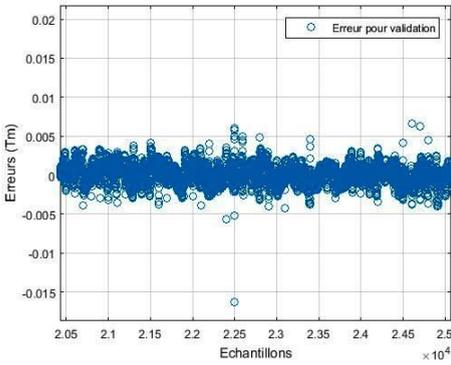


Figure 22 : Erreurs de prédiction pour échantillons de tests de la deuxième approche

On peut dire ainsi que les erreurs commises par notre réseau sont tolérables pour tous échantillons testés. Ci-après les indicateurs d'écart d'erreurs.

Tableau 5 : Indicateurs d'écart des erreurs de prédiction pour échantillons de validation

Indicateurs	Moment fléchissant	Effort tranchant
MSE	0,0025	0,0335
MAE	0,0012	0,0015

Résultats de la troisième approche

Apprentissage

L'apprentissage est réalisé avec une architecture de type MLP [4-50-2-2] pour le moment fléchissant et MLP [4-30-25-2-2] pour celui de l'effort tranchant. Le nombre maximum de cycles est fixé à 2000 epochs. Ci-après les résultats de l'entraînement du réseau.

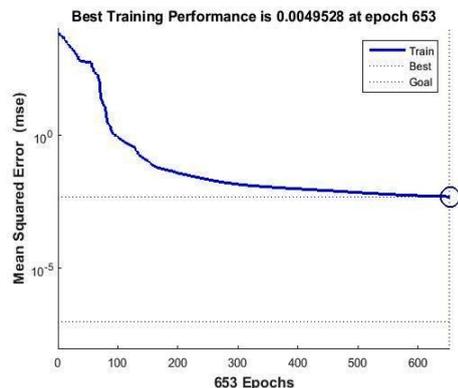
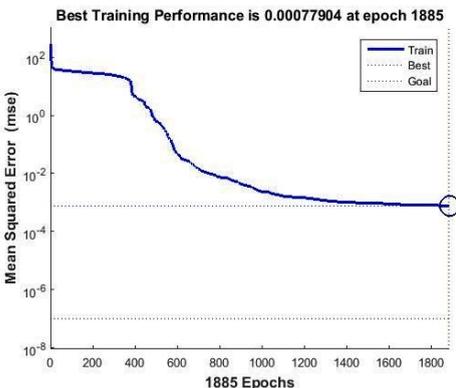


Figure 23 : Performance du réseau pour l'apprentissage de M et V dans la troisième approche

Une performance de 0,00078 est atteinte pour l'apprentissage du moment et 0,0049 pour celui de l'effort tranchant. Les résultats de l'apprentissage nous semble être satisfaisant, il suffit ainsi de tester le réseau.

Test du réseau

Pour tester le réseau, il suffit d'entrer les valeurs des variables d'entrées (q_1, q_2, L_1, L_2) appartenant dans les 75 échantillons restants qui n'ont pas pu participer dans l'apprentissage. On a choisi aléatoirement $(q_1 ; q_2 ; L_1 ; L_2) = (3,1373 ; 7,1242 ; 5,4011 ; 4,9012)$ et la sixième courbe nommée M_{RNA} ou V_{RNA} est celle sortie par le réseau.

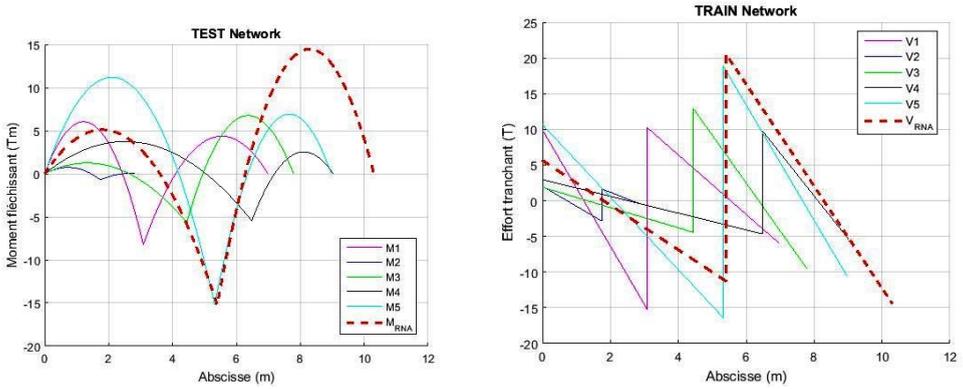


Figure 24 : Courbes du moment fléchissant et effort tranchant générées par le RNA

Le RNA a su générer le diagramme de moment fléchissant et effort tranchant à partir des données des autres courbes appartenant dans à la base d'apprentissage. L'allure des deux courbes générées est tout à fait raisonnable. La Figure 25 met en évidence la courbe prédite par le réseau nommée M_{RNA} ou V_{RNA} et celle de la sortie réelle nommée $M_{réel}$ ou $V_{réel}$.

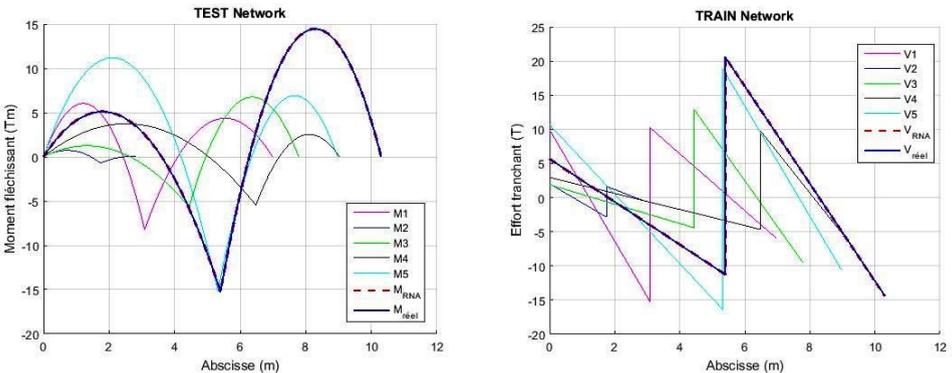


Figure 25 : Courbes des sollicitations réelles et courbes générées par le RNA

Les deux- courbes sont confondues. L'écart visuel entre les deux (02) courbes est quasiment nul. La prédiction des courbes du moment et effort tranchant par le réseau est ainsi parfaite. Pour éviter la confusion des courbes, dans la Figure 26, on a enlevé les cinq courbes appartenant à la base d'apprentissage et il n'en reste plus que les deux courbes à comparer.

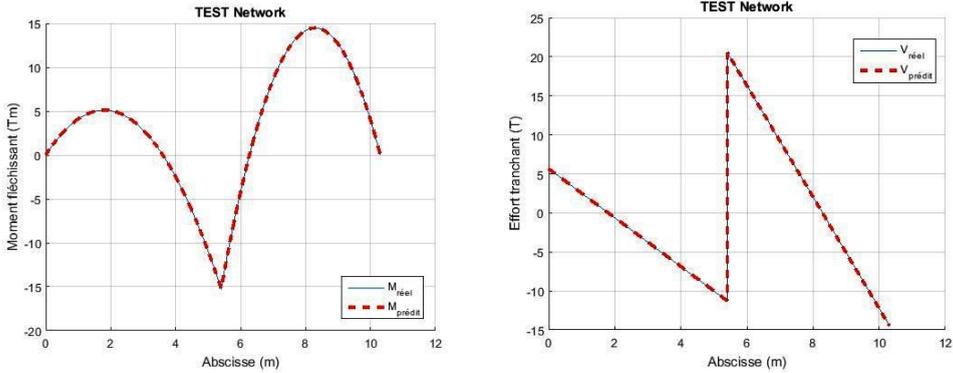


Figure 26 : Comparaison des courbes de sollicitations réelles et prédites par le RNA

Les tableaux 6 et 7 nous montrent les valeurs prédites par le réseau et celles des valeurs réelles sur les points particuliers de la poutre étudiée.

- Pour le moment fléchissant

Tableau 6 : Comparaison des valeurs des moments prédites par RNA et valeurs réelles

	Moments sur appuis (Tm)		Moments en travée (Tm)	
	M_{app}		M_{t1}	M_{t2}
Modèle RNA	-15,2452		5,1106	14,4638
Modèle réel	-15,2232		5,0946	14,4567
Ecart absolu	0,022		0,016	0,0071

- Pour l'effort tranchant

Tableau 7 : Comparaison des valeurs des efforts prédites par RNA et valeurs réelles

	Efforts travée 1 (T)		Efforts travée 2 (T)	
	V_{g1}	V_{d1}	V_{g2}	V_{d2}
Modèle RNA	5,6506	-11,2520	20,5387	-14,4182
Modèle réel	5,6539	-11,2910	20,5646	-14,3526
Ecart absolu	0,0033	0,039	0,0259	0,1706

La Figure 27 nous permet d’apprécier qualitativement les erreurs de prédiction du réseau tout au long de la poutre étudiée :

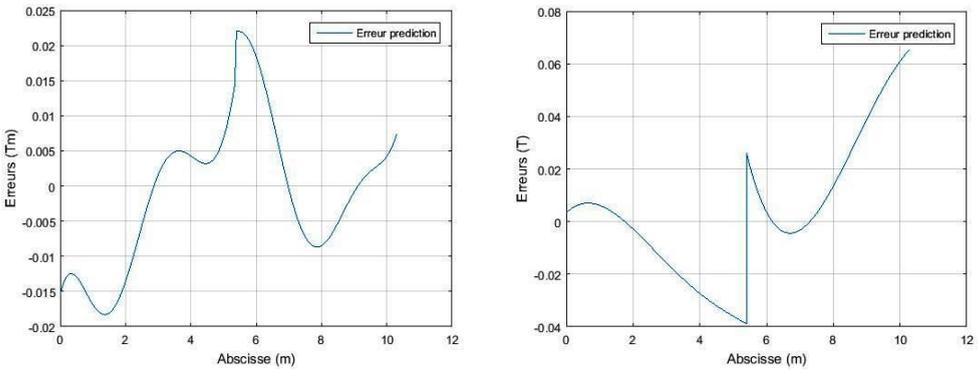


Figure 27 : Courbes des erreurs de prédiction du réseau respectivement pour M et V

Afin de quantifier la précision du réseau, les indicateurs d’écart d’erreurs calculés sont présentés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Indicateurs d’écart des erreurs de prédiction pour échantillons de test

Indicateurs	Moment fléchissant	Effort tranchant
MSE	$1,0970 \cdot 10^{-4}$	$6,9727 \cdot 10^{-4}$
RMSE	0,0105	0,0264
MAE	0,0085	0,0196

Ces indicateurs nous confirment que les résultats de prédiction sont satisfaisants et que le réseau est fiable pour être exploiter avec des erreurs tolérables.

CONCLUSION

Dans cette étude, l’apprentissage du modèle neuronal PMC ou MLP développé a été effectué en déterminant les poids et les biais, à l’aide de l’algorithme de Rétropropagation du gradient d’erreur.

Pour chaque niveau d’approche neuronale, la comparaison des sorties prédites par les RNA avec les sorties réelles issues de la méthode des trois moments conclut que les résultats trouvés sont fiables. On peut conclure que notre modèle MLP est performant, et peut être utilisé ou exploité par les ingénieurs de structure pour tracer les diagrammes de sollicitations d’une poutre continue avec un taux de fiabilité élevé.

L’utilisation des réseaux de neurones radiaux ou RBF (Radial Basis Function), ou aussi l’hybridation des réseaux RBF-MLP est une perspective qui nous permettra d’élargir et évaluer la performance des réseaux de neurones dans les problèmes complexes de calcul de structure.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) A. Delaplace, F. Gatuingt et F. Ragueneau (2008). Mécanique des structures. Dunod, Paris, 2008 ISBN 978-2-10-053958-1
- 2) B. Boudebouz, I. Manssouri, A. Mouchtachi, T. Manssouri et Bachir El kihel (2015). Utilisation des réseaux de neurones artificiels de type RBF pour la modélisation du régime normal à point de fonctionnement variable d'une installation industrielle. *European Scientific Journal*. June 2015 edition vol.11, No.18 ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431
- 3) B. Mohammed, Z. Abdeldjalilet D. Abdelkader (2015). “ Prédiction de l'indice CBR par une approche neuronale ». *in ResearchGate*.
- 4) H. EL BADAOUI , A. ABDALLAOUI et S. CHABAA (2014). Perceptron Multicouches et réseau à Fonction de Base Radiale pour la prédiction du taux d'humidité. *International Journal of Innovation and Scientific Research* ISSN 2351-8014 Vol. 5 No. 1 Jul. 2014, pp. 55-67
- 5) M. Outanoute, Y. El Afou, M. Guerbaoui, A. Selmani, A. Lachhab, A. Ed-Dahhak et B. Bouchikhi (2014). Utilisation des réseaux de neurones artificiels pour la prédiction de la température sous serre. *Congrès Méditerranéen des Télécommunications. Mohammedia, Morocco*.
- 6) Mohamed Nohair, André St-Hilaire et Taha. B. Ouarda (2008). Utilisation des réseaux de neurones et de la régularisation bayésienne en modélisation de la température de l'eau en rivière. *Érudit/Revue/Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science/Volume 21, numéro 3, 2008, p. 259-382*.
- 7) Moriasi et al. (2007), Model Evaluation Guidelines for Systematic Quantification of Accuracy in Watershed Simulations.
- 8) N. BOURAHLA et R. TALEB (2003). Prédiction des mécanismes de ruine dans les portiques sous l'action sismique par les réseaux de neurones. *In Colloque International Risque*. Alger, Algérie.
- 9) Pierre Gy, (1998), Sampling for Analytical Purposes, The Paris School of Physics and Chemistry.
- 10) Rumelhart D.E. McClelland, J.L. (1986), Parallel Distributed Processing, Explorations in the Microstructure of cognition. I & II, Cambridge: MIT Press.
- 11) Y. B. KOFFI, K. E. AHOUSSE, A. M. KOUASSI, O. KOUASSI, L. C. KPANGUI et J. BIEMI (2014). Application des réseaux de neurones formels pour la prévision des débits mensuels du Bandama blanc à la station de Tortiya. *in Afrique SCIENCE*. Côte d'Ivoire.
- 12) Y. Hammouche , "Comparaison de plusieurs méthodes pour la prédiction de la Charge Electrique Nationale", Mémoire de magister, Université Badji Mokhtar, Annaba, 2009.

ELABORATION DE LIANTS GEOPOLYMERES A BASE DE VERRE ET DE METAKAOLIN

par

RAVELOMANANTSOA Serge⁽¹⁾, RAZANAJATOVO Harinivo O.⁽¹⁾,
RAZAFINDRAMANGA Athou Wega⁽¹⁾, HERINIAINA Tinasoa E⁽¹⁾,
MANANIRINA H. Alfa Dona⁽¹⁾, ROBIJAONA R. Baholy⁽¹⁾

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

RESUME

Actuellement, la fabrication du ciment dégage une quantité importante de dioxyde de carbone (CO_2) bien connu pour son incidence sur l'effet de serre. Le gaz carbonique provient de la transformation du calcaire (CaCO_3) sous l'effet de la température en chaux (CaO). Compte tenu de la menace liée aux émissions de CO_2 lors des étapes de fabrication du ciment, plusieurs recherches se tournent vers le développement de nouveaux matériaux plus économiques et plus écologiques. Il est donc nécessaire de promouvoir de nouveaux matériaux locaux pour la construction des infrastructures de base en Afrique. Le principal objectif de cette recherche est d'évaluer la possibilité de fabriquer un liant géopolymère à base de verre et de métakaolin pour stabiliser les briques de terre comprimées (BTC). Ces liants sont obtenus par l'activation alcaline de matériaux aluminosilicates ayant des propriétés pouzzolaniques, métakaolin. Les résultats obtenus ont permis de conclure que la synthèse d'un liant géopolymère est idéale en utilisant l'hydroxyde de sodium.

Mots-clés : Clinkerisation, Géopolymère, Métakaolin, Verre

ABSTRACT

Currently, the manufacture of cement releases a significant amount of carbon dioxide (CO_2) well known for its impact on the greenhouse effect. Carbon dioxide comes from the transformation of limestone (CaCO_3) under the effect of temperature into lime (CaO).

Taking into account the threat linked to CO_2 emissions during the cement manufacturing stages, several research projects are focused on the development of new materials that are more economical and more ecological. It is therefore necessary to promote new local materials for the construction of basic infrastructure in Africa. The main objective of this research is to evaluate the possibility of manufacturing a

geopolymer binder based on glass and metakaolin to stabilize compressed earth bricks (BTC). These binders are obtained by the alkaline activation of aluminosilicate materials with properties pozzolanic, metakaolin.

The results obtained allowed to conclude that the synthesis of a geopolymer binder is ideal using sodium hydroxide.

Key words : Clinkerization, Geopolymer, Metakaolin, Glass

INTRODUCTION

Le ciment est l'un des matériaux de construction les plus utilisés dans le monde puisque chaque année l'industrie du ciment produit environ plus 1,6 milliard tonnes de ciment Portland. Plus de 5 à 8% des émissions mondiales de CO₂ sont induites de cette production. Cependant l'impact environnemental ne se limite pas à l'émission de CO₂ pour ces matériaux de construction mais la production de ciment ordinaire provoque également la libération de SO₃ et les NO_x qui accentuent l'effet de serre et causent les pluies acides. En plus les ciments Portlands exigent pour leurs fabrications une consommation considérable d'énergie surtout pour l'élaboration de clinker. Pour pallier à ces problèmes et réduire l'impact environnemental des industries du ciment, les recherches ont été orientées vers l'élaboration des nouveaux matériaux locaux pour la construction des infrastructures de base à Madagascar.

L'objet de cette étude consiste à élaborer et à caractériser à température ambiante des formulations pour ciment géopolymères à base de métakaolin et de poudre de verre. (RAPHAËLLE, 2015).

MATERIELS ET METHODES

Analyse chimique

L'analyse chimique d'un matériau est essentielle afin de connaître les différents constituants chimiques à déterminer dont: les éléments majeurs (SiO₂, Al₂O₃, Fe₂O₃, CaO), la teneur en SO₃.



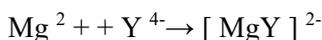
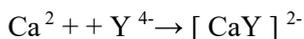
Figure 1 : Matériels utilisés de la complexométrie

Analyse par la complexométrie

Les méthodes utilisées sont la complexométrie et l'analyse gravimétrique.

La complexométrie (Figure 1) est une méthode basée sur la formation d'un complexe se constituant entre l'ion métallique (le Calcium) à doser et un composé organique complexant. Le complexant le plus utilisé est l'EDTA (sel disodique de l'acide éthylène-diamino-tétracétique). Il s'agit d'un ensemble de méthodes de dosage volumétrique d'ions métalliques.

Les réactions de complexation s'écrivent de la manière suivante :



L'analyse gravimétrique décrit un ensemble de méthodes d'analyse chimique quantitative effectuée en déterminant par pesée, la masse d'un produit, l'analyte, formé ou éliminé.

Les dosages gravimétriques utilisent deux types de méthode :

- Méthodes par précipitation ;
- Méthodes par volatilisation.

Dans les méthodes par volatilisation, l'analyte ou ses produits de décomposition sont volatilisés à une température appropriée. Soit le produit volatil est recueilli et analysé, soit la perte de masse de l'échantillon est déterminée.

Dans le cas des dosages par précipitation, les étapes suivantes sont requises :

- peser l'échantillon ;
- dissoudre dans un solvant approprié ;
- précipiter la solution à doser ;
- laver le précipité après filtration, ensuite le sécher et le peser ;
- calculer la quantité de l'élément dosé dans le précipité.

Analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X

L'analyse élémentaire par spectrométrie de fluorescence X est faite pour analyser les éléments chimiques présents dans le métakaolin et de poudre de verre. C'est une technique d'analyse élémentaire qui permet de qualifier et de quantifier les éléments chimiques présents dans l'échantillon, ces échantillons étant mis sous forme de pastilles ou de perles. Elle repose sur l'émission d'un rayonnement caractéristique par les atomes après ionisation. (STEVEN ,2010) ; (JULIEN, 2014).



Figure 2 : Spectrométrie de fluorescence X

Mesure de la résistance à la compression et à la flexion

L'essai de compression consiste à soumettre une éprouvette de forme cylindrique, placée entre les plateaux d'une presse, à deux forces axiales opposées. Si le matériau étudié est ductile, la rupture ne peut être atteinte avec ce test.

L'essai de compression est surtout utilisé pour déterminer la contrainte de rupture des matériaux. L'essai de flexion permet également de mesurer la résistance à la rupture d'un matériau. Une barrette du matériau à tester est placée sur deux appuis et l'on applique au centre de la barrette une force croissante jusqu'à la rupture. Le but de cet essai consiste à déterminer la résistance à la compression et à la flexion des éprouvettes de mortier normal.

Les paramètres variables dans nos expériences sont :

- ✓ La concentration molaire de NaOH (3M,5M,8M,10M) ;
- ✓ La température d'activation (40°C, 60°C) ;
- ✓ Le temps d'activation thermique (1er jour, 2ème jour, 3ème jour) ;
- ✓ L'âge de l'échantillon : 7j, 28j ;
- ✓ La quantité d'eau pour la confection des éprouvettes E / C.

Notre méthode consiste à varier un paramètre, en fixant les autres paramètres.

Les étapes ci-dessous considèrent la norme NF EN 196-1 qui est préconisée pour la recherche de la résistance à la compression à 7 et 28 jours.

Confection des éprouvettes

Les matériels utilisés sont ceux du laboratoire LNTPB (Laboratoire National des Travaux Publics et des Bâtiments) à savoir : un malaxeur ; un appareil à choc ; un moule de dimension 4*4*16[cm] ; une machine à écraser ; un chronomètre, une balance, une règle plate et une spatule.

Le procédé de fabrication des liants et des tests de résistance sur des éprouvettes de mortier normal est présenté sur la Figure 3.

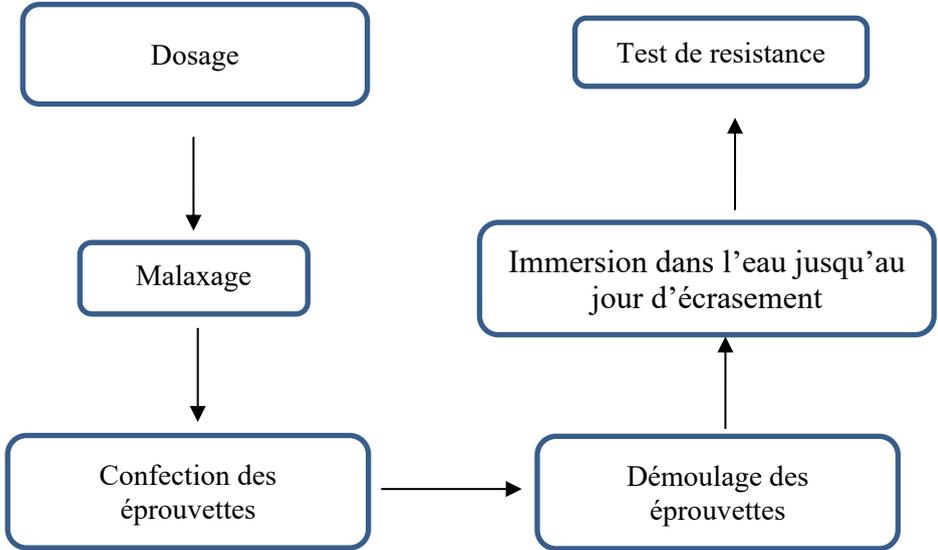


Figure 3 : Procédé de fabrication des liants et procédé de test de résistance

Préparation des échantillons

Malaxage

Le procédé du malaxage au LNTPB est le suivant : peser 225g d'eau et la verser dans le récipient du malaxeur ; peser 450g de liant et l'introduire dans le récipient du malaxeur ; mettre le malaxeur en marche à sa vitesse minimale pendant 30s ; introduire régulièrement tout le sable pendant les 30s suivantes ; mettre le malaxeur à sa vitesse maximale et continuer à malaxer pendant 30s supplémentaires ; arrêter le malaxeur pendant 90s, temps durant lequel le bol est baissé ; racler au moyen d'une spatule en caoutchouc tout le mortier adhérent aux parois et au fond du bol ; remonter le bol et reprendre le malaxage à grande vitesse pendant 60s. (ATILH, 1998).

On obtient un mortier que l'on porte dans le moule 4*4*16 sur l'appareil à choc.



Figure n°4 : Malaxeur

Moulage et compactage

Le moulage et le compactage des éprouvettes sont effectués au LNTPB selon le procédé suivant : introduire la 1ère couche de mortier dans chacune des 3 alvéoles (Figure 5), au moyen de la grande raclette en prenant appui sur le bord supérieur de la hausse, tirer une fois en avant et une fois en arrière pour retirer le surplus du mortier ; mettre la table à chocs (Figure 6) en marche pour 60 coups ; introduire la 2ème couche en faisant attention de à ne pas faire pivoter le moule et remettre la table à chocs en marche pour 60 coups ; démonter. Enlever ensuite l'excès de mortiers avec la règle sans faire pivoter le moule ; lisser la surface des éprouvettes en utilisant la même règle, puis nettoyer le bord du moule.

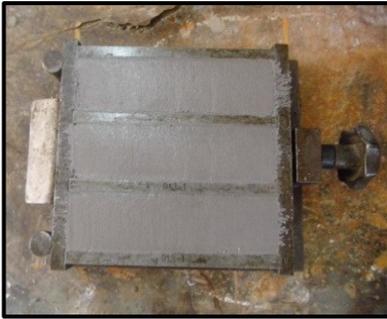


Figure 5 : Moule 4*4*16[cm]



Figure 6 : Table de chocs

Démoulage et conservation

Le procédé du démoulage et la conservation des éprouvettes se font de la manière suivante : Placer le moule dans une « chambre froide » sous une température de 20°C durant 24h ; démouler et immerger les éprouvettes verticalement dans l'eau à une température de 20°C ; conserver les éprouvettes dans la « chambre froide » selon la durée de l'essai à effectuer c'est-à-dire 02 jours et 28 jours.



Figure 7 : Conservation des éprouvettes

Ecrasement

L'étape d'écrasement se fait comme suit : Sortir les éprouvettes (après le temps voulu) et laisser sécher pendant un certain moment (quelques heures) ; effectuer l'essai de rupture sur l'appareil de mesure de flexion en sectionnant l'éprouvette en deux ; la charge de rupture en [N] est lue directement sur l'appareil. Multiplier cette valeur par 0.0025 et on obtient la résistance à la flexion en [MPa].

Ecraser chaque demi-éprouvette sur l'appareil de mesure de la résistance à la compression. Lire directement la résistance à la compression en [MPa], et prendre la moyenne sur les résultats de deux demi-éprouvettes.



Figure 8 : Mesure de la résistance à la compression



Figure 9: Mesure de la résistance à la flexion

Détermination de la consistance (Eau de gâchage)

L'eau est nécessaire à l'hydratation liante, c'est un facteur très important pour la qualité et les caractéristiques de mortier. Elle facilite sa mise en œuvre, par son effet lubrifiant. Il est donc nécessaire de déterminer sa quantité de manière optimale et de la jauger avec précision afin que les résistances et la durabilité soient augmentées. L'eau qui convient le plus est l'eau potable, mais on peut aussi utiliser les eaux de pluie, par contre le gâchage à l'eau de mer est à éviter, surtout pour le béton armé. Il est recommandé que l'eau de gâchage ne contienne ni matières en suspension, ni sels dissous.

Mode opératoire

500g du liant et une quantité d'eau variable, sont mis dans le malaxeur de mise en marche automatique. Il est procédé ensuite à un malaxage de ce mélange à petite vitesse pendant 90 secondes, une pause de 15 secondes est nécessaire afin d'araser la pâte à la surface supérieure du moule. Enfin, un deuxième malaxage s'effectue à petite vitesse pendant 90 secondes, avant d'introduire la pâte dans le moule de l'appareil de Vicat.

Après réglage de l'appareil de Vicat, la sonde est abaissée jusqu'à ce qu'elle arrive au contact de la pâte, par la suite, la partie mobile de l'appareil est lâchée et la lecture peut alors se faire. La pâte normale est une pâte pure de consistance normale, c'est-à-dire, qui laisse à la sonde et le fond du moule une épaisseur de 6 ± 1 mm. Si nous disposons d'une épaisseur de 6 ± 1 mm, la teneur en eau correspond à la consistance normale de la pâte, soit une quantité de liant équivalant à 500 g.

Détermination du temps de prise

Pour déterminer le temps de prise du liant, l'appareil de Vicat a été utilisé (Figure 10). Pour ce, le moule doit être mis dans le bac à eau et être posé sur la prismètre.

- ✓ un lâché automatique est fait toutes les 10 minutes ;
- ✓ le temps au bout duquel la distance entre la plaque de base et l'aiguille est égale à 4 ± 1 mm est noté.

Le début de prise est caractérisé par le temps écoulé entre le gâchage (le contact eau-ciment) et l'instant où la distance entre l'aiguille et la plaque de base est de 4 ± 1 mm. La fin de prise est le temps écoulé entre le gâchage et l'instant où l'aiguille ne s'enfonce plus et ne laisse plus aucune empreinte sur l'éprouvette.

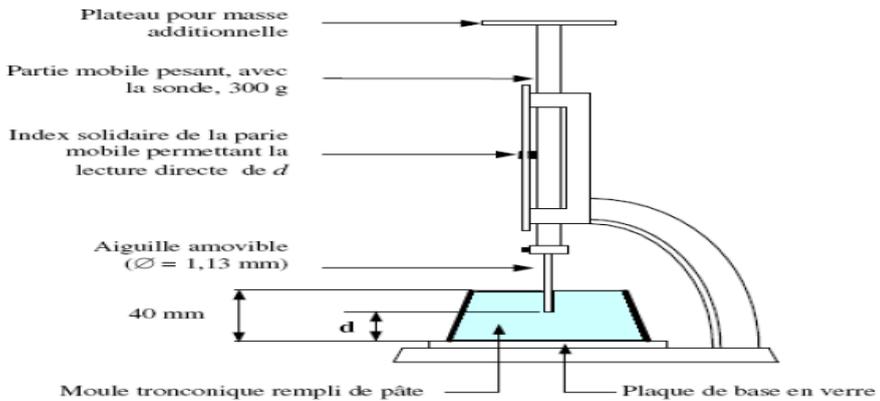


Figure 10 : Appareil de Vicat

Les matières premières

Le métakaolin

Le métakaolin est obtenu par la calcination de kaolin à des températures voisines de 750°C , il provient de la compagnie PROCHIMAD. Ses caractéristiques physico-chimiques sont données dans le Tableau 2.

Les solutions activatrices

La solution activatrice est un élément primordial dans le processus de géopolymérisation. En fonction de sa quantité et de sa concentration, elle fournira le mélange nécessaire pour initier la réaction et déterminer la structure finale du matériau durci. Par ailleurs, elle a pour fonction d'accélérer la dissolution de la source aluminosilicate favorisant la formation de gels stables à faible solubilité et la formation d'une structure compacte avec ces gels. Les propriétés physiques et chimiques des activateurs jouent un rôle important dans le comportement du matériau activé. (ZIBOUCHE, 2013).

Les solutions alcalines de NaOH de concentration 3,5,8 et 10M servant d'activateurs ont été préparées par la dissolution de pastilles de NaOH dans de l'eau distillée. Le NaOH utilisé pour les pâtes et les mortiers provient de la compagnie Chimidis de Madagascar. Il présente une composition chimique de 97% en NaOH.

La poudre de verre

La poudre de verre (PV) utilisée dans cette étude est obtenue à l'issue du broyage de verre de bouteille mixte (verre de différentes couleurs). Elle est fournie par l'industrie Star de Madagascar.



Figure n°12 : Bouteilles de verre de la société « Star »

La composition chimique est regroupée dans le tableau 1. C'est un silicate sodocalcique composé de 72,85% de silice, et 11,59 % d'oxyde de calcium, 5,34 % d'oxyde de sodium.

On peut noter une faible teneur en alumine d'environ 1,75%. L'analyse chimique est faite à l'aide de la fluorescence X (XRF).

Géopolymère

Les géopolymères représentent une classe de matériaux que l'on obtient par une activation alcaline des matériaux silico-alumineux (Samira, 2015). Les premières découvertes de l'activation alcaline des matériaux silico-alumineux ont été l'œuvre de Purdon (Gharzouni, 2016) à travers un mélange d'hydroxyde de sodium et des

minéraux aluminosilicates dont le laitier de haut-fourneau. Il a constaté une prise de la pâte et une résistance mécanique de 27 MPa après 24 heures. Ensuite, dans les années 50, Glukhovsky (Peigang, 2011) a également étudié le développement d'un nouveau liant qu'il nomma « sol-ciment » par activation alcaline d'une roche broyée. Il proposa par la suite un modèle à trois étapes traduisant le mécanisme réactionnel de l'activation alcaline des matériaux contenant principalement de la silice et de l'alumine (Liew, Hussin, Abdullah, 2012) :

- la déconstruction : il s'agit de la dissolution de l'aluminosilicate dans la solution alcaline, c'est-à-dire la rupture des liaisons Si-O-Si et Si-O-Al pour former des précurseurs réactifs ($\text{Si}(\text{OH})_4$) et ($\text{Al}(\text{OH})_4$) dans la solution ;
- la polymérisation : les monomères $\text{Si}(\text{OH})_4$ et $\text{Al}(\text{OH})_4$ réagissent entre eux pour donner des oligomères d'aluminosilicates $\text{AlSi}_2\text{O}_2(\text{OH})_8$ qui se condensent en un gel ;
- la stabilisation : le gel formé subit probablement une réorganisation pour donner un grand réseau.

Méthodes de préparation des échantillons

Différents mélanges ont été réalisés en mettant d'abord en contact la poudre de verre et la solution de NaOH sous agitation pendant environ 2 min. Cette première étape permet une dissolution partielle de la silice. Le Metakaolin est par la suite ajouté au mélange suivi de l'ajout de sable. Des mesures de résistance ont été effectuées au laboratoire LNTPB.

Des éprouvettes de mortiers de dimensions (4x 4 x 16 cm) ont été confectionnées selon la norme ASTM C 109/C 109M-02. La mise en place des mortiers a été faite en deux couches selon la norme précédemment citée. Les échantillons sont activés thermiquement dans une étuve à 40°C et 60°C (T_2 et T_3) pendant 3 jours avec une humidité relative de 50%, pour empêcher l'eau de la réaction de s'évaporer. Pendant cette cure les échantillons sont recouverts de chiffons mouillés pour maintenir l'eau. Les mortiers sont par la suite démoulés et sont maintenus à 40°C et 20°C (T_2 et T_1) avec humidité relative de 50% et 100% jusqu'à échéance des essais de résistance à la compression (7, 28 et 91 jours).

La fabrication de liant géopolymère (Davidovits, 1992), s'effectue en quatre étapes suivantes :

- Analyse chimique des matières premières ;
- Cuisson à température 750°C pour le kaolin pendant 2 heures ;
- Optimisation de la teneur de metakaolin et de poudre de verre en fonction de la résistance à la compression ;
- Essai physique (test de résistance à la compression et flexion).

RESULTATS

Les Tableaux 1 et 2 présentent les résultats des analyses chimiques de métakaolin et de poudre de verre.

Tableau 1 : Caractéristiques chimiques de la poudre de verre (en % massique)

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	PF
Pourcentage (%)	72,85	1,75	0,57	11,59	1,42	0,18	0,56	5,34	1,27

Source : Auteur

Tableau 2 : Caractéristiques chimiques du métakaolin (en % massique)

Eléments	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	PF
Pourcentage (%)	52,49	44,97	0,54	0,14	0,16	0,57

Source : Auteur

Optimisation de la température d'activation thermique de géopolymère

Tableau 3 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la température d'activation

Caractéristiques	PV95MK5N5 (40°)	PV95MK5N5 (60°)
Résistance à la compression		
7eme jour en MPa	10,23	25,34
28eme jour en MPa	13,00	31,96
91eme jour en MPa	12,47	28,12

Source : Auteur

PV = Poudre de Verre MK = Métakaolin N = NaOH

Optimisation du temps d'activation thermique de géopolymère

L'étude précédemment réalisée sur l'effet de la température a montré que l'activation à 60°C donnait les meilleurs résultats pour le système 95%PV-5%MK. Cette température de 60°C a donc été retenue pour la suite de l'étude d'optimisation. Cependant, il est important de définir une durée plus ou moins courte du séjour des échantillons dans l'étuve. Cette étape de l'étude consiste alors à définir le temps (ou la durée) nécessaire pour activer thermiquement les géopolymères.

Tableau 4 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction du temps d'activation

Temps d'activation	1er jour	2eme jour	3eme jour
Caractéristiques	PV95MK5N5 (60°)	PV95MK5N5 (60°)	PV95MK5N5 (60°)
Résistance à la compression			
7eme jour en MPa	15	24	26
28eme jour en MPa	18	27	30

Source : Auteur

PV = Poudre de Verre MK = Métakaolin N = NaOH

Optimisation de la teneur en eau de gâchage de géopolymère

Le rapport eau/liant (E/L) a une grande influence sur la porosité de la pâte des géopolymères hydratés, car il gouverne directement l'espacement initial entre les grains de liant en suspension dans l'eau de gâchage. L'effet des rapports E/L, variant de 0,42 à 0,45 sur la résistance en compression des mortiers, ont donc été étudiés. Les mélanges PV95MK5N5 ont été activés avec une température de 60°C pendant 3 jours suivis d'une cure à 40°C.

Tableau 5 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la teneur en eau

Rapport E / l	0,42	0,43	0,45
Caractéristiques	PV95MK5N5 (60°)	PV95MK5N5 (60°)	PV95MK5N5 (60°)
Résistance à la compression			
7eme jour en MPa	27	23	18
28eme jour en MPa	31	26	21

Source : Auteur

PV = Poudre de Verre MK = Métakaolin N = NaOH

Optimisation de la concentration de NaOH de géopolymère

Préparation des échantillons

Des mortiers à base de poudre de verre incorporant 3, 5, 8 et 10 % de NaOH ont été élaborés. Les essais de compression ont été réalisés après 7 et 28 jours de cure. Les échantillons ont été activés avec des solutions de NaOH à différente concentration sous une température de 60°C pendant 2 jours et conservés à 20°C. Les caractéristiques des échantillons sont présentées dans les Tableaux 1 et 2.

Les résultats de la variation de résistance à la compression des échantillons en fonction de la concentration en NaOH sont montrés dans le Tableau 6.

Tableau 6 : Evolution de la résistance à la compression des mortiers en fonction de la concentration de NaOH

Concentration (NaOH)	3M	5M	8M	10M
Caractéristiques	PV95MK5N3 (60°)	PV95MK5N5 (60°)	PV95MK5N8 (60°)	PV95MK5N10 (60°)
Résistance à la compression				
7eme jour en MPa	10	28	35	14
28eme jour en MPa	12	26	32	37

Source : Auteur

PV = Poudre de Verre MK = Métakaolin N = NaOH

DISCUSSION

D’après le Tableau 1, la poudre de verre contient une forte quantité de silice de l’ordre 72,85 %. Par contre le pourcentage de l’alumine est relativement faible. Il est remarqué aussi que la perte au feu de ce dernier est quasiment faible.

Les résultats obtenus dans le Tableau 2, montre présente que le metakaolin est riche en silice à 52,49% et en alumine à 44,97%.

Il a été noté une très nette augmentation de la résistance à la compression lorsque la température augmente de 40 à 60°C, ceci correspondent à 40°C (13MPa) et à 60°C (31,96 MPa) au 28eme jour. L’amélioration de la résistance en compression lorsque la température augmente pourrait être expliquée par le fait que l’élévation de la température favorise la dissolution des espèces réactives siliceuses et alumineuses et leur polycondensation, entraînant le renforcement du réseau du gel géopolymérique.

La résistance à la compression augmente lorsque le temps de séjour à l’étuve est prolongé, autrement dit, la résistance à la compression donne 18 MPa au 1er jour d’activation tandis qu’elle est de 30 MPa au à 28eme jour, et ce, lorsque l’échantillon est d’abord conservé à 60° à l’étuve pendant 3 jours. Quand le temps d’activation est prolongé, le processus de géopolymérisation est favorisé ce qui entraîne des gains en résistance.

Les résultats indiqués dans le Tableau 5 montrent une diminution des performances mécaniques avec l’augmentation du rapport E/L, surtout lorsque ce rapport passe de 0,42 à 0,45. En effet, la résistance à la compression diminue de 31 MPa à 21 MPa.

Une augmentation de la résistance à la compression a été remarqué avec la concentration en NaOH allant jusqu’à 8M surtout au 7ème jour.

Il apparait clairement que la concentration en ions hydroxyles (OH-) n'est pas suffisante pour dissoudre le réseau silico alumineux. Des concentrations de 5M et 8M permettent un développement de résistance à jeune âge.

Par contre, pour une concentration de 10M, bien que la résistance à jeune âge soit faible (14MPa) par rapport à 5M (28MPa) et 8M (35MPa), elle augmente rapidement pour atteindre une valeur de 37 MPa.

La faible résistance à la compression à jeune âge lorsque la concentration de NaOH est de 10M pourrait être due à la faible mobilité des ions du fait de la forte concentration.

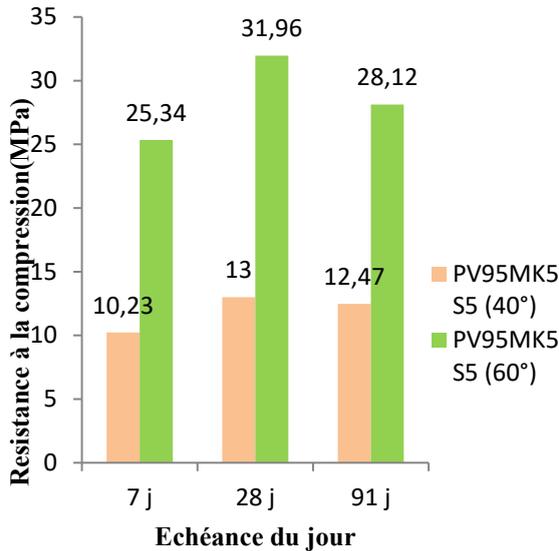


Figure 13 : Optimisation de la température d'activation thermique

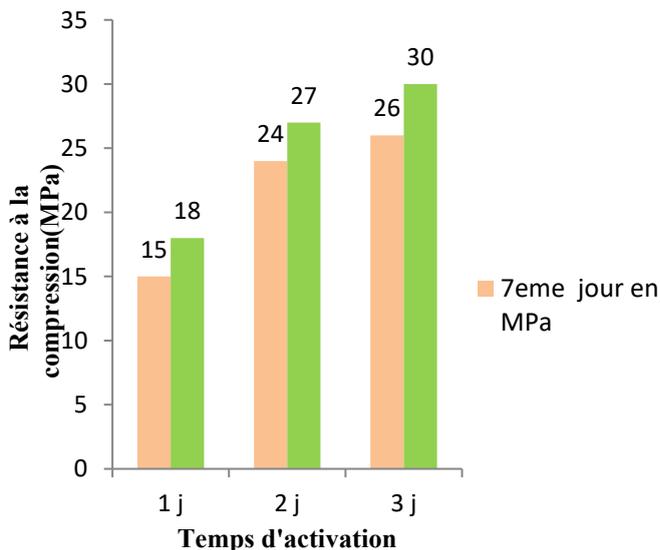


Figure 14 : Optimisation du temps d'activation thermique de géopolymère

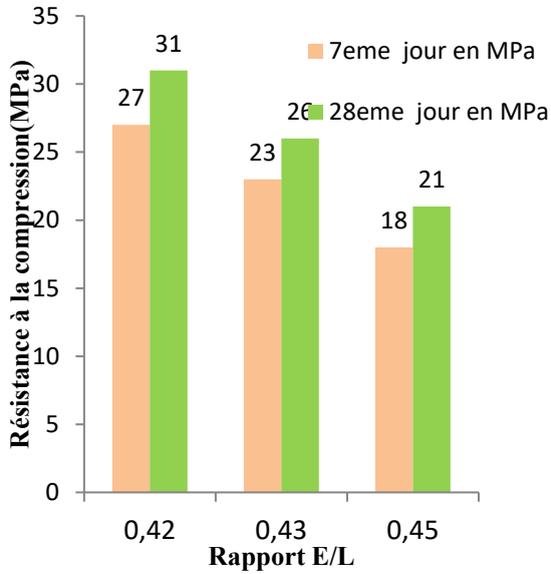


Figure 15 : Optimisation de la teneur en eau de gâchage de géopolymère

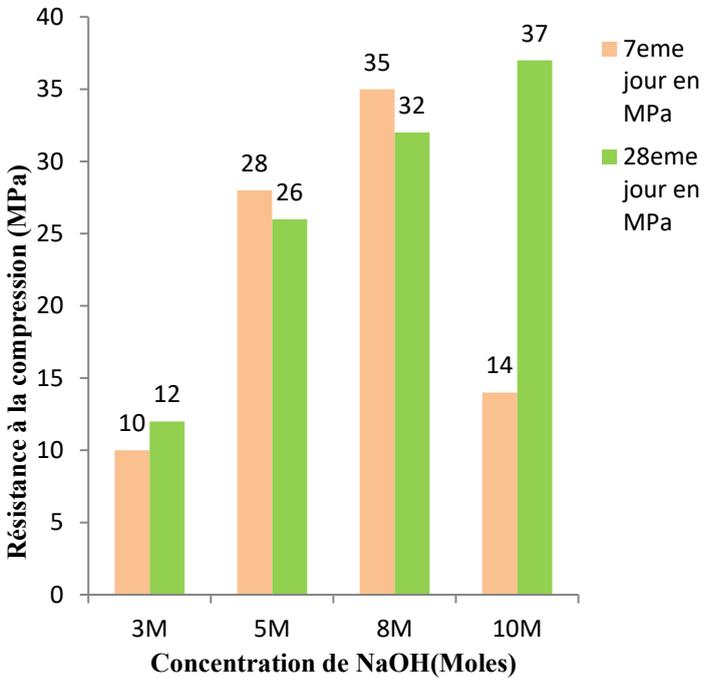


Figure 16 : Optimisation de la concentration de NaOH de géopolymère

CONCLUSION

Le présent travail a permis de montrer qu'il est possible de produire à partir des matériaux locaux kaolin et de poudre de verre un liant qui présente des résistances mécaniques suffisantes pour son emploi dans la construction. L'utilisation peut aller de l'enduit à la confection de béton. Ce travail s'est penché sur l'optimisation de la formulation de géopolymère à base de poudre de verre comme matériau source et comme précurseur d'activateur.

Cependant, la poudre de verre étant un silicate alcalin, son activation donne lieu à la formation d'un matériau instable dans l'eau à cause des alcalis. Ce qui peut causer un problème dans son application dans le domaine de la construction. Ainsi, il a été nécessaire d'apporter de l'aluminium dans le système afin de fixer ces alcalis et former un matériau plus stable.

Le métakaolin qui est un aluminosilicate a donc été utilisé pour remplacer une partie de la poudre de verre. Dans l'étude d'optimisation, plusieurs variables influencent le système, mais les plus importantes prises en compte dans cette étude sont la température et le temps d'activation thermique et la concentration de NaOH.

Les résultats du temps d'activation thermique suggèrent un temps prolongé d'au moins 2 jours à 60°C (48 heures) pour initier et accélérer la géopolymérisation avant la cure. Cependant, une exposition trop longue peut causer un effet négatif sur les propriétés mécaniques due à l'apparition de fissures dans la structure polymérique.

Une nette augmentation de la résistance à la compression a été également observée lorsque la température augmente de 40 à 60°C, confirmant que la température favorise la dissolution des espèces réactives siliceuses et alumineuses et leur polycondensation entraînant le renforcement du réseau du gel géopolymérique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) ATILH (1998) Guide pratique pour l'emploi des ciments, Eyrolles.
- 2) A Gharzouni (2016). Contrôle de l'attaque des sources aluminosilicates par la compréhension des solutions alcalines. Ecole Nationale d'Ingénieurs de Sfax (Tunisie). Laboratoire de Génie des Matériaux.
- 3) Davidovits J. (1992). Method for the obtention of geopolymer cement, with no CO₂ emission, and product there by obtained. French patent.
- 4) JULIEN PY. (2014). Modélisation et développement d'un système d'analyse en ligne des transuraniens par spectrométrie fluorescence X raies. Université de Franche-Comté.

- 5) Peigang He. (2011). Thermal evolution and crystallization kinetics of potassium-based geopolymer *Ceramics International* Volume 37, Issue 1, January 2011, Pages 59-63.
- 6) Raphaëlle P. (2015). Formulation and durability of metakaolin-based geopolymers. Université de Toulouse : N.I.A.G
- 7) Samira.S. (2015). Formulation de liants aluminosilicates à partir de différentes argiles tunisiennes. Université de Limoges; Université de Sfax (Tunisie)
- 8) Steven Shackley M. (2010). X-Ray Fluorescence Spectrometry (XRF) in Geoarchaeology.
- 9) YM Liew, K Hussin, MM Al Bakri Abdullah. (2012). Effect of Curing Regimes on Metakaolin Geopolymer Pastes Produced from Geopolymer Powder. *Advanced Materials Research* Vol. 626.
- 10) Zibouche.F (2013) Géopolymérisation d'aluminosilicates. Influence des rapports Silice/Alumine *Journal of Materials, Processes and Environment* December edition. Vol.1. No 2.

SYNERGIE SOCIO-ÉCOLOGIQUE : GAGE DES INFRASTRUCTURES RÉSILIENTES AUX STRESS ENVIRONNEMENTAUX

par

MANANTSOA C.⁽¹⁾, RAVONINJATOVO O A.⁽²⁾, RASOANANDRASANA E.⁽¹⁾,
RAZANATSOAVINA C.⁽³⁾, RALAHADY B. B.⁽³⁾

(1) Ecole Doctorate Génie de Vivant et Modélisation, Université de Mahajanga, Madagascar

(2) Centre National de Recherches Industrielle et Technologiques. (CNRIT), MESupRES

(3) Ecole Normale Supérieure pour l'Enseignement Technique, Université d'Antsiranana, Madagascar

RESUME

En 2014, les statistiques officielles ont montré qu'à Madagascar, seulement 10% des routes goudronnées étaient en bon état, 28% avaient un état moyen et 62%, en mauvais état. Cet article présente les contraintes de l'infrastructure et son interdépendance avec la biodiversité, ainsi que l'analyse des goulots d'étranglement et leurs causes exactes. L'étude met en évidence l'analyse de performance environnementale en combinaison avec l'analyse de la performance liée au comportement et au processus administratif à travers sept grands projets routiers du Ministère des Travaux Publics. La méthodologie adoptée consiste à entreprendre i) une étude sur le terrain sur la route nationale numéro quatre et six (RN4 et RN6), ii) une analyse des données en utilisant la méthode d'analyse statistique explicative par le biais de la Méthodologie d'Approche de Recherche Participative et la méthode d'évaluation rapide couplée avec l'approche communautaire, institutionnelle, intersectorielle, ainsi que l'analyse Succès-Forces-Potentialités-Opportunités. Les résultats issus de ce travail de recherche ont montré par le biais du résultat de la variance d'importance, du résultat d'analyse statistique et du tableau d'interrelation que la performance de dudit ministère est limitée au niveau du suivi de processus et sa performance environnementale est faible car le pourcentage est inférieur à 50%. Le réseau routier qui est l'artère de développement socio-économique aux conditions climatiques est vulnérable.

Bref, ce travail de recherche permettra d'envisager une nouvelle politique de gestion des dépendances vertes routières correspondant aux Objectifs du développements durables 9, 13 et 15 qui précisent la nécessité d'infrastructures résilientes et l'urgence de la lutte contre les changements climatiques et leurs répercussions.

Mots-clés : Comportement, Communauté, Durable, Economie, Ecologie, Infrastructure, Résiliente.

ABSTRACT

In 2014, official statistics showed that in Madagascar, only 10% of paved roads were in good condition, 28% average and 62% in poor condition. This article presents the constraints of the infrastructure and its interdependence with biodiversity and analyzes the bottlenecks and their exact causes. The study highlights the analysis of environmental performance in combination with the analysis of performance related to behavior and administrative process across seven major road projects of the Ministry of Public Works. The adopted methodology consists i) in undertaking a field study on RN4 and RN6, ii) data analysis using the explanatory statistical analysis method through the Participatory Research Approach Methodology and the rapid assessment method coupled with the community, institutional, intersectoral approach, as well as the Success – Strengths-Potentialities-Opportunities analysis. The results of this research work showed through the result of the variance of importance, the result of statistical analysis and the interrelation table that the performance of said ministry is doubtful at the level of process monitoring and its environmental performance is low because the percentage less than 50%. This proves the vulnerability of the road network which is the artery of socio-economic development following climatic deterioration.

In short, this research work will make it possible to consider a new policy for the management of green road dependencies relating to the Sustainable Development Goals 9, 13 and 15 which specify the need for resilient infrastructures and the urgency of the fight against climate change and their repercussions.

Key words : Behavior, Community, Sustainable, Economy, Ecology, Infrastructure, Resilient

INTRODUCTION

Les chocs des changements climatiques ne sont plus une rumeur ni un slogan politique des pays industrialisés. Ils touchent réellement la vie au niveau mondial, en Afrique et notamment ils en résultent des dégâts physiques et matériels sur nos infrastructures. Croire que ce phénomène est inventé, par conséquent, la majorité des dirigeants en Afrique ou des populations dans des pays en développement minimisent et restent fatalistes quant aux origines de ces désastres écologiques ou naturelles.

En 2016, le PNUD rapporte que les incidences des changements climatiques devraient aggraver la situation actuelle, tout en créant de nouvelles causes de pauvreté. Pourtant « pas de pauvreté », signifiant éliminer toutes formes de la pauvreté dans le

monde est le premier objectif des ODD¹. L’Afrique n’arrive toujours pas à l’éradiquer de manière palpable. Les populations ainsi que leurs dirigeants sont responsables de la dévastation des biodiversités.

Ces processus de destruction écologique ne cessent pas de progresser, et ce genre de comportements impactent sur la performance des infrastructures. Soulignons que dans chaque projet de construction d’une grande envergure nationale ou locale et internationale, l’étude d’impact est recommandée. Ces démarches visent la participation du public. Comme toutes les initiatives décidées en Afrique, prenons, le cas du Sommet Africain, en 2015 : une préoccupation mondiale majeure sur le changement climatique visionne au préalable le développement des infrastructures résilientes. Ce Sommet Africain avait posé plusieurs hypothèses admises qu’au cours des 50 prochaines années, notre planète connaîtra des températures plus élevées, une variabilité des précipitations, une élévation du niveau de la mer, une sorte de sécheresse et des inondations, voire des vagues de chaleur. Sur ces multiples paradigmes, l’Afrique, dès maintenant, doit planifier, prendre les mesures adaptées aux changements climatiques pour affronter et relever les défis, notamment concernant les infrastructures, entre autres dans le domaine de l’infrastructure des transports et l’humain. Cependant, ces défis de planification nécessitent des investissements issus d’une volonté politique relevant de la bonne gouvernance et de la stabilité. Le PNUD² (2016) a mentionné que la population mondiale ne cesse d’augmenter, l’urbanisation s’accélère, la classe moyenne dans les pays en développement émergent et réclament plus de services. En effet, il faudra prendre des mesures qui n’excluent pas l’adaptation et la durabilité à long terme intégrées dès le départ. Face à ces problèmes socio-environnementaux, le Programme Stratégique pour la Résilience Climatique de Madagascar, 2019 a soulevé que des mesures ont été déjà avancées, des Fonds d’Investissements pour le Climat (FIC) sont déjà obtenus notamment le PPRC³ qui consiste à renforcer les capacités des institutions nationales à travers le capital humain, un soutien technologique, institutionnel et financier pour agir aux demandes urgentes, l’assurance de la durabilité, la cohérence à long terme pour toutes les mesures de précaution au service du développement durable face aux changements climatiques.

En 2016, le PNUD a souligné également l’importance des ingénieurs et les sociétés d’ingénierie jouent également un rôle important dans la création d’une infrastructure bien adaptée et insiste sur le fait que simultanément, des phénomènes météorologiques deviennent de plus en plus puissants et menacent directement les infrastructures et les services vitaux. Bien que des solutions sont proposées et

¹ Objectif de Développement Durable

² Programme des Nations Unies pour le développement

³ Programme Pilote pour la Résilience Climatique

recommandées aux représentants des Etats membres de l'Union africaine, pour se préparer à ces défis, la situation reste critique et manifeste dans une prise de conscience redoutable.

L'Afrique a du mal à se mettre en synergie pour agir ensemble malgré des sessions plénières, des réunions bilatérales entre le secteur public et privé, des rencontres individuelles, des possibilités de réseautage, des partenaires techniques et financiers. L'Union Africaine (Addis Ababa-Ethiopie, 2015) préconisait que des changements des infrastructures existantes devront être prioritaires pour mieux utiliser dans un avenir climatique plus complexe et aussi la nécessité de trouver une nouvelle conception qui fonctionnera sous différentes configurations des températures et de précipitations. Le PNUD (2016) avait aussi rajouté que le manque de ressources et de financement pour réparer les infrastructures existantes ou les remplacer celles qui ont été endommagées posent des problèmes. Que faire alors ? Des contraintes sur des connaissances précises sur les effets futurs des changements climatiques rendent également la planification à long terme de plus en plus difficile. De plus, Ministère des affaires municipales, Direction générale de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, mars 1994 n'écartait pas dans son analyse que, faute de planification, des interventions sur le territoire peuvent créer des conflits et générer le blocage de certaines actions essentielles au bon fonctionnement de la collectivité. En parallèle, il faut admettre que le bien-être général d'un humain représente une idée relative, flexible et susceptible et varie en fonction du temps, de l'espace et de l'individu ou le groupe qui l'invoque, et sans écarter ses relations selon diverses circonstances. Par conséquent, le confort d'un être humain relie, avec la satisfaction des besoins de base, l'absence de tensions psychologiques et l'intégration harmonieuse au sein de la société.

Une volonté politique à prendre sérieusement des infrastructures qui se situent, conçoivent, construisent et exploitent tout en prenant en considération le climat actuel et futur, est primordial. Cependant, l'Union Africaine (Addis Ababa-Ethiopie, 2015) insistait déjà sur le fait que l'infrastructure existante peut être résiliente aux chocs des aléas climatiques. Les règles d'entretien doivent intégrer la résilience aux impacts du changement climatique, c'est une condition sine qua non. La tradition politique africaine est marquée par « une mauvaise gouvernance », les mesures d'adaptation éventuelles doivent assurer que l'infrastructure soit résiliente, à la hauteur plus des phénomènes météorologiques extrêmes comme les tempêtes, les inondations et les vagues de chaleur, voire le froid ... ; il faudra également souligner l'importance de l'assurance des décisions d'investissements qui considèrent l'évolution des demandes des consommateurs en raison du changement climatique. Sur les plans de la réalisation, il faut une construction flexible, avec une surveillance de la compétence technique et la capacité de mettre en exécution des mesures d'adaptation. Sinon, l'échec répétitif restera permanent, pourtant l'existence d'un réseau d'infrastructure

plus résilient et robuste capable d'affronter aux impacts des changements climatiques est la clé de la croissance économique.

La négligence et l'ignorance, voire la croyance ancestrale, engendrent la défaillance ou l'inefficacité des infrastructures, lors de ces catastrophes climatiques. Ces situations produiront des problèmes de renforcement de l'attractivité socio-économique dynamique. L'Etat doit se plus pencher sur l'interdépendance entre les infrastructures, entre autres, une bonne route qui approvisionne en énergie, en carburant et plus de l'électricité, stockage et distribution du gaz, l'approvisionnement des biens et services, l'énergie va traiter de l'eau, ravitailler des fournitures de produits chimiques et biologiques, etc.

Dans un pays comme Madagascar où la majorité de la population vit en milieu rural et se base sur l'agriculture et l'élevage, permettant sa subsistance. Johan R. *et al.* (1992) ont souligné que l'efficacité et la durabilité des programmes déjà mis en œuvre au profit des routes rurales ont été remises en question faute d'une cohérence du cadre politique et d'une démarche institutionnelle concernant leur planification, financement et maintenance.

Pour ces multiples raisons, notamment face à ces nouveaux chocs climatiques, notre problématique de recherche se penche sur la stratégie mise en œuvre par le ministère pour la performance des infrastructures résilientes. Ce questionnement permettra une étude qui préconisera, renforcera les mesures sécuritaire et dépendante aux respects de la biodiversité, liées aux conceptions et constructions des infrastructures du pays. Trois grandes questions permettront de connaître ces contraintes :

- A quel niveau de prise de responsabilité par rapport à l'atteinte de ODD peut-on juger le Ministère en charge des Travaux Publics (MTP) à travers leurs rôles sur la traçabilité des infrastructures mises en place ?

- La synergie entre l'Etat Malagasy, les bailleurs, le MTP, les collectivités décentralisées et la population n'est-elle pas la démarche idéale pour un développement durable de lutte contre la pauvreté et l'amélioration des conditions de vie socio-économiques ?

- Comment se manifestent les caractères irresponsables des collectivités décentralisées et le faible niveau d'éducation des populations touchées par les projets routiers relatives à la perte de la biodiversité et la durée de vie des IR (Infrastructures Routières) voire à sa vulnérabilité ?

MATERIELS ET METHODES

Cette étude consiste à appréhender la performance du Ministère des Travaux Publics (MTP) en matière d'environnement et à élaborer une charte pour le partage des responsabilités de toutes parties prenantes et les organismes rattachés au Ministère œuvrant dans ce cadre.

La méthodologie adoptée va permettre à entreprendre i) une étude sur le terrain sur la Route Nationale N°4 et la Route Nationale N°6, ii) une analyse des données en utilisant la méthode d'analyse statistique explicative par le biais de la Méthodologie d'Approche de Recherche Participative et la méthode d'évaluation rapide couplée avec l'approche communautaire, institutionnelle, intersectorielle, ainsi que l'analyse Succès–Forces-Potentialités-Opportunités.

La méthodologie qualitative a été également adoptée, une méthode qui est basée sur une démarche participative et itérative (au niveau de l'équipe et des cibles d'appui) et un diagnostic quantitatif renforcé et recoupé avec un diagnostic qualitatif.

Pendant les interventions, on a appliqué la Méthodologie d'Approche de Recherche Participative et la méthode d'évaluation rapide en utilisant les approches méthodologiques suivantes : Approche communautaire, Approche institutionnelle, Approche intersectorielle, Approche de responsabilisation.

Dans le cadre de cette étude, les textes et lois suivants sont consultés :

- Charte de l'Environnement Malgache ;
- La Charte routière de Madagascar ;
- Décret MECIE (Mise en Compatibilité des Investissements avec l'Environnement).

Des normes, principes et politiques de sauvegarde en matière d'environnement international sont également à considérer, vu que le MTP collabore avec des différents bailleurs de fonds principalement : Banque Mondiale, Union Européenne, Banque Arabe pour le Développement Economique en Afrique pour la réalisation de ses objectifs.

Choix des axes d'intervention

Les choix des axes d'intervention s'expliquent comme suit :

- Les projets sont de différentes envergures et bénéficient de différentes sources de financement (Banque Africaine de Développement, Union Européenne, Banque Mondiale).
- Les axes ont leur spécificité respective avec la possibilité de rencontrer différents défis dans les réalisations et de capitaliser les bonnes pratiques.

Consultations des documents

Le Tableau 1 montre les documents consultés avec les financements par types de projets et la collaboration avec les différents bailleurs.

Tableau 1 : Documents consultés avec les financements par types de projets

RN	Type de projet et localisation	Type de Documents Consultés	Financement	Sources
RN9	Aménagement routier à la sortie de Toliara (PK2) à Analamisampy (PK107), soit un linéaire de 105km (Projet terminé)	EIE, PRI/Rap trim, Accord de prêt, Annexes, TDR.	BAD	DISE ⁴ , ARM ⁵ , ONE
RN4	Pont Malazarivo III PK 30+561 (Projet terminé en phase de garantie)	EIE, PAR, Annexes	Banque Mondiale	ARM
RN4	Pont Kamoro PK 405+900 (Projet terminé en phase de garantie)	EIE, Annexes EIE	Banque Mondiale	ARM
RN4	Pont Manambatomby PK 374+254 (en cours de finalisation)	EIE, Annexes EIE	Banque Mondiale	ARM
RNS5	HIMO entre Mananara Nord et Maroantsetra	EIE, Permis Env, Rap PRI, CEE	Union Européenne	ARM, ONE
RN 23 A	Travaux d'entretien des routes nationales Lot N° 08-A RNT 23A entre PK1 +420 et PK 71 + 300	Marché N°962 DIRTP, A/ CP 16 / FER /2017	FER	DRTP Alaotra Mangoro (Moramanga)
RN 44	Gestion des Travaux de réaménagement du site de carrière sis au PK 53- RN 44 sud, à Ampangabe, Commune rurale Amboasary, Région Alaotra Mangoro	Projet de Transport en Milieu Rural, APL2 Crédit IDA-3717 MAG- APL2 : Demande de proposition, TDR.	Association Internationale de Développement (IDA)	ARM

L'étude est ouverte à tous les projets routiers sur lesquels les évaluations peuvent s'effectuer durant toute la période de l'intervention.

Les évaluations des projets sur RN9, RNS5, RN7, et des projets d'entretiens courants et périodiques (Financement Ressource Propre Interne) sont alors faites à la base des documents disponibles.

⁴ Direction des Impacts Sociaux et Environnementaux

⁵ Autorités Routières de Madagascar

Ainsi, le choix des axes d'intervention sur terrain de l'étude (RN4, RN6, RN44) est fait suite à la consultation des responsables au sein de la DISE, ARM pour permettre des résultats cumulés et pertinents dans un délai très limité.

Sur l'ensemble de ces axes, on peut trouver à la fois des projets terminés et des projets en cours permettant ainsi de cumuler des résultats d'évaluation pour une durée limitée d'intervention.

Sur la RN4 : on peut trouver à la fois des projets terminés (construction de pont Malazarivo III à Mahitsy PK 30+561, station de pesage à Ambondromamy, construction de pont Kamoro PK 405+900), un projet en cours (construction de pont Manambatomby PK 374+254), et ainsi de voir les différents défis liés à l'intégration de mesures environnementales dans les projets.

Sur la RN6 (partie Ambondromamy - Mampikony): une évaluation par transect environnemental permet d'identifier les passifs environnementaux, et de faire une évaluation du degré d'appropriation de la population des infrastructures réalisées.

Sur la RN2 vers RN44 : routes nationales très fréquentées du fait de la potentialité économique de ces zones, entre autres par les Sociétés Ambatovy, Fanalamanga, et l'exploitation de chrome.

Evaluation sur l'axe RN44 : Evolution de l'état d'un gîte d'emprunt (au PK 53) 10 ans après sa restauration en 2007 (après résiliation du contrat de l'entreprise HO HUP en 2007).

RESULTATS ET DISCUSSION

Pour une analyse plus complète de la performance environnementale du MPT, trois paramètres sont identifiés dont l'analyse de la performance administrative à travers l'analyse de processus, l'analyse de la performance technique environnementale et l'analyse de performance relative aux comportements.

Résultats 1 : Analyse de performance administrative

Méthode d'évaluation pour l'analyse de processus

- **Première étape** : il s'agit d'évaluer si les mesures environnementales sont intégrées dans les documents de projet depuis la phase d'élaboration de projets (APS⁶) jusqu'au marché (DAO⁷)

Dans cette étape, la méthodologie d'évaluation est basée sur les critères suivants :

⁶ Avant-Projet Sommaire

⁷ Demande d'Appel d'Offre

Satisfaisant : le projet suit les directives du manuel de procédures et ses annexes avec tous les contenus nécessaires

Moyen : le projet ne suit pas les directives du manuel de procédures et ses annexes mais ayant tous les contenus nécessaires

Faible : le projet ne suit pas les directives du manuel de procédures et ses annexes, avec des contenus manquants.

Cette méthodologie d'analyse requiert la traçabilité obligatoire de tous les documents depuis l'APS jusqu' aux passations de marché pour chaque projet étudié.

- **Deuxième étape** : il s'agit de voir l'effectivité de l'application des processus pendant toutes les phases du projet. On fait l'analyse sur la base de revue documentaire et/ ou par la vérification sur terrain.

Tableau 2 : Matrice d'évaluation pour le processus

Phase	Indicateurs du processus	RN 9	RN S5	RN 4
APD	PV de Consultation public	0	0	0
	PV de Validation partie environnementale et sociale	0	0	0
	PAR ou PRI	1	1	1
	TDR	1	0	0
	PGES ou PREE/PAR	1	1	1
	PV de Consultation public	1	1	1
	Pré validation rapport EIE	0	0	0
	Évaluation EIE	1	1	1
	Permis environnemental	0	1	0
	CCE	1	1	0
	PV de Validation Budget EIE	0	0	0
DAO	CCP	1	1	0
	Annexe CCE	1	1	0
	PPES	1	1	1
Total	14 indicateurs	9	9	5

Les résultats obtenus de ces deux étapes sont complémentaires.

Pour chaque type de projet, on se base sur l'existence ou non de document cherché selon le manuel de procédure et on obtient la matrice d'évaluation pour le processus.

Le Tableau 2 mentionne la matrice d'évaluation pour le processus.

On remarque aussi la réinstallation progressive des PAPs ou population affectée par le projet déjà indemnisés lors de la mise en œuvre de PRI à proximité du pont Kamoro en 2017.



Photo 1 : Réinstallation progressive des PAPs au près du pont Kamoro RN 4

Ainsi, la performance de MTP au niveau du suivi de processus est douteuse, mais on peut donner un niveau indicatif de performance moyenne, vu la qualité du document de manuel de procédures existant et la poursuite de la collaboration avec les différents bailleurs.

Résultats 2 : Performance technique environnementale

Suite à une analyse simple des matrices de performance technique et environnementale, on a remarqué l'importance des indicateurs de performances positives vis-à-vis des indicateurs de performances négatives.

Tableau3 : Tableau de la variance d'importance

Nombre des Indicateurs	Variance de l'importance		
	≥ 7	5 – 6	< 5
Positifs= 17	13= 76% : A	4=24% : B	1=1% : C
Négatifs= 14	8= 57% : A	2=14% : B	4=29% : C

Ainsi les indicateurs sur la variance d'importance se présentent comme suit :

Si le pourcentage de la variance positive est supérieur au pourcentage de la variance négative, l'interrelation donne l'importance positive.

Tableau 4 : Tableau d'interrelation

Variance \ Variance +	A	B	C	Total + et %
A	+	-	-	1/3 = 33%
B	+	+	-	2/3 = 67%
C	+	-	-	1 = 33%
Total + et %	3/3 = 100%	1/3 = 33%	0/3 = 0%	44%

Si le pourcentage d'interrelation est supérieur à 50%, la performance est prépondérante, s'il est égal à 50% la performance est moyenne, et la performance est faible si le pourcentage est inférieur à 50%.

D'après ce tableau d'interrelation, la performance technique et environnementale du MTP est faible.

Résultats 3 : Interprétation des résultats d'analyse de performance relative aux comportements

Les performances identifiées sont négatives. Le niveau de la pauvreté de la majorité de la population à Madagascar engendre des dégâts inimaginables. Ceci est aggravé par l'inconscience sans exception et par l'insuffisance de l'implication de la population dans tous les domaines.

Quelques illustrations pour le cas de non appropriation des ouvrages.

Exemple : Pont Malazarivo RN4, PK 30+561, Projet terminé Avril 2017 en phase de garantie. Les autorités locales n'ont aucune réaction.

CONCLUSION

Des politiques de développement suivies par des réformes, des fonds d'investissements, des partenaires techniques, sociétés civiles intégrées et aussi des institutions nationales et internationales se manifestent rigoureusement sur les chocs de changement climatique aux niveaux mondial et régional d'où l'adoption de programmes, de mesures, de recommandations et d'accompagnements. Piloter des programmes novateurs capables d'assurer des projets d'investissements publics prêts à affronter au climat, et aussi mener des mesures de renforcements des capacités institutionnelles pour renverser les effets négatifs de ces changements climatiques et notamment une aptitude à conjuguer des leçons favorisant à changer le cap vers un développement durable et résilient exigent une conscience et stratégie technique adaptée et nouvelle pour pérenniser les projets. Le besoin d'un cadre politique cohérent et d'une démarche institutionnelle fixant la planification, le financement et

notamment la maintenance basée sur la bonne gouvernance et la transparence se fait ressentir.

La performance de dudit ministère est limitée en matière de suivi de processus et la performance environnementale est faible. Ce qui entraîne la vulnérabilité du réseau routier qui est l'artère de développement socio-économique dans un contexte de changement climatique.

Avec une stabilité politique retrouvée, malgré le contexte mondial et national de la pandémie de COVID-19, Madagascar doit rebondir et continuer ses efforts et ne doit pas cesser les efforts vis-à-vis de l'incertitude des désastres climatiques. D'ailleurs, il faudra éviter l'aggravation de récession économique provoquée par le coronavirus chez les populations les plus vulnérables. Les effets des changements climatiques augmenteront si des mesures ne sont prise, notamment par rapport aux objectifs de développement durable et de réduction de la pauvreté qui sont la raison d'être de cette étude. Pour arriver à cette fin, il s'agit concrètement de :

- Contribuer à l'amélioration de la qualité de la gestion environnementale des projets routiers dans le cadre de la gouvernance améliorée.
- Permettre aux infrastructures routières de contribuer au développement durable.
- Inciter l'appropriation des infrastructures réalisées par tous en titre de promotion d'une population résiliente.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Andriamasinoro, J. O. (2018). Adaptation aux changements climatiques à Madagascar: structuration et problématisation de l'action publique nationale (Doctoral dissertation, Université du Québec à Montréal).
- 2) Antoine, S. (2001). Évaluation environnementale, études d'impact et développement durable: bilan, évolution et perspectives. Les évaluations environnementales stratégiques, 37.
- 3) Du Québec, G. (1994). Les orientations du gouvernement en matière d'aménagement du territoire. La protection du territoire et des activités agricoles Document complémentaire révisé. http://www.mamsl.gouv.qc.ca/pdf_mamm/amen/protection_agricole.pdf.
- 4) Détermination des contraintes de nature anthropique, Ministère des affaires municipales, Direction générale de l'urbanisme et de l'aménagement du territoire, mars 1994.
- 5) Ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement. (2001) L'étude d'impact sur l'environnement. France.

- 6) Programme des Nations Unies pour le développement (PNUD).(2016) Le PNUD face aux changements climatiques. Édition : Susan Guthridge-Gould.. New York, NY, 10017 États-Unis.
<https://www1.undp.org/content/dam/undp/library/Climate%20and%20Disaster%20Resilience/1-44%20Changements%20Climatiques-FR-final-for%20web.pdf>
- 7) Primature, Programme Stratégique pour la Résilience Climatique de Madagascar. Février 2019. Madagascar.
- 8) Riverson, J., Gaviria, J., & Thriscutt, S. (1992). Les routes rurales en Afrique au Sud du Sahara : leçons tirées de l'expérience de la Banque Mondiale (No. WTP141, pp. 1-71). The World Bank.
- 9) Sommet Africain des infrastructures Résilientes au Climat. Afrique : vers le développement des infrastructures résilientes. ACRIS. 27-29 Avril 2015. Union Africaine. AddisAbaba-Ethiopie.

ETUDES COMPARATIVES DU CHARBON DE BOIS ET DU CHARBON VERT

par

RAFEHIFANDAMINANA Innocente⁽¹⁾, RANDRIANARIVELO Frédéric⁽¹⁾,
RAHELARILALAO Bienvenue⁽¹⁾

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

RESUME

Ce travail s'inscrit dans la cadre des études comparatives des caractéristiques physiques et énergétiques du charbon de bois et du charbon vert. Le but de l'étude est de montrer que le charbon vert est une perspective réelle pour réduire la déforestation et améliorer la gestion des déchets agricoles. Après avoir élaboré les briquettes de charbon vert à partir des déchets agricoles et forestier ; des tests de caractérisation physique ont été effectués pour déterminer la densité, la teneur en cendre, la teneur en matière volatile, le carbone fixe, le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI) et le test de sécabilité. Des tests d'efficacité énergétique dans des foyers améliorés par rapport au charbon de bois ont été faits afin de déterminer la puissance et le rendement thermique au foyer. Les résistances mécaniques des deux types de charbon sont comparables. Le PCI des charbons verts (18 à 25 MJ/kg) est légèrement inférieur au PCI des charbons de bois (22 à 28 MJ/kg). Les essais aux foyers améliorés ont montré une nette supériorité pour le charbon vert, avec un rendement thermique variant de 10 à 30% de plus par rapport au charbon de bois. Les charbons verts peuvent substituer l'utilisation des bois énergies, solution pour la préservation de l'environnement. Les déchets résiduels sont localement abondants : les déchets rizicoles, déchets agro-industriels. L'installation des unités de production industrielle, des formations des paysans pour des productions artisanales et de campagne de vulgarisation des charbons verts sont nécessaires.

Mots-clés : Charbon, Résidus, Pouvoir calorifique inférieur, Foyers.

ABSTRACT

This work is part of comparative studies of the physical and energy characteristics of charcoal and green charcoal. The aim of the study is to show that green charcoal is a real prospect for reducing deforestation and improving the management of agricultural waste. After developing green charcoal briquettes from agricultural and

forest waste; physical characterization tests were conducted to determine the density, the ash content, the volatile content, the fixed carbon, the net calorific value (NCV) and the secability test. Of the fuel efficiency evaluation with improved stove compared to the charcoals were conducted to determine power and thermal efficiency of the stove. The mechanical resistances of the two types of charcoal are comparable. The NCV of green charcoals (18 to 25 MJ/kg) is slightly lower than the NCV of charcoals (22 to 28 MJ/kg). The improved stove testing was showed a clear superiority for green charcoal, with thermal efficiency ranging from 10 to 30% more than charcoal. Green charcoals can replace the use of energy woods, a solution for the preservation of the environment. Residual waste is abundant locally: rice waste, agro-industrial waste, etc. The installation of industrial production units, training of the farmers for artisanal production and the extension of green charcoals are necessary.

Key words : Charcoal, Residues, Net calorific value, Stoves.

INTRODUCTION

À Madagascar comme dans les pays subsahariens, le secteur de l'énergie est caractérisé par la prédominance du bois de chauffe et du charbon de bois, soit 79% de la consommation totale en 2017, qui est à l'origine de la dégradation des forêts naturelles près de 36 000 ha par an (MEH⁸, 2017). La consommation est dominée par le bois énergie soit 69% en bois de chauffe et 10% en charbon de bois suivi des hydrocarbures de 11%, du charbon fossile de 6% et enfin de l'électricité de 3% (MEH, 2017). La progression de la consommation nationale est en hausse de 5,6 % soit 5 233 ktep en 2016 à 5 524 ktep en 2017. Le Tableau 1 suivant présente la consommation nationale par énergie en 2016-2017 à Madagascar.

La consommation annuelle moyenne des ménages urbains utilisateurs des foyers traditionnels est respectivement d'environ 270 kg de bois de feu et 125 kg de charbon par personne. Les populations rurales utilisent annuellement 513 kg de bois de feu et 110 kg de charbon de bois par personne. Par rapport à ces consommations, les utilisateurs de foyers améliorés économisent environ 30% du combustible. (MEH, 2015, GIZ/ECO)

⁸ Ministère de l'Énergie et des Hydrocarbures

Tableau 1 : Consommation nationale par énergie en 2016-2017

Produit	2016	2017
Bois de chauffe (ktep)	3 683	3 810
Charbon de bois (ktep)	590	590
Autre biomasse (ktep)	57	59
Charbon (ktep)	221	315
Hydrocarbures (ktep)	557,2	590,6
Electricité (ktep)	150	159
TOTAL	5 233	5 524

Source : (MEH, 2017)

La consommation annuelle moyenne des ménages urbains utilisateurs des foyers traditionnels est respectivement d'environ 270 kg de bois de feu et 125 kg de charbon par personne. Les populations rurales utilisent annuellement 513 kg de bois de feu et 110 kg de charbon de bois par personne. Par rapport à ces consommations, les utilisateurs de foyers améliorés économisent environ 30% du combustible. (MEH, 2015, GIZ/ECO).

La production d'énergie verte est primordiale pour assurer un développement durable dans le respect de l'environnement. Des initiatives de production familiale ou artisanale ont été développées en Afrique, dont à Madagascar, mais elles n'arrivent pas à concurrencer le charbon de bois pour l'instant. Les résidus agro forestiers cibles constituent pourtant un fort potentiel (PREB⁹, 2016 ; COI¹⁰, 2018 ; MEH, 2015). Cette énergie verte, comme le charbon vert, peut être produit à partir de toutes sortes de matières résiduelles ou de cultures dédiées d'origine forestière ou agricole. La fabrication des charbons verts semble être une alternative très prometteuse pour le secteur bois-énergie. Il se présente sous forme de briquettes ou de boules de la taille de morceaux de charbon de bois traditionnel et pourrait servir dans la plupart des fours utilisés dans les pays du Sud. En théorie, c'est donc un produit similaire au charbon de bois, son aspect, son utilisation permettant d'éviter la coupe des arbres.

Des chercheurs, des entreprises, des ONG dans divers pays ont mené des études et ont produit du charbon vert. Au Congo, grâce à la production de charbon vert, une partie de la ville est devenue plus propre en termes de collecte des déchets et la coupe de 350 arbres est évitée (Association Initiative Climate, 2019). Depuis 2012, l'association Yasagu au Mali produit 900 kg de charbon vert par jour (Mathilde, février 2014). En Thaïlande, un certain nombre d'usines de briquetage installées au

⁹ Plan Régional de l'Énergie Biomasse

¹⁰ Commission de l'Océan Indien

début des années 80 ne fonctionnaient pas à la fin des années 1980. En 1989, il n'y avait que 2 usines de briquettes de balles de riz et de sciure. La production de briquettes de sciure de bois semble avoir augmenté régulièrement de 1980 à 1995, tandis que la production de briquettes de balle de riz a diminué (Castro and *al.*, 1994).

En Indonésie, de nombreux producteurs de briquettes de charbon de bois sont orientés vers l'exportation. Les matériaux utilisés pour les briquettes sont généralement la noix de coco et la sciure de bois. La capacité de production est d'environ 2400 tonnes par an. Les marchés d'exportation sont généralement l'Europe et le Japon. Outre l'exportation, ces producteurs vendent également le produit sur les marchés locaux, principalement dans les supermarchés des grandes villes (Castro and *al.*, 1994).

Le charbon est normalement produit par l'utilisation de terre, de fosse ou de simples fours. Dans la fabrication du charbon à partir des déchets agroforestiers, plusieurs systèmes sont utilisés : le carbonisateur artisanal tels que les meules, les fosses et le carbonisateur amélioré Casamance (Samuel, 2014). L'objet de ce travail est de mener des études comparatives sur les caractéristiques physiques et énergétiques du charbon de bois et du charbon vert pour pouvoir montrer que le charbon vert est une perspective réelle pour réduire la déforestation et améliorer la gestion des déchets agricoles.

MATERIELS ET METHODES

Procédés de fabrication de charbon vert

Il existe un certain nombre de sources bibliographiques qui décrivent les étapes de fabrication de briquettes biochars. Ces étapes peuvent être résumées de la manière suivante : la préparation de la matière première, la carbonisation, la préparation du liant, la densification par compression ou par agglomération ainsi que le séchage.

Les matières premières utilisées sont collectées directement chez les exploitants venant des différentes régions agricoles. Les matières premières utilisées sont les biomasses d'origine agricole lignocellulosique des différentes régions : la balle de riz et la paille riz, la paille de maïs et rafle de maïs, la coque d'arachide et les résidus de coco constituent les composantes principales respectivement des charbons vert ou briquettes biocharbons BBR¹¹, BPR¹², BPM¹³, BRM¹⁴, BCA¹⁵ et BRC¹⁶.

¹¹ Briquette de balle de riz

¹² Briquette de paille de riz

¹³ Briquette de paille de maïs

¹⁴ Briquette de rafle de maïs

¹⁵ Briquette de coque d'arachide

¹⁶ Briquette des résidus de coco

Pour usage domestique, brûler la biomasse directement n'est pas pratique. Un combustible solide sous forme de charbon de bois ou de biocharbon est préférable par pyrolyse lente ou carbonisation (HomChat et *al.*, 2011 ; Typpayawong et *al.*, 2017, Jin Sun et *al.*, 2016). La production de charbon de biomasse par carbonisation est l'une des méthodes énergétiques de conversion les plus établies. Lorsque la biomasse est chauffée, une libération volatile se produit, se transformant en charbon. Les volatiles peuvent être brûlés pour la fourniture de chaleur. Cette étape est la plus importante dans la fabrication de briquettes de biocharbon (Johannes et Stephen, 2015 ; K.Y et *al.*, 2019). Le contrôle de la carbonisation permet d'optimiser la production de charbon à haut contenu énergétique. Des chercheurs ont abordé les meilleures conditions d'exploitation pendant carbonisation. D'une part, Maya et al ont développé que trois paramètres de fonctionnement sont nécessaires : la température maximale, la pression et l'atmosphère (Manya et *al.*, 2018).

Le charbon est produit à faible température et à vitesse lente de chauffe. Le but de la carbonisation est d'augmenter le taux de carbone dans le produit. Le charbon, les volatiles et les gaz qui en découlent représentent les produits des réactions (MASHIO et *al.*, 1994, Dielbod, 1980).

Différents types de four permettent de réaliser l'opération de la carbonisation. Dans la fabrication du charbon à partir des déchets agroforestiers, plusieurs systèmes sont utilisés : le carbonisateur artisanal tels que les meules, les fosses et le carbonisateur amélioré Casamance (Samuel, 2014). Les procédés industriels visent à diminuer le coût de cet apport de chaleur en mettant en œuvre différents principes. (FAO, 1985). Les rendements massiques se situent entre 15 % et 32 % sur masse anhydre (Numazawa, 2000). Le rendement massique de carbonisation des fours améliorés est à l'ordre de 30 à 35% (Samuel, 2014). Un four de type Casamançais est utilisé pour la carbonisation, permettant une amélioration de rendement de l'ordre de 30 à 35%.

Typpayawonga et al ont mené des essais expérimentaux sur la carbonisation du rhizome de manioc dans un système de réacteur de carbonisation semi-continu chauffé de l'extérieur, type cornue avec des rendements en biochar de 33 à 35% (Typpayawonga et *al.*, 2017).

La granulométrie est l'un des facteurs de réussite de la compaction de la fabrication des briquettes. La réduction de la taille de la biomasse augmente également la densité apparente, ce qui améliore le flux de biomasse lors de la densification (Biswas et *al.*, 2017). Il existe plusieurs méthodes de réduction de taille, qui comprennent le hachage, le déchiquetage, le broyage au marteau et le concassage. La taille avant pressage la plus appropriée est inférieure à 4mm que nous avons obtenu en utilisant un broyeur à marteaux avec un tamis de 4mm fixé à l'orifice de décharge.

La quantité de liant à ajouter dépend des propriétés de liaison de la matière première et du liant (Asamoah et *al.*, 2018). Il y a trois types de liants utilisés pour la production de briquettes, à savoir les liants inorganiques, les liants organiques et liants composés (Zhang et *al.*, 2018). Certains matériaux de biomasse ne s'agglomèrent pas, sauf avec l'ajout de liant surtout si une technique de compactage à basse pression est employée. L'amidon de manioc donne des résultats satisfaisants dans la fabrication des briquettes biocharbon (Koala, 2012) dans les rapports massiques de 5 à 10%. Le tableau 2 présente la composition du mélange des briquettes en pourcentage massique.

Tableau 2 : Composition des briquettes en pourcentage massique

	Résidus agricoles carbonisés en (%)	Liant en (%)
Paille de riz	90	10
Balle de riz	95	5
Paille de maïs	90	10
Rafle de maïs	94	06
Coque d'arachide	90	05
Résidus de coco	95	05

Pour l'usage domestique, la dimension est de 5 x 3 à 8cm (Juan et *al.*, 2017). Nous avons utilisé pendant les essais une presse hydraulique pouvant produire 4 pièces de 4,5cm de diamètre et de 5cm de hauteur en une opération de compactage. La pression transmise par le piston compresseur est exercée par une cricque de 1tonne

La méthode de la société CARBOSEN consiste à faire passer les briquettes humides dans un séchoir pour éliminer l'eau de sorte qu'elles soient assez solides et utilisables dans les fourneaux et les foyers domestiques (Lamine, 2009). Dans notre cas, le séchage se fait sous hangar pendant 4 à 10 jours.

Les expérimentations portant sur les briquettes biocharbon sont menées au laboratoire. Les déterminations de l'humidité, des taux de cendres, de matières volatiles et de carbone fixe, ainsi que les pouvoirs calorifiques et les efficacités énergétiques des briquettes ont été réalisées au laboratoire du Centre National de Recherche Industriel et Technologique (CNRIT). Les protocoles des essais suivent la norme proposée par le CNRIT au bureau des Normes du ministère du Commerce et de l'Industrialisation Malgache.

Détermination des caractéristiques des charbons verts

Généralement, le taux d'humidité, recommandé pour un traitement thermique, doit être inférieur à 20 %. Le protocole utilisé pour la détermination de la teneur en humidité suit la norme EN ISO 18134-3. Plus le taux d'humidité est faible, plus le PCI est élevé, d'où l'importance d'optimiser au maximum le séchage des briquettes.

Le taux de cendres est essentiellement le taux de résidus obtenus après calcination de l'échantillon étudié. Le protocole de détermination de la teneur en cendres suit la norme NF EN ISO 18122.

Les matières volatiles constituent les composés organiques condensables et non condensables obtenus après pyrolyse de l'échantillon de biomasse. Le protocole utilisé pour déterminer la teneur en matières volatiles suit la norme NF EN ISO 18123.

Dans la composition d'un combustible, le carbone fixe est essentiel, ce qui détermine sa potentialité énergétique. Il se calcule après la détermination des données suivantes : Humidité en % (H), Indice de Matières Volatiles (MV), le taux de Cendres (A) ainsi que le taux de Carbone Fixe (CF) exprimé en pourcentage massique par rapport à la masse de charbon brut.

Le Pouvoir Calorifique Inférieur PCI est déterminé par la méthode indirecte, par la formule de CASSAN, tenant compte de la valeur de la teneur en cendre des briquettes. Les pouvoirs calorifiques des échantillons peuvent être déterminés au moyen de bombes calorimétriques ou par le biais de relations empiriques (Sheng et al., 2005).

Les tests d'efficacité ont pour but de comparer les performances énergétiques des briquettes biocharbon par rapport à celles du charbon de bois. Pour pouvoir apprécier l'efficacité énergétique des briquettes biocharbon, il faut passer ces briquettes à divers tests entre autres : le drop test, le test d'inflammabilité et enfin le test d'ébullition d'eau. Les résistances aux chocs de nos briquettes ont été mesurées à partir du drop test et le test de sécabilité. Le premier porte sur la simulation des sollicitations subies par le combustible lors du transport qui consiste à laisser tomber la briquette d'une hauteur de 1,5 m. Le deuxième consiste à déterminer l'aptitude des briquettes à être fractionnées. Après la chute, on apprécie le comportement de chaque combustible. Les tests d'ébullition d'eau (TEE) sont effectués dans les mêmes conditions opératoires ; les dispositifs sont des ustensiles d'usage courant, à savoir les foyers dit améliorés et des marmites de fabrication locale. Les briquettes biocharbons BPR, BBR, BPM, BRM, BCA, BRC ainsi que le charbon de bois ont été testés avec ces foyers améliorés. Le temps au bout duquel la température d'ébullition est atteinte et la masse de combustible consommée pendant ce laps de temps permettent de déterminer : la puissance du foyer, le rendement et la consommation en combustible en kg/h de chaque foyer.

La performance des briquettes seront déduites du résultat des tests en tenant compte des différentes appréciations.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

La comparaison du rendement massique du charbon selon le type de four est donnée dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Comparaison des rendements massiques du charbon selon le type de four

	Four traditionnel	Four traditionnel amélioré	Four tubulaire
Balle de riz en %		35,4	39,43
Coque d'arachide en %		34,43	30,3
Eucalyptus en %	10		

En pyrolyse sur le four tubulaire, la cinétique des transferts de chaleur prédomine, les différentes phases de la pyrolyse se superposent. Suivant la méthode traditionnelle, l'eucalyptus est le principal bois utilisé à la production du charbon à Madagascar, le rendement massique du charbon fabriqué dans des fosses est environ 10%. Mais pour la méthode traditionnelle améliorée, le rendement massique de carbonisation de la biomasse est compris entre 30 à 35%. La carbonisation est rapide au sein de la biomasse. Ces résultats confirment que le rendement de la carbonisation dépend de la granulométrie. Le rendement de la carbonisation des résidus de coco et de rafle de maïs est inférieur à ceux de la balle de riz et la coque d'arachide. GOOS (Goos, 1952) a observé que l'exposition soudaine de la biomasse à une haute température donne un faible rendement, tandis que BRUNNERS (1977) a trouvé une relation logarithmique linéaire entre la vitesse de chauffe et le rendement de charbon issu de la pyrolyse de cellulose.

Les résultats des rendements massiques sont présentés dans le Tableau 4 suivant.

Tableau 4 : Rendement massique de carbonisation

	Balle de riz	Rafle de maïs	Coque d'arachide	Bourre coco
Rendement de la carbonisation %	35,4	31,5	30,30	31,5

Les rendements de carbonisation varient de 30 à 35%. Le rendement en charbon de la balle riz qui est de 35,4 %, reste très élevé pour les biomasses d'origine agricole. Ce résultat confirme l'étude effectuée par SAMUEL (Samuel, 2014) pour lequel le rendement de carbonisation est de l'ordre de 30 à 35%.

Les résultats des caractérisations physico-chimiques des briquettes sont présentés dans le Tableau 5 suivant.

Tableau 5 : Résultats des caractérisations physico-chimique des briquettes

	BPR	BBR	BPM	BRM	BCA	BRC	Charbon de bois
H (%)	5,30	5,33	8,74	7,53	7,32	9,6	1-10
A (%)	44,30	49,00	26,62	29,39	27,65	44,04	0,5-10
MV (%)	23,01	17,11	20,97	15,62	27,40	19,07	7-25
C_f (%)	27,39	28,56	43,68	50,45	45,63	27,29	72-92
PCI (MJ/kg)	18,63	17,06	24,57	24,64	24,30	18,73	22-28

Les teneurs en humidité des briquettes de résidus agricoles reportées par Pallavi varient dans la fourchette [5% - 10%] (Pallavi et al., 2013). Les valeurs trouvées dans notre cas sont proches de la borne inférieure ; ceci prouve que le liant a été incorporé aux matières carbonisées dans des proportions optimales. Un excès de liant préparé avec de l'eau aurait entraîné entre autres conséquences une humidité plus substantielle. Les valeurs de PCI des briquettes BPR, BBR, BRC sont respectivement 18,63 MJ/kg, 17,06 MJ/kg et 18,73 MJ/kg. Ces valeurs sont inférieures que la fourchette indiquée pour les charbons de bois produites ailleurs [22–28 MJ / kg] (CNRIT, 2018, Mwampamba et al., 2013). Les valeurs de PCI des briquettes BPM, BRM et BCA (24,57 MJ/kg, 24,64 MJ/kg et 24,30 MJ/kg) ont des valeurs assez proches du charbon de bois.

Ce qui pourrait se révéler comme l'handicap majeur de ces briquettes biocharbon, ce sont leur teneur en cendres particulièrement élevée, celle des BBR étant supérieure à celle des BPR, respectivement 49,00 % et 44,30%, 26,62% et 29,39% pour le BPM et BRM, 44,04 % pour le BBC.

Tableau 6 : Résultats du drop test des briquettes biocharbon

Hauteur (m)	m_{BPR} (g)	m_{BBR} (g)	m_{BPM} (g)	m_{BRM} (g)	m_{BCA} (g)	m_{BRC} (g)	Charbon de bois
0	18	26	20	20	20	20	18
0,5	18	26	20	20	20	20	18
1,00	18	24	20	20	11	20	18
1,5	18	24	16	19	7	20	16
1,9	18	24	14	17	5	20	16
Indice de drop test (%)	100	92	70	85	25	100	90

Des fissures sur les briquettes ont été relevées lors des drops tests, et, quelquefois, des morceaux de petite taille se détachent. Les résultats du test sont les suivants : les BPR et BRC ne s'effritent pratiquement pas avec un indice de 100% ; les BCA accusent un coefficient de friabilité élevé, sont les plus fragiles vue qu'elles sont morcelées à 1,9 m d'hauteur ; les briquettes ayant les indices de 70-90% ont des cassures après la fragmentation et les BRC et BPR sont les plus résistantes, elles restent intactes sans fissure. Des chercheurs ont montré que le charbon de bois a un indice de drop de test de 80 à 90% suivant l'âge et la nature du bois utilisé pour sa fabrication (Jean de Dieu et *al.*, 2015).

Lors des tests de sécabilité, les briquettes se brisent en deux ou trois morceaux au maximum. Avec ces constats, on peut affirmer que les briquettes résistent bien aux chocs.

Tableau 7 : Rendement aux foyers

Désignation	Charbon de bois	BPR	BBR	BPM	BRM	BCA	BRC
Consommation (kg/h)	0,41	0,32	0,21	0,38	0,50	0,47	0,61
Puissance au foyer (Watt)	1 020,31	395,99	424,55	534,93	719,19	587,01	742,61
Rendement au foyer (%)	38,38	27,21	42,51	24,22	29,87	26,19	33,07

Les résultats de l'efficacité énergétique des briquettes biocharbon par rapport au charbon de bois sont consignés dans le Tableau 7. Pendant le test d'ébullition d'eau, les briquettes BRC ont le taux de combustion le plus élevé (0,61 kg/h), tandis que les

briquettes BBR ont la vitesse de combustion la plus faible (0,21 kg/h). La faible vitesse consommation de combustible améliore le rendement au foyer. Le rendement au foyer de charbon de bois est de 38,8% qui sont un peu élevé par rapport aux briquettes. Les BBR ont le rendement au foyer assez élevé, 42,51%.

Les briquettes BPR, BPM, BRM et BCA ont des taux de combustion similaires respectivement 0,32kg/h, 0,38kg/h, 0,50kg/h et de 0,47 kg/h.

Selon Ndindeng *et al.* (2015), les briquettes fabriquées à partir de mélanges coque et paille ont une vitesse d'inflammation assez élevée. En particulier, la vitesse de la consommation de combustion dépend de la ventilation de la chambre de combustion. Ndindeng *et al.* (2015) ont montré que la consommation des briquettes BBR non carbonisées et du charbon de bois est plus élevée, environ 2 à 3kg/h alors que pour la consommation des briquettes BBR carbonisées elle est réduite jusqu'à la moitié. Les briquettes biocharbons se sont émiettées lorsque le feu a été mis et ne pouvait donc pas être réutilisé. C'est un problème courant dans l'industrie du briquetage dans le monde (Mwampamba *et al.*, 2013).

Du fait que le PCI du charbon de bois est assez élevé 22-28 MJ/kg (CNRIT, 2018, Mwampamba *et al.*, 2013), la puissance de charbon de bois dépasse celle des briquettes BBR et BPR. Par contre, ces dernières possèdent de meilleurs rendements, ce qui signifie une consommation moins importante de combustible.

CONCLUSION

L'objectif de nos travaux de recherche était de réaliser et caractériser des briquettes biocharbon dédiées à une utilisation domestique, à base de résidus agricoles de riz (balle et de paille de riz), de résidus agricoles de maïs (paille et rafle), de coque d'arachide et de bourre de coco préalablement carbonisées en comparaison avec le charbon de bois. Le PCI des charbons verts (18 à 25 MJ/kg) est légèrement inférieur au PCI des charbons de bois (22 à 28 MJ/kg). Les essais aux foyers améliorés ont montré que le rendement thermique du charbon vert est meilleur par rapport au charbon de bois, de 10 à 30% plus élevé. Les charbons verts peuvent substituer l'utilisation des bois énergies, solution pour la préservation de l'environnement.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Anne GEORGELIN, Aout 2016, *Le secteur de l'énergie à Madagascar «enjeux et opportunités d'affaires»* : Ambassade de France et Service Economique à Madagascar.
- 2) Asamoah, B.; Nikiema, J.; Gebrezgabher, S.; Odonkor, E.; Njenga, M. A, 2016, *Marketing and Use of Fuel Briquettes. Review on Production.*

- 3) Association Initiative Climate, 2019, «*Pour chaque ménage, un charbon vert*» : République Démocratique du Congo.
- 4) Bijoy Biswas, Nidhi Pandey, Yashasvi Bisht, Rawel Singh, Jitendra Kumar, and Thallada Bhaskar. 2017, Pyrolysis of agricultural biomass residues: Comparative study of corn cob, wheat straw, rice straw and rice husk. *Bioresource Technology*, N° 237, pages 57–63.
- 5) COI Commission de l’Océan Indien, 2018, *Etude du potentiel de valorisation énergétique de la biomasse ligneuse dans les états membres de la Commission de l’Océan Indien* : Rapport final, COI/ENERGIE/SERV/2018/035.
- 6) Dotus Samuel, 2014, *Production de briquettes de charbon à base de déchets ménagers organiques* : Univer.
- 7) GOOS A. W., 1952, *The Thermal Decomposition of Wood*. In *wood chemistry* : Wise L.E., Jahn, E. C., Eds; Rheinhold Publishing Co.: New York, p 826.
- 8) Homchat K, Sucharitakul T., 2011, the experimental study on pyrolysis of cassava rhizome utilizing fuel gas, *Energy Procedia*, N° 9, pages 264-273.
- 9) Jean de Dieu RAMAROSON, Jaconnet Olivier Andrianaivoravelona, Rijalalaina Rakotosaona, Jean Luc Rasoanaivo, Phillippe andrianary, Lala Andrianaivo et al, 2015, *Mada-Hary*, N°3.
- 10) Jinsun cha, Parc, Parc Sung Hoon, 2016, Production and utilization of biochar, *Journal of Industrial and Engineering Chemistry*, N° 40, pages 1-15
- 11) Joan J.Manya, Manuel Azura, José A.Manso, 2018, Production de biochar par pyrolyse lente de différents matériaux de biomasse : Recherche des meilleures conditions d’exploitation, *Biomasse et bioénergie*, N°117, pages 115-123, <http://doi.org/10.1016/j.biombioe.2018.07.019>
- 12) Johannes Lehmann, Stephen Joseph, 2015, Biochar for environmental Management, *Science, Technology and Implementation*, N°2, 976 pages
- 13) Juan Arevalo, Grimaldo Quispe, Carlos Raymudo, 2017, Sunstainable Energy Model for the production of Biomass briquettes based on rice husk in low-incolle agricultural areas in Peru, *Energy Procedia*, N°141, pages, 138-145: , CPESE 2017
- 14) KOALA Lamoussa, 2012, *Fabrication manuelle de briquettes de balle de riz et évaluation des performances au foyer amélioré à balle de riz* : Université Polytechnique de BOBO-DIOULASSO, 130p
- 15) K. Y Tippayawong, S.Santiteerakul, S.Ramingwong, N. Tippayawong, Coast analysis of community scale smokeless charcoal briquette production from agricultural and forest residue, *Energy Procedia*, N° 160, Pages 310-316
- 16) Lamine THIONE, 2009, *Le biocharbon, quelles opportunités pour le Sénégal ?*
- 17) Laval Mathilde, 2014, *Le charbon vert, espoirs et réalités d’une alternative séduisante* : Etude commanditée par la guide Européenne du Raïd.

- 18) MASCHIO G., LUCCHESI, A. et KOUFOPANOS, C., 1994, Study of kinetic and transfer phenomena in the pyrolysis of biomass particles. In: *Advances in Thermochemical Biomass Conversion*, N°2, pages 746 – 759: Ed. A.V. Bridgwater.
- 19) MINISTERE DE L'ENERGIE ET DES HYDROCARBURES, 2015, Document *d'Etude de la Politique et Stratégie de l'Energie, Assistance pour le Développement d'une Nouvelle Politique de l'Energie et d'une Stratégie pour la République de Madagascar – Phases 2 et 3.*
- 20) Ministère de l'Energie et des Hydrocarbures, 2017, *Assistance pour le Développement d'une Nouvelle Politique de l'Energie à Madagascar.*
- 21) Mwampamba TH, Owen M, Pigaht M. 2013, Opportunities, challenges and way forward for the charcoal briquette industry in sub-Saharan Africa. *Energy Sustain Dev*, N° 17(2), pages 158–70.
- 22) Ndingeng S.A., Mbassi J.E.G., Mbacham W.F., Manful J., Graham S., Acquaaah, Moreira J., Dossou J., Futakuchi K., 2015, *Quality optimization in briquettes made from rice milling by-products in Energy for Sustainable Development*, N° 29, pages 24-31 ?
- 23) NF EN ISO 18122., 2015, *Solid biofuels - Determination of ash content.*
- 24) NF EN ISO 18123, 2015, *Solid biofuels - Determination of the content of volatile matter.*
- 25) NF EN ISO 16967. 2015, *Solid biofuels - Determination of major elements - Al, Ca, Fe, Mg, P, K, Si, Na and Ti.*
- 26) NF EN ISO 16948. 2015, *Solid biofuels - Determination of total content of carbon, hydrogen and nitrogen.*
- 27) Pallavi, H.V., Srikantaswamy, S., Kiran, B.M., Vyshnavi, D.R., Ashwin, C.A., 2013, Briquetting agricultural waste as an energy source. *J. Environ.Sci.Comput.Sci. Technol*, N°. 2(1), pages 160-172.
- 28) P. Girard, FAO. , 1985, Quel futur pour la production et l'utilisation du charbon de bois en Afrique, <http://www.fao.org/docrep/005/y4450f/y4450f10.htm>.
- 29) PREB Région Boeny (Plan Régional de l'Energie Biomasse), 2016, *Situation initiale en énergie de biomasse : Offre – bilan et demande.*
- 30) Singh R.N., Bhoi P.R. and Patel S.R., 2007, Modification of commercial briquetting machine to produce 35mm diameter briquettes suitable for gasification and combustion, *Renewable Energy*, N° 32, pages 474-79.
- 31) Zhang, G.; Sun, Y.; Xu, Y. 2018, Review of briquette binders and briquetting mechanism. *Renew. Sustain. Energy Rev.*, N° 82, pages 477–487.

ETUDES DES PHENOMENES DE LA Foudre SUR LES TOURS DE GRANDE HAUTEUR

par

RANAIVOARISOA Toky F.⁽¹⁾, RAMAHATANA Faly Hobitokiniaina⁽¹⁾

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

RESUME

Depuis peu, les chercheurs spécialisés du domaine de la foudre s'intéressent de près à son interaction avec les objets foudroyés. L'énergie de la foudre peut être classifiée parmi les énergies propres.

Le principal objectif de cet article consiste entreprendre et de résoudre des problèmes récemment apparus à propos des caractéristiques des arcs en retour de la foudre sur les structures élevées. On a utilisé le logiciel Matlab pour simuler le travail. Pour ceci, on a simulé une foudre frappant une tour d'hauteur 553m (tour CN de Canada) pour la première partie et une tour d'hauteur 62,5m (tour de l'Université de Sao Paulo) pour la deuxième partie en utilisant le modèle de courant de Rachidi et de Al [Rachidi et Al]. Les cinq différents modèles de choc de retour BG (ou Bruce et Golde), TCS (ou Source de courant traversal), TL (Ligne de transmission), MTL et MTLE (modèles de ligne de transmission modifiée) sont étudiés. Pour la détermination de courant de foudre tout au long de la tour, on a étudié la tour CN de 553m. Ainsi, on a employé la fonction de Heidler pour décrire le courant spécifié au niveau du sol c'est-à-dire le courant non contaminé. Ce courant est représenté par une courbe exponentielle descendante présentant un pic de 4kA pour $t=1\mu s$. Autrement dit, la foudre arrive très rapidement à la hauteur observée avec une valeur très élevée et diminue en très peu de temps. A part cela, on a trouvé que la répartition du courant $i(z, t)$ dans l'espace et dans le temps le long de la tour en observant à la hauteur $z=474m$. Ce courant présente un premier pic de valeur 1,8kA à l'origine de temps et un deuxième 2,6kA à $5\mu s$. Après cela, il décroît. Cette allure est due surtout à la forme d'onde du courant de base de canal. En comparant ces résultats avec l'observation expérimentale de foudre frappant à la tour CN, on constate une ressemblance d'allure (un premier pic suivi d'un deuxième pic, celui-ci est enchainé à la suite avec une trajectoire décroissante).

Concernant la répartition du courant le long du canal de foudre, l'observation des courants à une hauteur $z'=4000m$ en choisissant la tour de l'Université de Sao Paulo

de 62,5m nous conduit à dire que pour tous les modèles (TL, MTLL et MTLE), tous les courants le long du canal de foudre mettent un retard de temps $46\mu\text{s}$ pour prendre un pic de valeur 1,2kA, 0,6kA, 0,5 kA respectivement pour modèles TL, MTLL et MTLE. Ces pics sont suivis d'une allure décroissante. On remarque que le courant du modèle TL se trouve au-dessus de celui des deux autres modèles, en fait, cela est causée par sa valeur de $P(z')$ élevée par rapport à celle des autres modèles. On constate aussi que le courant mesuré à la base de la tour se diffère des courants propageant tout au long du canal, cela est dû aux effets des réflexions aux extrémités de la tour. En comparant ces résultats avec ceux relatifs au courant mesuré lisses, ces derniers présentent le même retard de temps mentionné précédemment que les premiers.

Mots-clés : Arc en retour Foudre, Effet d'ombrage, Modèles d'Ingénieur, Structures élevées, Tour élevée, Traceur descendant, Traceur ascendant de connexion.

ABSTRACT

Recently, researchers in the field of lightning taken a close interest in its interaction with struck objects. Lightning energy can be classified as clean energy. The main objective of this article consists of developments of to understand and solve problems concerning the characteristics of return arcs of lightning on high structures. We used Matlab software to simulate the work. For the first part, 553 m high tower (CN tower of Canada) was struck down and the current model of Rachidi were considered. Heidler's function was used to specified the current at ground level, that is, the uncontaminated current. This presents a decaying exponential curve showing a peak of 4kA for $t = 1\mu\text{s}$. The result is that the base lightning channel current is high at the onset of lightning strike but decreases in a very short time. Apart from that, we found the distribution of the current $i(z, t)$ in space and in time along the tower for the five mentioned models from observation at the height $z = 474\text{m}$. This current has a first peak of 1.8kA at the origin of time and a second 2.6kA at $5\mu\text{s}$. After that, it decreases. In other words, the lightning arrives very quickly at the considered height with a very high value That is mainly due to the waveform of the base channel current. By comparing these results with the experimental observation of lightning striking at the CN tower, we see a similarity in appearance (a first peak followed by a second peak, this one is chained afterwards with a decreasing trajectory). Concerning the distribution of the current along the lightning channel, the observation of the currents at a height $z' = 4000\text{m}$ on the considered 62,5m tower of Sao Paulo 's University leads us to say that for all the models (TL, MTLL and MTLE), all the currents along the lightning channel take a time delay of $46\mu\text{s}$ to peak at 1.2kA, 0.6kA, 0.5 kA respectively for TL, MTLL and MTLE models. These peaks are followed by a decreasing rate. The current in the channel for the TL model is above that of the other models. This is due to the high $P(z')$ value compared to that of the other models. We

also note that the current measured at the base of the tower differs from the currents propagating throughout the canal, this is due to the effects of reflections at the ends of the tower. By comparing these results with those relating to the measured smoothed current, the latter ones exhibit the same time delay mentioned above as the first ones.

Key words : Return Arc Lightning, Shadow Effect, Engineer Models, Elevated Structures, Elevated Tower, Descending Tracer, Connection Ascending Tracer.

INTRODUCTION

L'interaction de la foudre avec les structures élevées a été un sujet d'intérêt pour les chercheurs dans domaine de la foudre et des éclairs dans la dernière décennie. Les tours sont utilisées depuis des décennies pour enregistrer formes d'onde de courant de foudre.

Selon les modèles d'ingénieur, la distribution spatio-temporelle du courant dans le canal de foudre dépend des paramètres mesurés comme le courant à la base du canal, la vitesse de l'arc en retour et le champ électromagnétique.

L'évaluation des caractéristiques des courants de course de retour est fondamentale pour l'étude des surtensions de foudre sur les lignes de transmission et de distribution, pour la conception d'une protection de ligne adéquate. Lorsque la foudre frappe une structure surélevée, les courants mesurés présentent une distorsion due aux réflexions qui se produisent entre le canal et la structure ainsi que entre la structure et la mise à la terre.

Le courant mesuré est dit d'être contaminé par les réflexions apparus au sommet et en bas de la structure. On définit un courant non contaminé le courant mesuré au sommet de la tour frappée par la foudre si les coefficients de réflexion au sommet et à la base sont égaux à zéro.

Dans cet article, on va analyser en premier temps la distribution des courants tout au long de la tour CN de 553m. Un résultat d'expérience va être considéré. Pour cela, on va considérer les valeurs de coefficients de réflexion suivants : $\rho_t = -0,50$ et $\rho_g = 0,48$. En deuxième temps, la recherche est basée sur l'étude de la distribution des courants tout au long du canal de foudre sur la tour de l'Université de Sao Paulo (de 62,5m). Trois classiques modèles sont considérés (TL, MTLE, MTL). Les valeurs des paramètres utilisés sont : $h = 62,5\text{m}$; $Z_t = 275\Omega$; $R_g = 5\Omega$; $Z_{ch} = 1000\Omega$. On observe des différences entre les pics de valeurs calculés avec les différents modèles.

MATERIELS ET METHODES

Dans cet article, quelques modèles (TL, MTL et MTLE) ont été analysés pour expliquer la répartition du courant de foudre en présence d'un objet de grande hauteur [1], [3]. On a supposé que la vitesse de propagation des impulsions de courant le long de l'objet frappé est égale à la vitesse de la lumière, et les coefficients de réflexion du courant à ses extrémités (le haut et le bas, respectivement) sont des constantes (Fig. 1). Même les chercheurs de la référence [3] ont montré que certaines caractéristiques du champ rayonné pourraient être attribuées à ces réflexions. Le coefficient de réflexion inférieur ρ_g pour le courant dans la tour peut être exprimé en termes d'impédances caractéristiques de la tour Z_t et l'impédance du système de mise à la terre Z_g suivant l'équation (1).

$$\rho_g = \frac{Z_t - Z_g}{Z_t + Z_g} \quad (1)$$

Le coefficient de réflexion supérieur pour le courant dans la tour peut être exprimé en termes d'impédance caractéristique du tour Z_t et l'impédance équivalente du canal de course de retour de la foudre Z_{ch} selon l'équation (2).

$$\rho_t = \frac{Z_t - Z_{ch}}{Z_t + Z_{ch}} \quad (2)$$

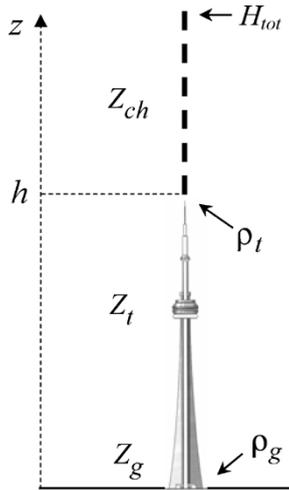


Figure 1 : Objet frappé et géométrie du canal

Nous utilisons le soi-disant courant «non perturbé» $i_0(h,t)$, défini comme le courant qui serait mesuré au sommet de la tour (point de fixation de la foudre) si les deux coefficients de réflexion ρ_t et ρ_g sont égaux à zéro. En terme de ce courant non perturbé, les expressions décrivant la distribution spatiale et temporelle du courant le

long de la tour et le long du canal, respectivement, adapté de Rachidi et al. [Rachidi, 2002],

pour $0 \leq z' \leq h$

$$i(z', t) = (1 - \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} [\rho_t^n \rho_g^n i_o(h, t - \frac{h-z'}{c} - \frac{2nh}{c}) + \rho_t^n \rho_g^n i_o(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c})] * u(t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c}) \quad (3)$$

pour $h < z' < H_{tot}$

$$i(z', t) = [P(z' - h) i_o(h, t - \frac{h-z'}{v^*}) - \rho_t i_o(h, t - \frac{z' - h}{c}) + (1 - \rho_t)(1 + \rho_t) \sum_{n=0}^{\infty} \rho_g^{n+1} \rho_t^n i_o(h, t - \frac{h+z'}{c} - \frac{2nh}{c})] * u(t - \frac{z'-h}{v}) \quad (4)$$

où z est la hauteur le long de l'objet frappé pour l'équation (3) et le long du canal pour l'équation (4), c la vitesse de la lumière, v la vitesse de course de retour, H_{tot} la hauteur totale à la fois du canal de foudre et de l'objet frappé surélevé, et $u(t)$ la fonction à pas d' Heaviside. v^* est la vitesse de l'onde de courant, $P(z')$ est une fonction d'atténuation dépendant du modèle, $u(t)$ est la fonction Heaviside à pas unité et n est un index représentant les multiples réflexions successives se produisant aux deux extrémités de l'objet frappé.

On rappelle les valeurs de $P(z')$ et v^* dans le tableau suivant.

Tableau 1 : Tableau de $P(z')$ et v^* pour les modèles de choc de retour différents

Modèle	$P(z')$	v^*
BG	1	∞
TCS	1	-c
TL	1	v
MTLL	$1 - \frac{z'}{H_{tot}}$	v
MTLE	$\text{Exp}(-\frac{z'}{\lambda})$	v

On a utilisé le logiciel Matlab pour simuler le travail.

RESULTATS

Simulation du courant tout au long de la tour CN

Courant de base du canal

Nous allons considérer la forme d'onde de courant de base de canal exprimée par la fonction double d'Heidler suivante :

$$i(0, t) = \frac{I_{01}}{\eta_1} \cdot \frac{\left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{11}}\right)^2} \cdot e^{-\frac{t}{\tau_{21}}} + \frac{I_{02}}{\eta_2} \frac{\left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^2}{1 + \left(\frac{t}{\tau_{12}}\right)^2} e^{-t/\tau_{22}} \quad (5)$$

Les paramètres de ce courant de base de canal sont récapitulés dans la Tableau 2 suivant.

Tableau 2 : Paramètres de courant de base de canal

	$I_{01}(\text{kA})$	$\tau_{11}(\mu\text{s})$	$\tau_{21}(\mu\text{s})$	η_1	$I_{02}(\text{kA})$	$\tau_{12}(\mu\text{s})$	$\tau_{22}(\mu\text{s})$	η_2
Courant de base	10,7	0,25	2,5	2	6,5	2	230	2

En tenant compte des valeurs dans le Tableau 1, la simulation de l'équation (5) nous donne la Figure 2

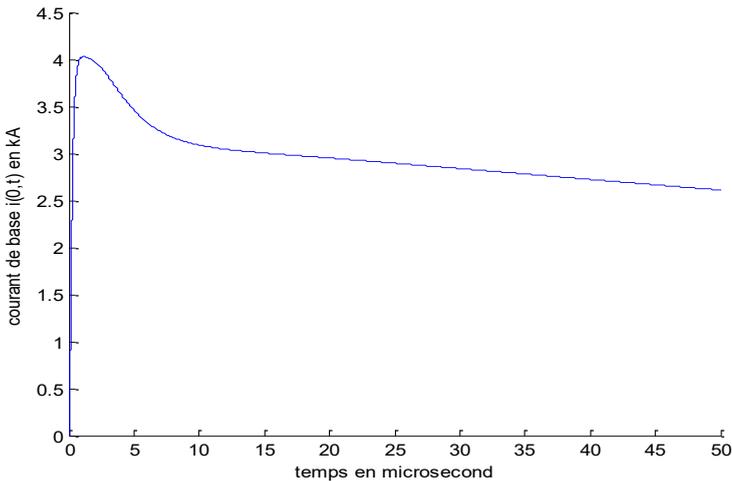


Figure 2 : Courant de base du canal $i(0,t)$

Distribution spatiale et temporelle du courant le long le canal de foudre

On va simuler le foudroiement de la tour CN de Canada de hauteur 553m. On va observer la répartition du courant dans l'espace et dans le temps tout au long de la tour à la hauteur $z = 474\text{m}$. Il est noté que à partir des mesures expérimentales faites à ce niveau, on a conclut que $\rho_t = -0,50$ et $\rho_g = 0,48$. On utilise le courant de base étudié précédemment. En considérant toutes ces valeurs dans la simulation de l'équation (3), on obtient la Figure 3.

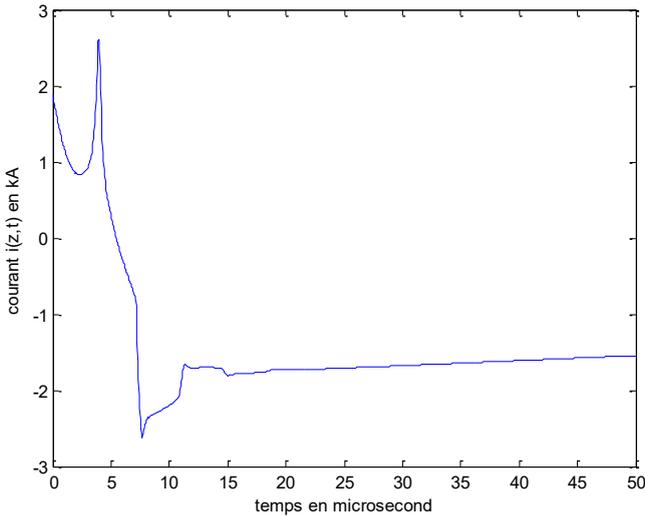


Figure 3 : La répartition du courant $i(z,t)$ dans l'espace et dans le temps le long de l'objet la tour à $z=474\text{m}$

Mesure expérimentale du courant sur la tour CN à la hauteur 474m

Le courant enregistré sur la tour CN à la hauteur 474m est montré par la Figure 4

Répartition du courant reparti le long du canal de foudre

Dans cette section, on va observer les courants à une hauteur $z' = 4000\text{m}$ pour différents types de modèles de choc de retour à savoir (modèles TL,MTLL,MTLE) en choisissant ici la tour de l'Université de Sao Paulo (de 62,5m).

Courant non contaminé $i_0(h, t)$

Il est noté que le courant non contaminé $i_0(h, t)$ est calculé à partir de l'équation (6), [Shigihara, 2007] et représenté par la Figure 5.

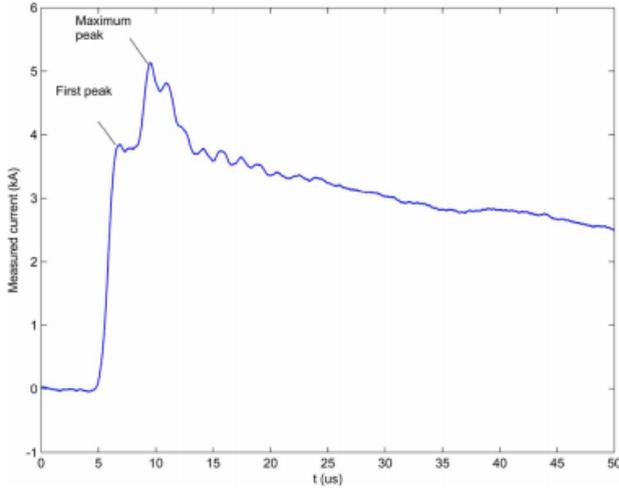


Figure 4 : Forme d’onde du courant sur la tour CN mesuré à 474m (enregistré en 19 Aout 2005 à l’heure universelle 17 : 55 : 56.9158450) [Pavanello, 2009]

$$\left\{ \begin{array}{l} i_0(h, t) = \frac{i(0, t)}{(1 - \rho_t)(1 + \rho_g)} \quad \text{pour } t \leq \frac{2h}{c} \\ i_0(h, t) = \frac{1}{(1 + \rho_g)} \left\{ \frac{i(0, t)}{(1 - \rho_t)} - \sum_{n=0}^N [(\rho_g^n \rho_t^n + \rho_g^{n+1} \rho_t^n)] i_o \left(h, t - \frac{2nh}{c} \right) \right\} \quad \text{pour } t > \frac{2h}{c} \end{array} \right. \quad (6)$$

Les valeurs des paramètres utilisés sont :

$$h=62,5\text{m} ; Z_t=275\Omega ; R_g=5\Omega ; Z_{ch}=1000\Omega$$

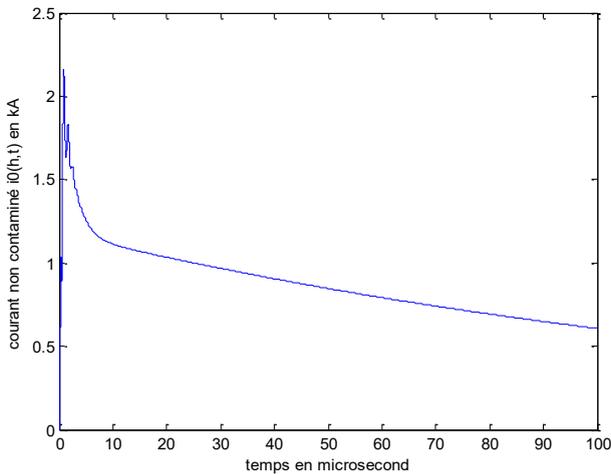


Figure 5 : Courant non contaminé $i_0(h, t)$

Ainsi, les paramètres de courant de base correspondant $i(0,t)$ sont récapitulés dans le Tableau 3 suivant.

Tableau 3 : Paramètres du courant de base correspondant $i(0,t)$

	$I_{01}(kA)$	$\tau_{11}(\mu S)$	$\tau_{21}(\mu S)$	η_1	$I_{02}(kA)$	$\tau_{12}(\mu S)$	$\tau_{22}(\mu S)$	η_2
Courant de base	0,9	0,3	2	0,578	1,25	0,3	150	2

Courants tout au long du canal relatifs aux modèles (TL,MTLL,MTLE)

On détermine les courants relatifs aux modèles (TL,MTLL,MTLE) en simulant l'équation (2) et en choisissant $\lambda=2000$; $H_{tot}=6000m$, $v=0,3c$. Ces courants ainsi que le courant à la base de la tour sont montrés par la Figure 6.

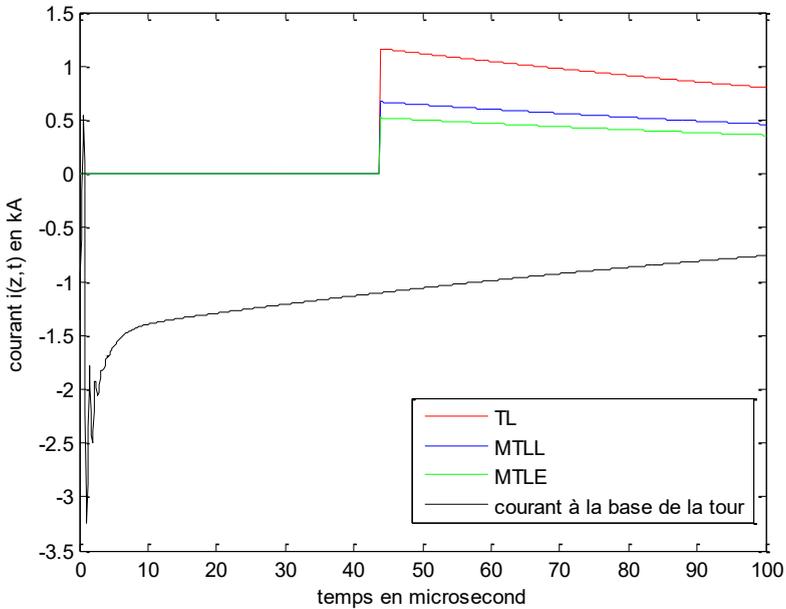


Figure 6 : Répartition des courants le long du canal de foudre à une hauteur $z'= 4000m$ pour la tour de 62,5m (TL en rouge, MTLL en bleu, MTLE en vert) et le courant à la base de la tour (en noir)

Résultats des courants dans le canal relatifs au courant mesuré lissé

Selon la mesure faite au niveau de la dite tour, le courant correspondant à la base est montré par la Figure 7. Etant donné que ce courant est bruité, on l'a filtré. Ainsi, le courant mesuré lissé est présenté sur la Figure 8. Des études ont été faites que les résultats de courants dans la canal pour les modèles (TL,MTTL,MTLE) relatifs au courant mesuré lissé sont présentés par la Figure 9 [Shigihara, 2007].

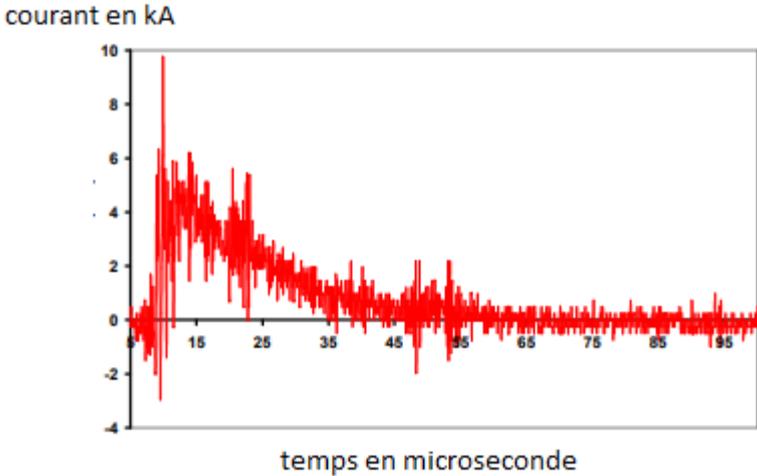


Figure 7 : Courant mesuré à base de tour de l’Université de Sao Paulo [Shigihara, 2007]

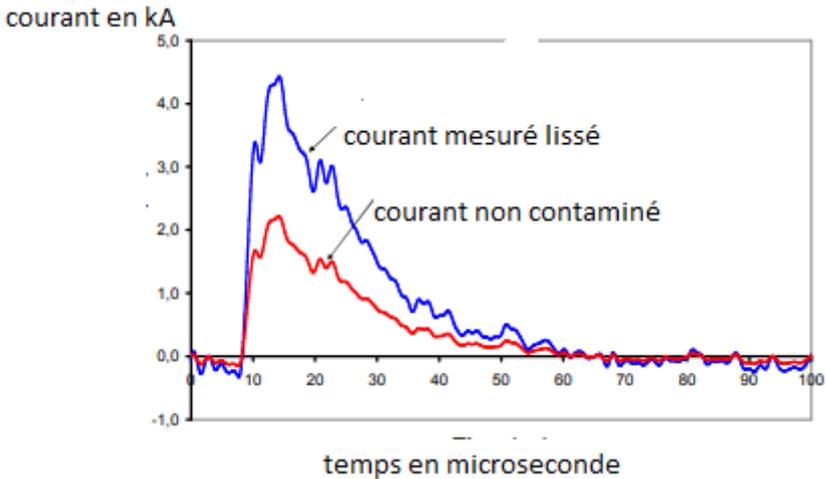


Figure 8 : Courant à la base mesuré lissé (en bleu) et le courant non contaminé (en rouge)

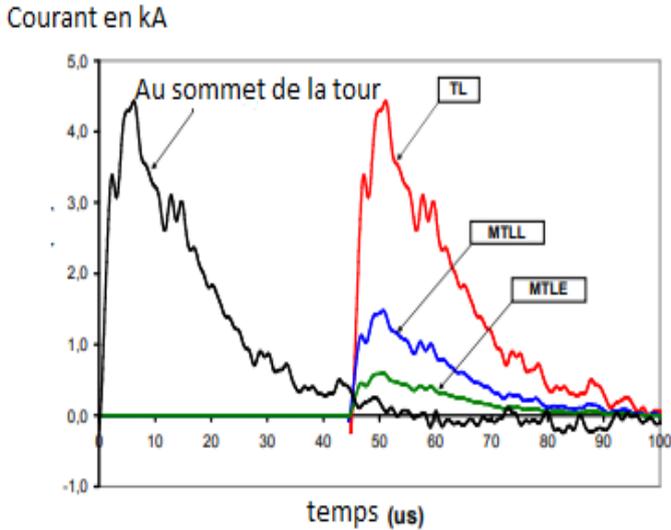


Figure 9 : Courant au sommet de la tour et courants à $z=4000\text{m}$ pour modèles (TL en rouge, MTLL en bleu et MTLE en vert) (correspondant au courant mesuré lissé, $v=0,3c$) [Shigihara, 2007]

DISCUSSIONS

Selon la Figure 2, le courant de base du canal atteint un pic de valeur environ 4kA à $1\mu\text{s}$ puis diminue tout en gardant une valeur positive.

D'après la Figure 3, le courant observé à 474m présente un premier pic de valeur $1,8\text{kA}$ à l'origine de temps et un deuxième $2,6\text{kA}$ à $5\mu\text{s}$. Après cela, il décroît. Cette allure est due surtout à la forme d'onde du courant de base de canal. En comparant ces résultats avec l'observation expérimentale de foudre frappant à la tour CN (Figure 4), on constate une ressemblance d'allure (un premier pic suivi d'un deuxième pic, celui-ci est enchainé à la suite avec une trajectoire décroissante).

Concernant la Figure 6, pour tous modèles (TL,MTLL,MTLE), tous les courants le long du canal de foudre mettent un retard de temps $46\mu\text{s}$ pour prendre un pic de valeur $1,2\text{kA}$, $0,6\text{kA}$, $0,5\text{kA}$ respectivement pour modèles TL, MTLL et MTLE. Ces pics sont suivis d'une allure décroissante. On remarque que le courant du modèle TL se trouve au dessus de celui des deux autres modèles, en fait, cela est causée par sa valeur de $P(z')$ élevée par rapport à celle des autres modèles. On constate aussi que le courant mesuré à la base de la tour se diffère des courants propageant tout au long du canal, cela est du aux effets des réflexions aux extrémités de la tour. En comparant ces résultats avec ceux relatifs au courant mesuré lissé montrés sur la Figure 9, ces derniers présentent le même retard de temps mentionné précédemment que les premiers. Pourtant, Il existe une différence à propos des valeurs de pic pour les modèles TL et MTLL dont les détails sont expliqués par le Tableau 4 suivant.

Tableau 4 : Comparaison des courants calculés pour modèles (TL, MTLL, MTLE) avec les les résultats relatifs au courant mesuré lissé

Modèle	Pic des courants calculés (en kA)	Pic des courants relatifs au courant mesuré lissé (en kA)
TL	1,2	4 ,2
MTLL	0,6	1,2
MTLE	0 ,5	0,5

CONCLUSION

Le travail effectué présente la modélisation de la foudre qui frappe une tour de grande hauteur. On a choisi le courant de base de fonction d’Heidler et déterminé la répartition du courant de foudre tout au long de la tour et du canal en choisissant les trois modèles d’ingenierie à savoir (TL,MTLL,MTLE). On a pu voir la différence significative parmi les amplitudes de courant calculés pour chaque modèle ainsi que l’influence de la tour sur les courants de la foudre.On a comparé les résultats avec les recherches déjà faites par les autres. On a constaté que la recherche effectuée aboutit bien aux résultats attendus.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) [Pavanello et *al.*, 2009] D. Pavanello, Farhad Rachidi, Janischewskyj, Marcos Rubinstein, Volodymyr O. Shostak, Carlo Alberto Nucci, Kenneth L. Cummins, Ali M. Hussein, and Jen-Shih Chang et *al.*, 2009. On the Current Peak Estimates Provided by Lightning Detection Networks for Lightning Return Strokes to Tall Towers. IEEE TRANSACTIONS ON ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY, VOL. 51, NO. 3, AUGUST 2009
- 3) [Rachidi, 1992] Rachidi F, M. Ianoz, C. A. Nucci, and C.Mazzetti, 1992 “Modified transmission line model for LEMP calculations. Effect of the return stroke velocity decreasing and elevated strike object on close fields,”presented at the 9th Int. Conf. Atmospheric Electricity, St. Petersburg, Russia, Jun.15–19.
- 4) [Rachidi, 2002] Rachidi F., V. A. Rakov, C. A. Nucci, and J. L. Bermudez, 2002 “The effect of vertically-extended strike object on the distribution of current along the lightning channel,”J. Geophys.Res.,vol.107,p.4699.
- 5) [Shigihara,2007] Shigihara, Alexandre Piantini, Jorge Mieczyslaw Janiszewski, 2007. Analysis of the current distribution along the lightning channel based on a current waveform recorded at the bottom of an elevated structure. IX International Symposium on
- 6) Lightning Protection 26th -30th November 2007 – Foz do Iguaçu, Brazil.

- 7) [Shostak, 2000] Shostak V., W. Janischewskyj, A. Hussein, and B. Kordi, 2000. "Electromagnetic fields of lightning strikes to a tall tower : a model that accounts for upward-connecting discharges", presented at the 25th Int. Conf. Lightning Protection, R hodes, Greece, Sep.18–20.
- 8) [Thpttappillil, 1993] Thottappillil R. and M. A. Uman, 1993. "Comparison of lightning return stroke models", J. Geophys. Res.,vol.98, pp.22903–22914.
- 9) [Willet, 1989] Willett J. C., J. C. Bailey, V. P. Idone, A. Eybert Gerard, and L. Barret, 1989. "Submicrosecond intercomparison of radiation fields and currents in triggered lightning return strokes based on the transmission-linemodel", J. Geophys. Res., vol. 94, pp. 13275–13286.

CONTROLE DE LA QUALITE DE RENDEMENT D'UN SYSTEME PHOTOVOLTAIQUE AVEC STOCKAGE CONNECTE AU RESEAU

par

ZOARITSIHOARANA Fitiavana Avo⁽¹⁾, RAMANANTSIHOARANA Harisoa⁽²⁾,
HERINANTENAINA Edmond Fils⁽³⁾

(1) Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation (EDSTII), Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

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

(3) Laboratoire Systèmes et Dispositifs Electronique (EDSTII), Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

La production électrique n'arrive pas à répondre aux besoins et le phénomène de délestage est fréquent dans plusieurs grandes villes de Madagascar. Cette étude se penche sur la question «Comment intégrer et exploiter efficacement de petites unités distribuées de production d'électricité d'origine renouvelable pour renforcer un réseau de distribution en état de surcharge ?». L'intégration des installations photovoltaïque (PV) au réseau de distribution est une solution prometteuse. Néanmoins il faut résoudre les problèmes techniques comme les variations des puissances générées par les installations PV. Les auto-producteurs doivent aussi s'assurer de la qualité de la puissance injectée, et respecter les normes spécifiées pour le réseau. Ce travail présente l'étude et l'implémentation matérielle de techniques de contrôle pour assurer la qualité de puissance et la rentabilité d'une installation PV avec stockage connectée au réseau. Au niveau de l'onduleur un filtre adaptatif assure la synchronisation de la tension de sortie du système PV et la tension du réseau. Ceci pour maintenir la phase, l'amplitude et la fréquence à la qualité de puissance souhaitée. La méthode de comptage par Coulomb est proposée pour le contrôle l'état de charges des batteries. La simulation du système PV a été effectuée avec les outils Simpower et Simulink de MATLAB. Une bonne compensation des harmoniques et de la puissance réactive du système a été constatée.

Mots-clés : Comptage par coulomb, Contrôle répétitif, Filtre adaptatif, Onduleur PV, Système PV connecté.

ABSTRACT

Electricity generation is insufficient, and the unloading phenomenon is common in several major cities in Madagascar. This study examines the question "How can

small distributed units of renewable electricity generation be effectively integrated and operated to strengthen an overloaded distribution network?". Grid connected PV system is a promising solution. However, technical problems such as changes in the power generated by the PV system must be solved. Self-producers must also ensure the quality of the power injected, and meet the specified standards for the network. This work presents the study and hardware implementation of control techniques to ensure the power quality and profitability of a grid connected PV system. An adaptative filter implemented in the inverter ensures synchronization of the PV system's output voltage and network voltage. This is to maintain the phase, magnitude and frequency at the desired power quality. The open circuit method and the Coulomb count control the SOC of the batteries. The simulation of the PV system, was carried out with the Simpower and Simulink tools of MATLAB. Good compensation of harmonics and reactive power was found.

Key words : Coulomb count, Repetitive control, Adaptative filter, Inverter PV, PV system.

INTRODUCTION

Les systèmes photovoltaïques peuvent fonctionner en tant que systèmes autonomes. Ils peuvent être utilisés pour les maisons et les entreprises dans les zones urbaines. Dans ce cas, toute énergie excessive produite peut être injectée dans le réseau électrique. Et vice versa l'électricité peut être importée lorsqu'il n'y a pas assez d'irradiation solaire. Les règles relatives à la connexion au réseau varient d'un pays à l'autre. Pour le cas de Madagascar, les règlements techniques de raccordement, de planification et d'exploitation sont présentés dans le code de réseau de distribution électrique de l'ORE (ORE, Mars 2020).

La configuration classique d'une installation photovoltaïque comporte une étape d'approvisionnement en énergie représenté par les panneaux photovoltaïques. Un onduleur est utilisé pour convertir et adapter l'énergie accumulée dans un élément de stockage intermédiaire comme la batterie, pour être conforme aux exigences de tension et de qualité d'alimentation du réseau électrique. La mauvaise qualité d'alimentation peut être au niveau de la continuité de la puissance, les variations de l'amplitude et de la fréquence, les régimes transitoires non stables, les harmoniques de la forme d'onde, facteur de puissance faible, déséquilibre des phases.

Ces mauvaises qualités sont le résultat d'une infrastructure partagée dans les réseaux électriques. Pour les sources de production d'énergie renouvelable le problème majeur de la qualité d'alimentation est dû aux harmoniques dans la tension délivrée par les onduleurs. (Guerrero J., 2006) (Iyer S. V., 2010) (R, 2002). Les sources d'harmoniques peuvent provenir des onduleurs à cause de la modulation des impulsions et de la commutation, ou des charges. La majorité des charges sont

aujourd'hui non linéaires et génèrent des courants harmoniques lorsqu'une alimentation en tension purement sinusoïdale est fournie. Ces courants harmoniques provoquent alors des composants harmoniques dans la tension en raison des impédances dans le réseau de distribution et, aussi, à l'intérieur des sources de tension. Bien sûr, les tensions harmoniques provoquent également des courants harmoniques.

En électronique de puissance, la solution est d'introduire des boucles de contrôles pour réduire le taux de distorsion d'harmoniques des onduleurs. Le principe est faire un suivi avec une référence sinusoïdale tout en rejetant d'autres composants harmoniques. Les contrôleurs d'hystérésis en sont des exemples (Blaabjerg F., 2006). Notre étude s'est intéressée sur la théorie du contrôle répétitif qui est considérée comme une méthode simple de contrôle de l'apprentissage pour éliminer les erreurs périodiques sur la base du principe du modèle interne (Francis, 1975) (Hara, 1988) (Weiss, 1997). Le modèle proposé consiste en une boucle de rétroaction positive en cascade avec un filtre pour améliorer la stabilité. Par ailleurs, nous proposons aussi dans cet article un aperçu de la technique du Comptage par Coulomb pour la vérification de l'état des charges des batteries.

MATERIELS ET METHODES

Une installation photovoltaïque (PV) est composée de panneaux PV, d'un système de stockage de charge, d'un convertisseur, d'un onduleur, d'un réseau de distribution et d'un système de contrôle comme le montre la Figure 1.

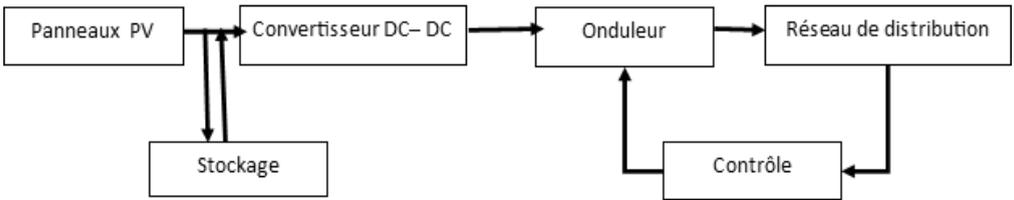


Figure 1 : Installation PV avec stockage connectée au réseau

Nous proposons des solutions techniques liées au système de contrôle de l'onduleur et pour assurer que l'état de charge des batteries assure la continuité de fonctionnement du système en cas d'intermittence de l'irradiation solaire.

Mécanisme de dégradation de la tension de sortie de l'onduleur

La Figure 2 présente le schéma équivalent du modèle de la tension de sortie issue de l'onduleur.

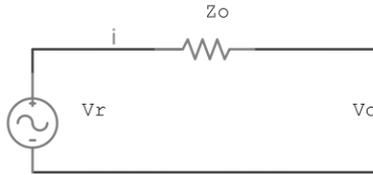


Figure 2 : Schéma équivalent du modèle de la tension de sortie de l'onduleur

La tension de sortie aux bornes du condensateur est représentée par l'équation (1):

$$V_o = V_r - Z_o(s).i \quad (1)$$

Où V_r est la tension de référence, Z_o est l'impédance et i le courant dans l'inductance.

En général, les harmoniques de courant dans l'expression de i sont dû par les charges non-linéaires et la modulation de largeur d'amplitude de l'onduleur. Ce phénomène génère la dégradation de la tension aux bornes de Z_o . Il faut alors au niveau de V_r créer des harmoniques de tension correspondant aux distorsions dans la tension aux bornes de Z_o . Et pour cela il faut maintenir le niveau de tension V_r stable et sans harmoniques et que la valeur de Z_o soit petite dans la gamme de fréquence des harmoniques de courant des composants.

Description du système

En considérant le structure d'un système triphasé, comme présenté à la Figure 3, on adopte le modèle de contrôle au niveau de chaque phase. Le système est composé de trois contrôleurs de puissance en cascade qui génèrent la tension référence V_r et des contrôleurs de courant qui génèrent le signal PWM de commande des interrupteurs de l'onduleur. Ces contrôleurs sont de type proportionnel. Le PLL est utilisé pour capter les phases de la tension du réseau, ainsi la tension V_r issue des contrôleurs de puissance sont assurées fonctionnées à la même fréquence que la puissance réactive P et active Q du réseau, suivant les références de courant du réseau : I_d et I_q .

Principe de contrôle par filtre adaptatif

Suivant le principe de Francis and Wonham, 1975, il faut inclure un modèle de référence dans la boucle de retour pour rejeter les distorsions. Pour des signaux périodiques, on ajoute une paire de pôles conjugués imaginaires à la phase ω du signal, comme présenté par la Figure 4.

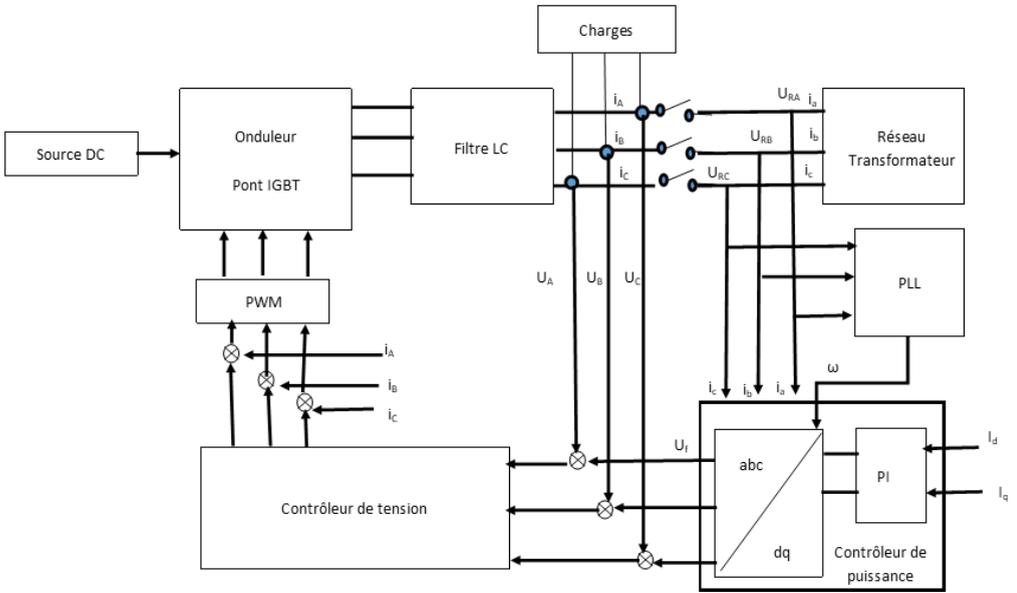


Figure 3 : Diagramme de bloc du système de contrôle pour une installation triphasée

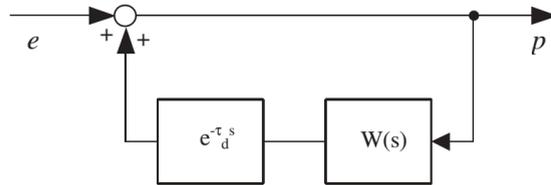


Figure 4 : Représentation d'état du modèle de référence du filtre

Modèles mathématiques

Nous allons considérer pour la suite de l'étude l'implémentation de la technique pour une seule phase. Le circuit équivalent est représenté par la Figure 5.

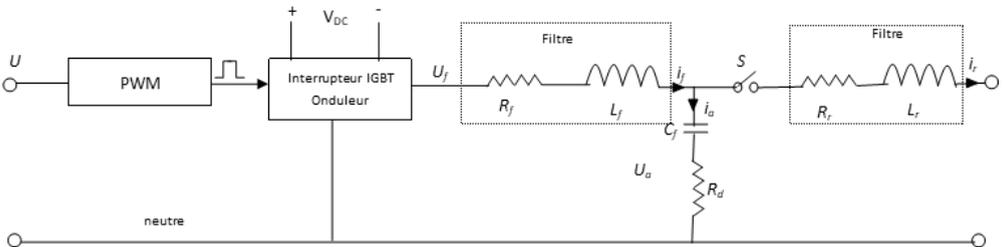


Figure 5 : Circuit équivalent du contrôle par filtrage adaptative en monophasé

Le système est composé d'un pont IGBT de l'onduleur, d'un filtre passe-bas et du filtre servant d'interface au réseau. L'interrupteur S permet la synchronisation. Elle est supposée à l'état fermé. Le bloc PWM avec la commande IGBT de l'onduleur peut être modélisé en utilisant une valeur moyenne de la tension telle que :

$$U_f = U \tag{2}$$

Le diagramme de la représentation dans l'espace d'état du système est présenté à la Figure 6, en se basant sur la représentation de l'espace d'état du modèle de référence du filtre de la Figure 3.

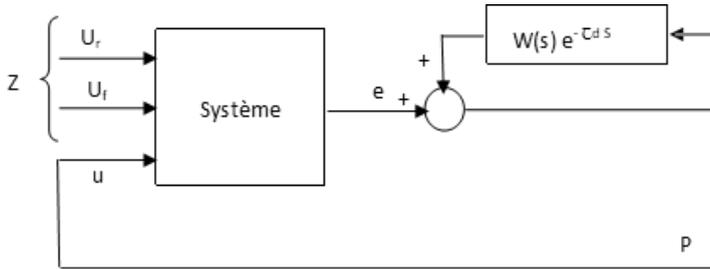


Figure 6 : Représentation d'état du système contrôlé

Pour le système, on considère :

$$x = [i_f \quad i_r \quad u_a]^T \tag{3}$$

$$z = [u_r \quad u_f]^T \tag{4}$$

$$e = C_1 x + D_1 z + D_2 u \tag{5}$$

L'équation de transfert du système S est représentée par l'équation 6.

$$S = [D_1 \quad D_2] + C_1 (sI - A)^{-1} [B_1 \quad B_2] \tag{6}$$

Dans l'équation 6 :

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{R_f+R_d}{L_f} & \frac{R_d}{L_f} & -\frac{1}{L_f} \\ \frac{R_d}{L_r} & -\frac{R_r+R_d}{L_r} & \frac{1}{L_r} \\ \frac{1}{C_f} & -\frac{1}{C_f} & 0 \end{bmatrix} \tag{7}$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ -\frac{1}{L_r} & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, \quad B_2 = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_f} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \tag{8,9}$$

$$C_1 = [-R_d \quad R_d \quad 1] \quad (10)$$

$$D_1 = [0 \quad 1], D_2 = 0 \quad (11)$$

En partant du principe présenté par la Figure 4, le modèle du filtre adaptatif consiste en un filtre passe-bas en cascade avec un délai $e^{-t_d} S$. Ce filtre est capable de générer un signal de période t_d .

$$W(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (12)$$

La fréquence de référence ω issue du PLL peut être utilisé comme valeur de ω_c . Et pour maintenir la performance du contrôle, la valeur de ω_c peut varier en fonction de la variation de la fréquence du réseau f telle que :

$$\omega_c = \frac{1}{t_d(1-t_d f)} \quad (13)$$

Etat de charge des batteries

La méthode de comptage par coulomb mesure et intègre le courant de décharge de la batterie dans un intervalle de temps afin d'estimer le SOC de la batterie. L'estimation du SOC de la batterie par la méthode de comptage par Coulomb est exprimée par l'équation 14.

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_n} \int_0^t I dt \quad (14)$$

SOC_0 représente la charge initiale, C_n la capacité nominale de la batterie et I le courant de la batterie.

La méthode de comptage par Coulomb modifiée utilise un courant corrigé pour améliorer la précision de l'estimation. L'expression du courant corrigé est donnée en fonction du courant de décharge par la relation quadratique :

$$I_c(t) = K_2 I(t)^2 + K_1 I(t) + K_0 \quad (15)$$

où K_0 , K_1 , K_2 sont des constantes à déterminer par des tests expérimentaux. L'estimation avec une précision supérieure du SOC de la batterie par la méthode de comptage de Coulomb modifiée, est donnée par l'équation 16.

$$SOC = SOC_0 - \frac{1}{C_n} \int_0^t I_c dt \quad (16)$$

RESULTATS

Pour la simulation, les paramètres de l'onduleur sont donnés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Paramètres de l'onduleur

Paramètre	Valeur	Paramètre	Valeur
L_f	150 μ	L_r	450 μ H
R_f	0.045 Ω	R_r	0.135 Ω
C_f	22 μ F	R_d	1 Ω
I_d	2A	I_q	0

Analyse temporelle du système connecté au réseau

En premier lieu nous avons effectué l'analyse temporelle du système avec différentes valeurs de charge. Ceci pour prouver le comportement du système à l'état stable. Trois séries de simulation ont été effectuées, tout d'abord avec des charges résistives équilibrées pour les trois phases d'une valeur de 12 Ω . Ensuite avec des charges non linéaires composées d'une inductance $L=150\mu$ H, d'un condensateur $C=1000\mu$ F et d'une résistance $R=20\Omega$.

En utilisant la bibliothèque hinfsyn de Matlab, les réponses suivantes ont été observées.

Réponses temporelles pour des charges résistives de 12 Ω , à l'état stable

La Figure 7 (a) représente la réponse en tension aux bornes de la charge u_A et la tension de référence u_f . La Figure 7 (b) représente l'état du courant du réseau i_a et la référence i_f .

D'après la Figure 7 (a), on constate que la tension u_A aux bornes de la charge résistive est maintenue suivant la tension de référence issue du contrôleur, tandis qu'on constate de petites distorsions au niveau de la tension du réseau i_a .

Réponses temporelles pour des charges non linéaires, à l'état stable

Avec des charges non linéaires composées d'une inductance $L=150\mu$ H, d'un condensateur $C=1000\mu$ F et d'une résistance $R=20\Omega$, la Figure 8 (a) représente la réponse en tension aux bornes de la charge u_A et la tension de référence u_f . La figure 8 (b) représente l'état du courant du réseau i_A et la référence i_f .

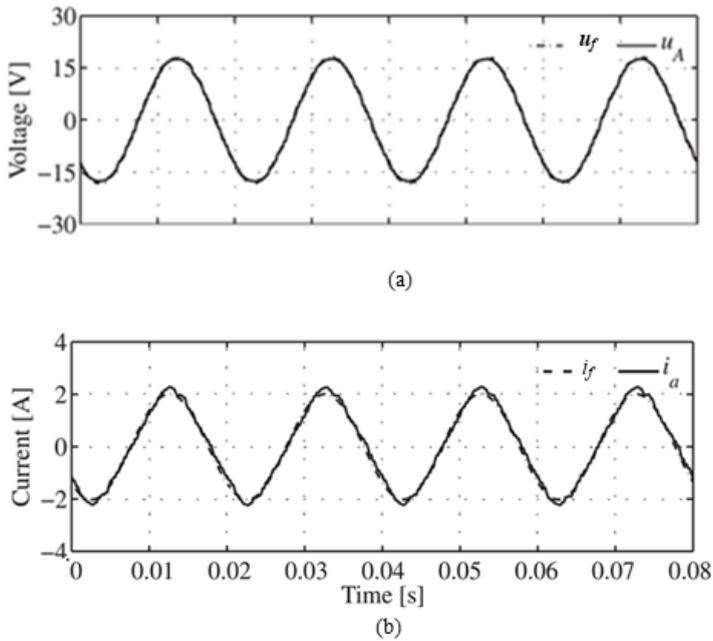


Figure 7 : (a) Tension aux bornes de la charge u_A et la tension de référence u_f ;
 (b) Courant du réseau i_a et la référence de courant i_f , avec des charges purement résistives

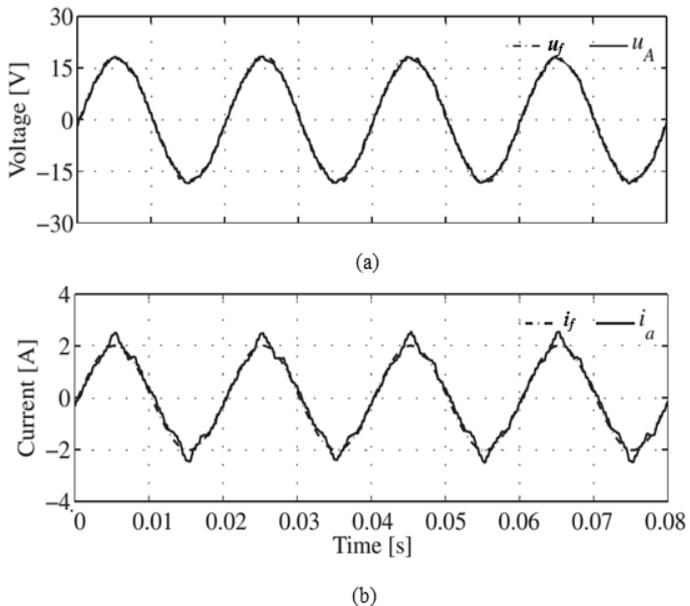


Figure 8 : (a) Tension aux bornes de la charge u_A et la tension de référence u_f ;
 (b) Courant du réseau i_a et la référence de courant i_f , avec des charges non linéaires

D'après la Figure 8 (a), on constate à nouveau pour des charges non linéaires que la tension u_A aux bornes de la charge résistive est maintenue suivant la tension de référence issue du contrôleur. Néanmoins les distorsions au niveau de la tension du réseau u_a sont assez significatives.

Analyse paramétrique du système en fonction de la variation du courant I_d du réseau

Sans les charges, l'analyse temporelle a été effectuée pour une variation de I_d de 2A à 3A. La Figure 9 (a) représente la réponse en tension aux bornes de la charge u_A et la tension de référence u_f . La Figure 9 (b) représente l'état du courant du réseau i_a et la référence i_f .

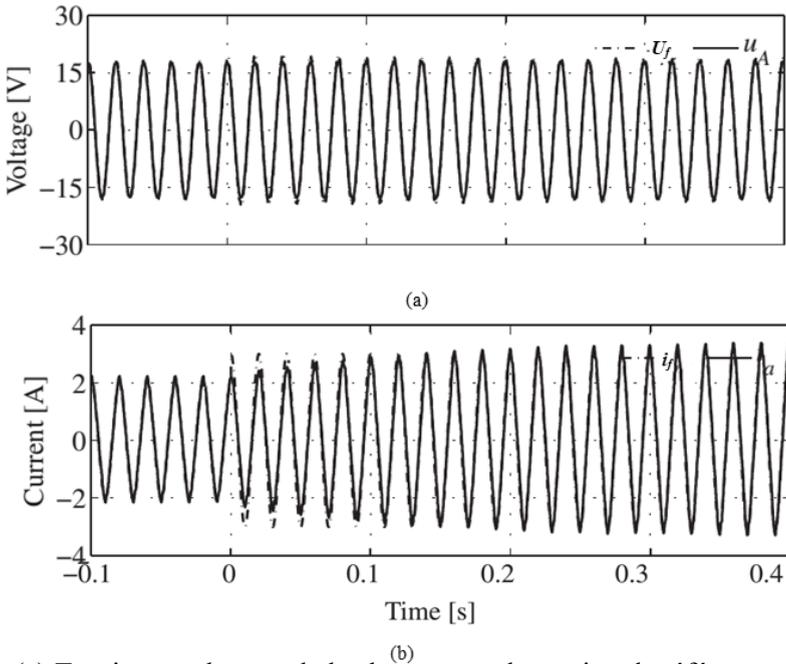


Figure 9 : (a) Tension aux bornes de la charge u_A et la tension de référence u_f ;
 (b) Courant du réseau i_a et la référence de courant i_f , pour I_d variant de 2A à 3A

Analyse fréquentielle du système en fonction de la variation de la fréquence du courant du réseau

Pour vérifier le comportement de l'onduleur contrôlé avec la technique présentée, trois séries d'analyses fréquentielles ont été effectués. La Figure 10 présente les tensions u_f et u_A pour la fréquence du réseau à 50 Hz (Figure 10 (a)), à 49,90 Hz (Figure 10(b)) et à 50,10Hz (Figure 10(b)). Les courbes de droites représentent les réponses sans le contrôle, et celles de droite avec le contrôle activé.

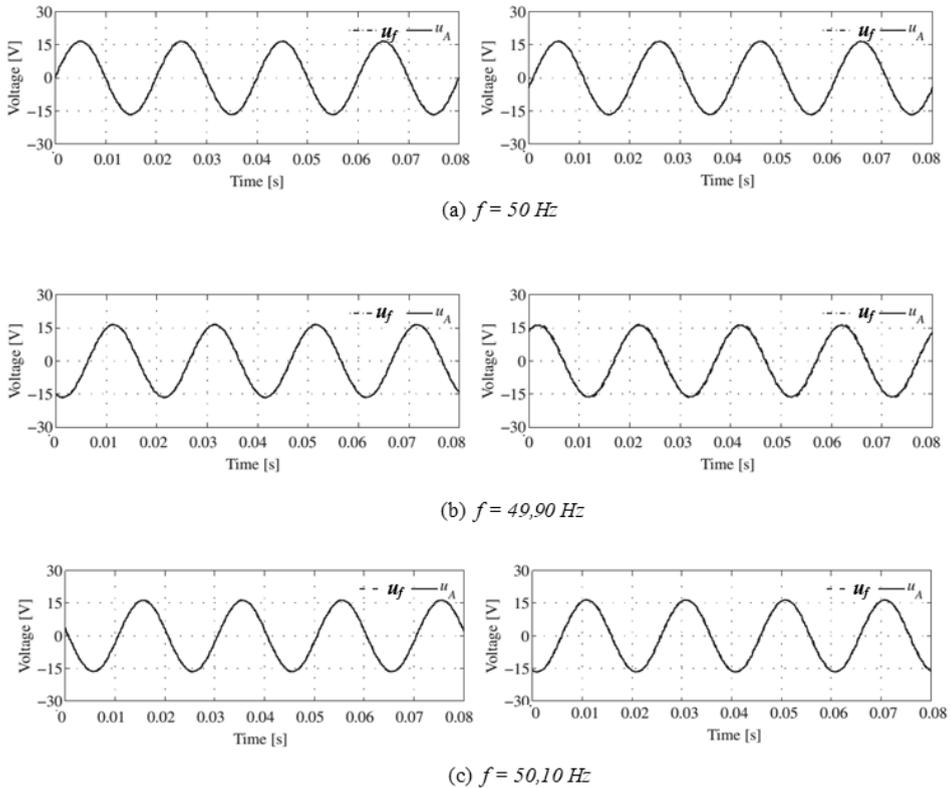


Figure 10 : (a) Tension aux bornes de la charge u_A et la tension de référence u_f , pour $f= 50\text{Hz}$, (b) pour $f= 49,90\text{Hz}$, (c) pour $f= 50,10\text{Hz}$

Lorsque le réseau fonctionne à la fréquence 50Hz, la fréquence est identique à la valeur nominale, les résultats sont comparables avec ou sans le contrôle. Pour la fréquence du réseau à 49,90Hz, on constate un déphasage entre la tension de sortie u_A et la référence u_f . Comme le contrôleur est réglé sur la fréquence du réseau à 50,00 Hz, la tension u_A générée est en avance de phase par rapport la tension de référence lorsque la fréquence du réseau est inférieure à 50,00 Hz. Tandis qu'elle est en retard de phase par rapport à la tension de référence lorsque la fréquence du réseau était supérieure à 50,00 Hz.

DISCUSSIONS

Le travail effectué sur l'analyse temporelle a été nécessaire afin de vérifier le comportement à l'état stable. On a constaté que la tension de référence issue du contrôleur a permis de maintenir une qualité de charge résistive optimale. Les analyses fréquentielles ont permis par ailleurs de vérifier le comportement de l'onduleur.

Les travaux effectués sont pour l'instant au niveau de simulation et il est important de dire que l'accès à un aspect pratique est envisagé pour vérifier les

résultats d'études. La comparaison avec d'autres méthodes existantes a permis de voir les failles et les avantages et d'ainsi améliorer les projets d'avenir.

CONCLUSION

Les résultats obtenus à partir des simulations ont montrées que la qualité de la tension du système est bien contrôlée et même présente de meilleures caractéristiques que celle issue du réseau. Néanmoins la qualité de l'alimentation du réseau est bien meilleure en présence de charges non linéaires.

Les techniques de contrôle étudiées ici permettent la possibilité d'une implémentation matérielle assez simple et à moindre coût tout en assurant la qualité de rendement du système PV connecté.

REFERENCES BIBIOGRAPHIQUES

- 1) Blaabjerg F, T. R. (2006). Overview of control and grid synchronization for distributed power generation systems. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*.
- 2) Francis, W. (1975). The internal model principle for linear multivariable regulators. *Applied Mathematics*.
- 3) Guerrero J, B. N. (2006). Droop control method for the parallel operation of online uninterruptible power systems using resistive output impedance. *Proceedings of the 21st IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition*.
- 4) Hara, Y., (1988). Repetitive control system: A new type servo system for periodic exogenous signals. *IEEE Transactions on Automatic Control*.
- 5) Iyer SV, B. M. (2010). A generalized computational method to determine stability of a multi-inverter microgrid. *IEEE Transactions on Power Electronics*.
- 6) Lasseter. (2002). Microgrids. *Proceedings of IEEE Power Engineering Society Winter Meeting*.
- 7) ORE. (Mars 2020). Code de Réseau de Distribution d'énergie électrique à Madagascar.
- 8) Weiss. (1997). Repetitive control systems: Old and new ideas. *Systems and Control in the Twenty-first Century*, vol 22.

LE DEFICIT EN EAU DANS LE GRAND SUD DE MADAGASCAR

par

RAMANAKOTO Toky N⁽¹⁾, MANJEHISOA Samurah M.⁽¹⁾,
RAMAMINIAINA Ormilla R.⁽¹⁾

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

RESUME

L'eau est vitale. Sa pénurie reste le grand enjeu majeur du siècle. Ce problème affecte le Grand Sud de Madagascar. L'objectif de cette étude est d'analyser le déficit en eau dans cette zone par approche hydrométéorologie. L'exploitation de la courbe ombrothermique, accompagné du bilan hydrique et le modèle de prédiction SARIMA ont permis d'atteindre l'objectif fixé. L'ombrothermique identifie les mois déficitaires de l'année. La Réserve Utile et l'Indice d'Aridité permettent de chiffrer l'ampleur et le modèle SARIMA est utilisé pour l'estimation de l'évolution du déficit pour les années 2015-2029. Les données utilisées sont les températures et les précipitations du période 1985-2014 (mesurées sur une station synoptique) et complétées par les données satellitaires. La zone d'étude se subdivise en deux zones climatiques : le Sud-Ouest (les régions Atsimo Andrefana, Androy, les districts de Betroka et Amboasary Sud) et l'Est (la région Atsimo Atsinanana, et Tolagnaro). Le Sud-Ouest subit un déficit en eau du mois d'Avril au Novembre, et sa vulnérabilité s'intensifie entre Mai et Septembre surtout à Betroka et Bekily. Les indices d'aridité vont de 0.4 à -0.32 et la majorité des Réserves Utiles est inférieure à 50mm. La zone Est n'est pas exposée au déficit, la totalité de la zone enregistre une indice aridité plus de 0,5 et des stocks plus de 50mm. La projection montre des dégradations de situation car la période déficitaire peut s'étaler du mois de Février jusqu'au Décembre dans la Sud-Ouest et seules Befotaka et Tolagnaro ne seront pas touchés par le déficit dans l'Est.

Mots-clés : Hydrométéorologie, Indice d'Aridité, Ombrothermique, Réserve Utile, SARIMA.

ABSTRACT

Water is vital. Water shortage is one of the major issue for centuries. This issue affects the Great South of Madagascar. The goal of this study is to analyze the water deficit in this area by a hydrometeorological approach. The ombrothermal curve, accompanied by the water balance and the SARIMA prediction model made it possible to reach the primary objective. The ombrothermal unit identifies the deficit months of

the year. The Useful Reserve and Aridity Index makes it possible to quantify the scale and the SARIMA model is used to estimate the evolution of the deficit for the years 2015-2029. The data used are the temperatures and precipitation for the period 1985-2014 and supplemented by satellite data. The study area is divided into two climatic zones: the South-West (the Atsimo Andrefana, Androy regions, the districts of Betroka and Amboasary South) and the East (the Atsimo Atsinanana region, and Tolagnaro). South-West is affected by a water deficit from April to November, and its vulnerability intensifies between May and September, especially in Betroka and Bekily. The aridity index is 0.4 to -0.32 and the majority of the Useful Reserves is less than 50mm. The East zone is not exposed to a deficit, the majority of the zone has an aridity index of more than 0.5 and water stocks of more than 50mm. The projection shows deterioration of the situation because the deficit period can last from February to December in the South-West and the Est zone will also be affected except Befotaka and Tolagnaro.

Key words Hydrometeorology, Aridity Index, Ombrothermal, Useful Reserve, SARIMA.

INTRODUCTION

L'eau est vitale. Sa pénurie reste l'enjeu majeur du siècle dans le monde entier, y compris à Madagascar. Ce problème affecte le Grand Sud du pays et risque d'empirer. Malgré plusieurs études et projets (Charmoille, 2016), (FAD, 2001), concernant les travaux d'adduction d'eau potable, qui ont été réalisés, cette pénurie est régulièrement présente et se manifeste par la sécheresse et la famine régulière dans la localité (Randriatsitohaina et *al.*, 2019), (USAID, 2016). Le Grand Sud de Madagascar est composé de quatre (04) régions : la région d'Atsimo Atsinanana, Atsimo Andrefana, Androy et Anosy. Il a une superficie de 13 0147Km² et a une population de 3 719 375 habitants. Le manque d'eau dans cette zone est à l'origine de plusieurs phénomènes dont les principaux ont trait à la météorologie, l'hydrologie, la géographie et mais aussi la géologiques.

Ainsi, l'objectif de cette étude est l'analyse du déficit en eau par hydrométéorologie. L'approche adoptée est le couplage de quatre techniques qui sont l'analyse du bilan hydrique et l'indice d'aridité, l'élaboration de la courbe ombrothermique et la modèle de prédiction SARIMA.

METHODOLOGIES

Les données utilisées proviennent des trois stations synoptiques couvrant l'ensemble de la zone d'étude et sont localisées dans la zone Toliara, Taolagnaro et Farafangana. Elles portent sur les températures mensuelles et la pluviométrie mensuelle de 1985-2014 (30ans).

Pré-Traitement

Cette étape consiste, en premier lieu, à combler les lacunes au niveau des données par l'utilisation du MAPROM. Ensuite, pour sa fiabilité et exploitabilité, elles sont testées avec le test de validation de Kolmogoro-Smirnov. Ce dernier est un test d'adéquation qui ne dépend pas de la nature et du paramètre qui caractérisent la loi de probabilité. Elle est appropriée pour des données dont la taille (n) est supérieure à 30.

$(X_n, n \in N^*)$ et $(Y_n, n \in N^*)$ sont deux suites de variables aléatoires réelles indépendantes de loi inconnue. Soit F (respectivement G) la fonction de répartition de X_1 (respectivement Y_1), puis F et G des fonctions continues.

On suppose $F = G$ si et seulement si les deux variables présentées dorénavant notamment X_1 et Y_1 sont issues de la même loi. Cette condition est entre autres posée comme hypothèse nulle ou H_0 . Le contraire, autrement dit $F \neq G$, est considéré comme hypothèse alternative ou H_1 .

On dispose une réalisation de l'échantillon $(X_i, 1 \leq i \leq n_1)$ de taille n_1 et de l'échantillon $(Y_i, 1 \leq i \leq n_2)$ de taille n_2 ou leurs fonctions de répartition empiriques sont les suivantes :

$$F_{n_1}(x) = \frac{1}{n_1} \sum_{i=1}^{n_1} \mathbf{1}_{(X_i \leq x)} \quad (2.1)$$

$$G_{n_2}(x) = \frac{1}{n_2} \sum_{i=1}^{n_2} \mathbf{1}_{(Y_i \leq x)} \quad (2.2)$$

La statistique du test calculée avec les observations est :

$$\zeta_{n_1, n_2} = \sqrt{\frac{n_1 n_2}{n_1 + n_2}} \sup_{x \in R} |F_{n_1}(x) - G_{n_2}(x)| \quad (2.3)$$

$$p_valeur = P(W \geq \zeta_{n_1, n_2}) \quad (2.4)$$

La crédibilité des données est en fonction des p -valeurs obtenues, c'est-à-dire il est accepté dans le cas où la p -valeur est supérieure à 0.5.

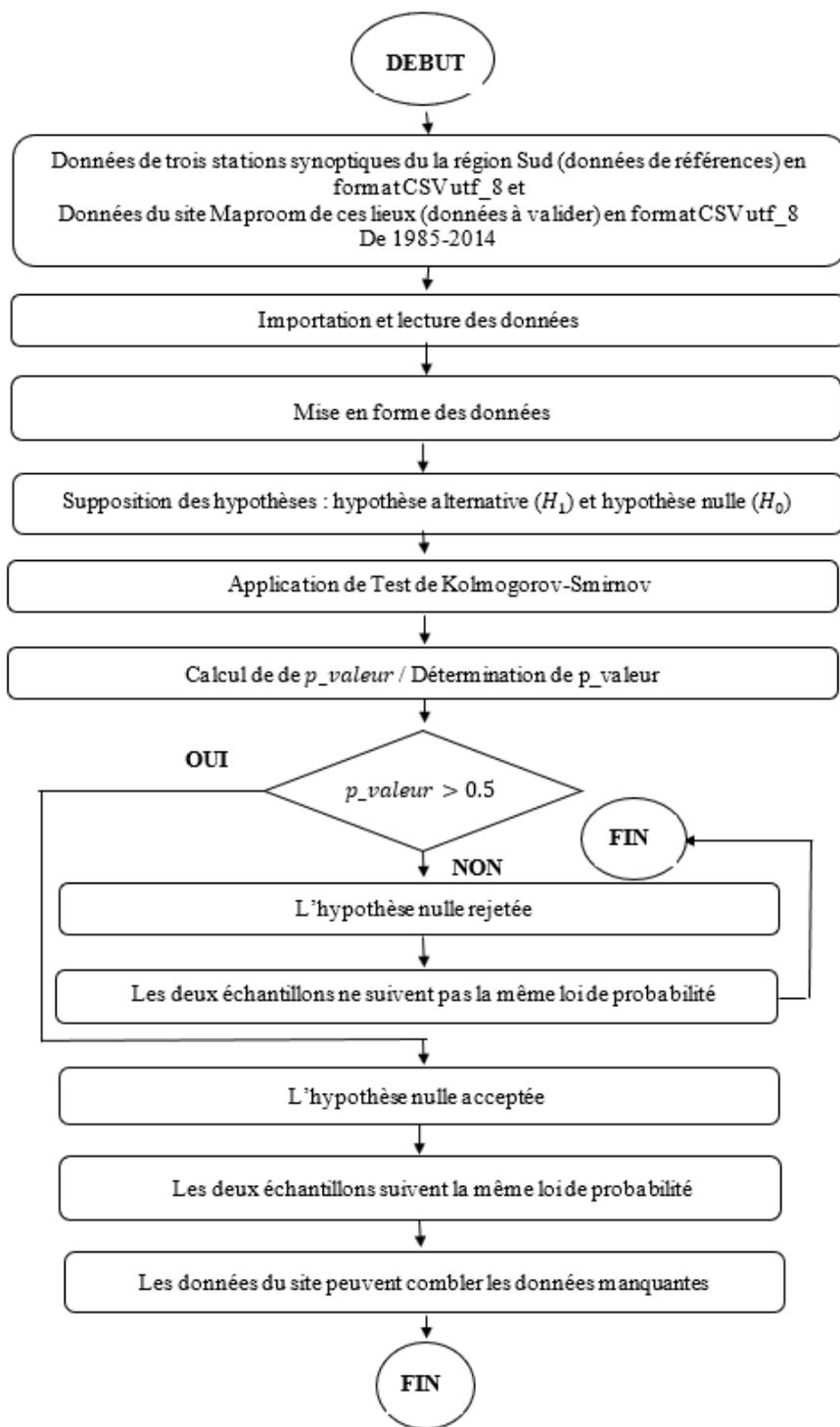


Figure 1 : Organigramme du pré-traitement des données

Bilan hydrique et indice d'aridité

• Le bilan hydrique est un calcul complexe qui conduit à quantifier la quantité d'eau disponible dans le sol pour une période.

$$P = ETR + R \pm \Delta S \quad (2.5)$$

P : Pluviométrie de la période considérée (mm)

ETR : Evapotranspiration réelle (mm)

R : Ruissellement (mm)

ΔS : Variation de stocks (mm)

Thornthwaite a proposé une méthode simplifiée pour élaborer le bilan hydrique à l'échelle mensuelle (Thornthwaite et *al.*, 1939).

Avec

$$ETP_m = f(m, \varphi) * ETP_{ncm} \quad (2.6)$$

- ETP_m : Evapotranspiration potentielle du mois m (en mm)
- φ : Latitude de la station
- ETP_{ncm} : Evapotranspiration non corrigée du mois m (en mm)

$$ETP_{ncm} = 16 \left[\frac{10 T_m}{I} \right]^a \quad \text{si } T_m < \text{à } 26,5^\circ\text{C} \quad (2.7)$$

T_m : Température moyenne du mois m ($^\circ\text{C}$)

I : Indice thermique annuelle

i_m : Indice thermique mensuelle du mois m

Si $26,5^\circ\text{C} \leq T_m \leq 38^\circ\text{C}$, l' ETP_{ncm} est obtenue directement par la table de valeur (Bonet et *al.*, 1970)

- $f(m, \varphi)$: Facteur correctif en fonction de la latitude de station et du mois. (Bonet et *al.*, 1970).

$$\text{Si } ETP < P, \quad ETR = ETP \quad (2.8)$$

$$\text{Si } ETP > P, \quad ETR = P + \min(RU, P - ETP) \quad (2.9)$$

$$\text{ou } ETR = P + \Delta S \quad (2.10)$$

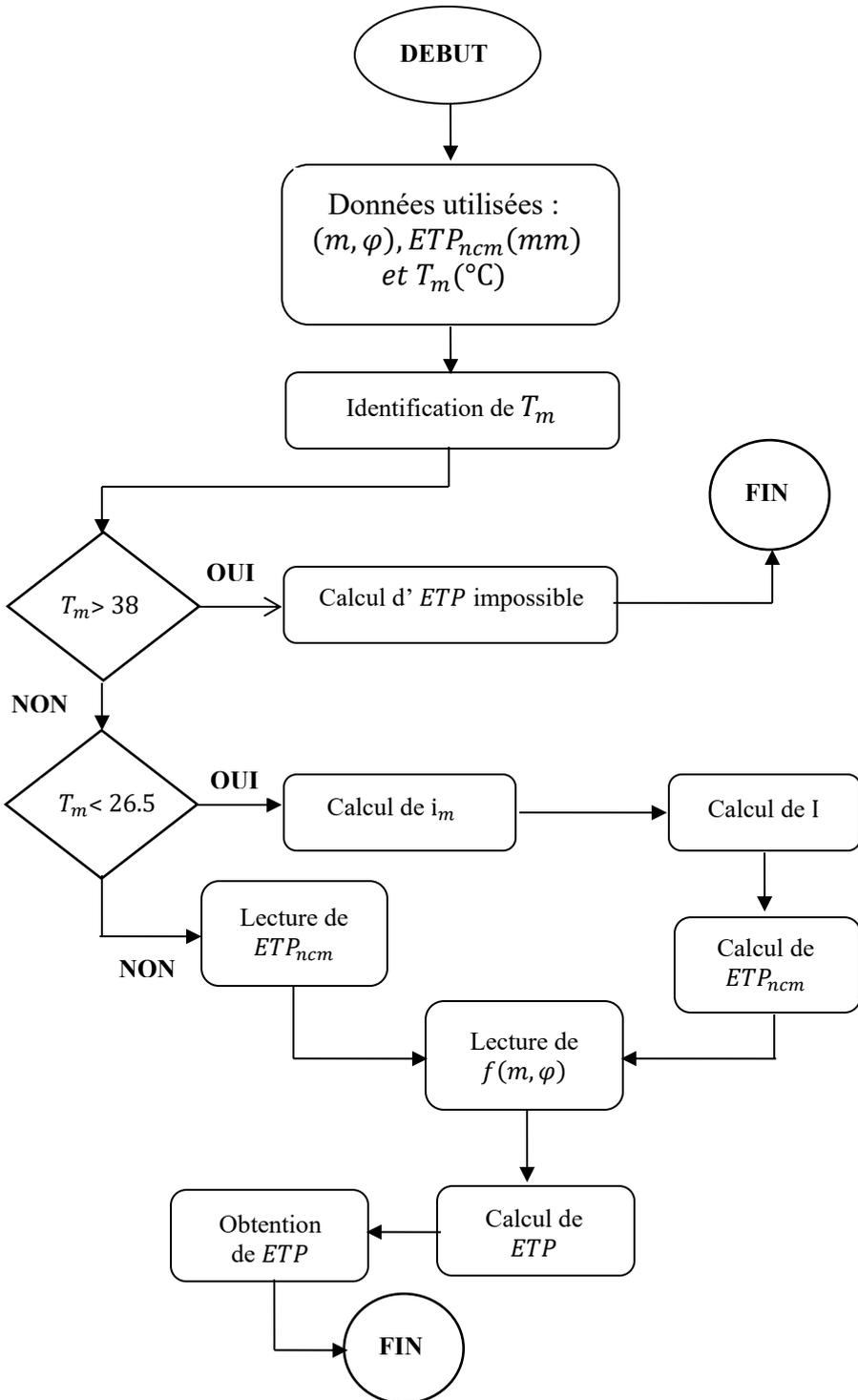


Figure 2 : Organigramme de calcul d'ETP

La Réserve Utile (RU) est la quantité d'eau du sol utilisable par la culture et peut être divisée en 2 parties : le RFU (Réserve facilement utilisable) ou confort hydrique, qui renferme le 2/3 du RU, et la RDU (Réserve difficilement utilisable) qui engendre du stress hydrique.

$$\Delta S = \min(RU, P - ETP) \quad (2.11)$$

Elle peut également être définie par l'expression :

$$\Delta S = RU_{(t)} - RU_{(t-1)} \quad (2.12)$$

Ainsi on a choisi un indicateur basé sur les termes du bilan pour pouvoir analyser le déficit hydrique. Cet indice, qui est l'indice d'aridité *IA*, compare la disponibilité en eau à la demande évaporative de l'atmosphère via des valeurs d'évapotranspiration réelles et potentielles. L'indice d'aridité permet de chiffrer la vulnérabilité de ce phénomène.

Indice d'aridité hydrologique

$$IA = \frac{ETR}{ETP} \quad (2.13)$$

IA : Indice d'aridité hydrologique

ETR : Evapotranspiration réelle (en mm)

ETP : Evapotranspiration potentielle (en mm)

Diagramme ombrothermique

Le diagramme ombrothermique développé par Giessen et Bagnouls est une courbe de superposition des précipitations et températures dont l'échelle est de $RR \text{ (mm)} = 2TTT \text{ (}^\circ\text{C)}$. Il permet de mettre en évidence les périodes de manque d'eau.

Le manque d'eau est présent si le graphe des précipitations est au-dessous de celui des températures.

$$RRR_m \text{ moyenne} = \frac{\sum_{i=1985}^{2014} RRR_{mi}}{n} \quad (2.14)$$

$$TTT_m \text{ moyenne} = \frac{\sum_{i=1985}^{2014} TTT_{mi}}{n} \quad (2.15)$$

avec

RRR : Précipitations en [mm] *i* : Année (1985 au 2014)

TTT : Températures en [°C]

m : Mois (de Janvier au Décembre)

n : Nombre d'années, c'est-à-dire $n=(2014-1985)+1$

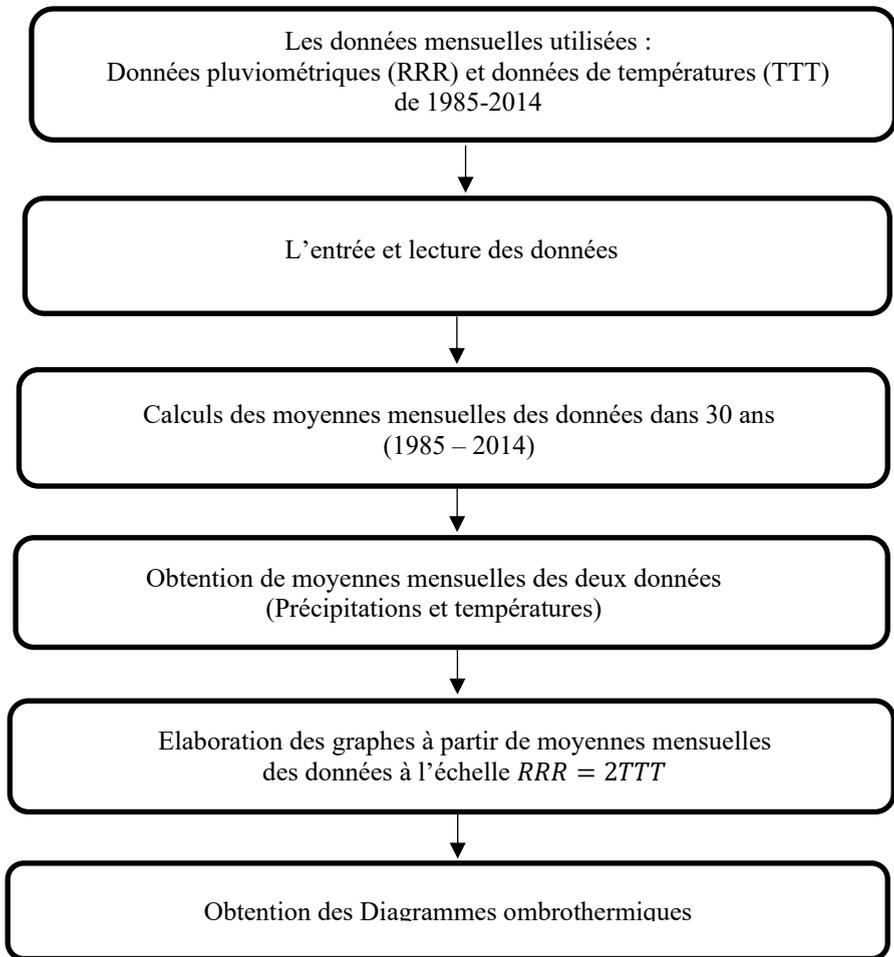


Figure 03 : Elaboration d'un diagramme Ombrothermiques

Analyse temporelle

L'analyse temporelle suit le processus modèle de prédiction. Une série X_t suit un processus SARIMA (Seasonal AutoRegressive Integrated Moving Average) d'ordre $(p, d, q) * (P, D, Q)_s$ si cette série a une saisonnalité de période s et qu'on peut écrire :

$$\Phi_1(B) \Phi_2(B^s)(1 - B)^d(1 - B^s)^D X_t = \Theta_1(B) \Theta_2(B^s) a_t \quad (2.16)$$

Où Φ_1 est un polynôme de degré p , Φ_2 est de degré P , Θ_1 est de degré D et Θ_2 est de degré Q .

Le choix définitif du modèle s'opère entre les modèles potentiels retenus via des critères d'information basés sur l'information de Kullback, par exemple les critères d'Akaike (AIC) et de Schwartz (BIC) et/ou des critères basés sur les pouvoirs prédictifs.

$$AIC(p, q) = \log \hat{\sigma}^2 + 2 \frac{p+q}{T} \quad (2.17)$$

$$BIC(p, q) = \log \hat{\sigma}^2 + [p + q] \frac{\log T}{T} \quad (2.18)$$

Une fois ce choix s'effectue, le modèle retenu est utilisé à des fins de prévisions (Holt C. C., 1957).

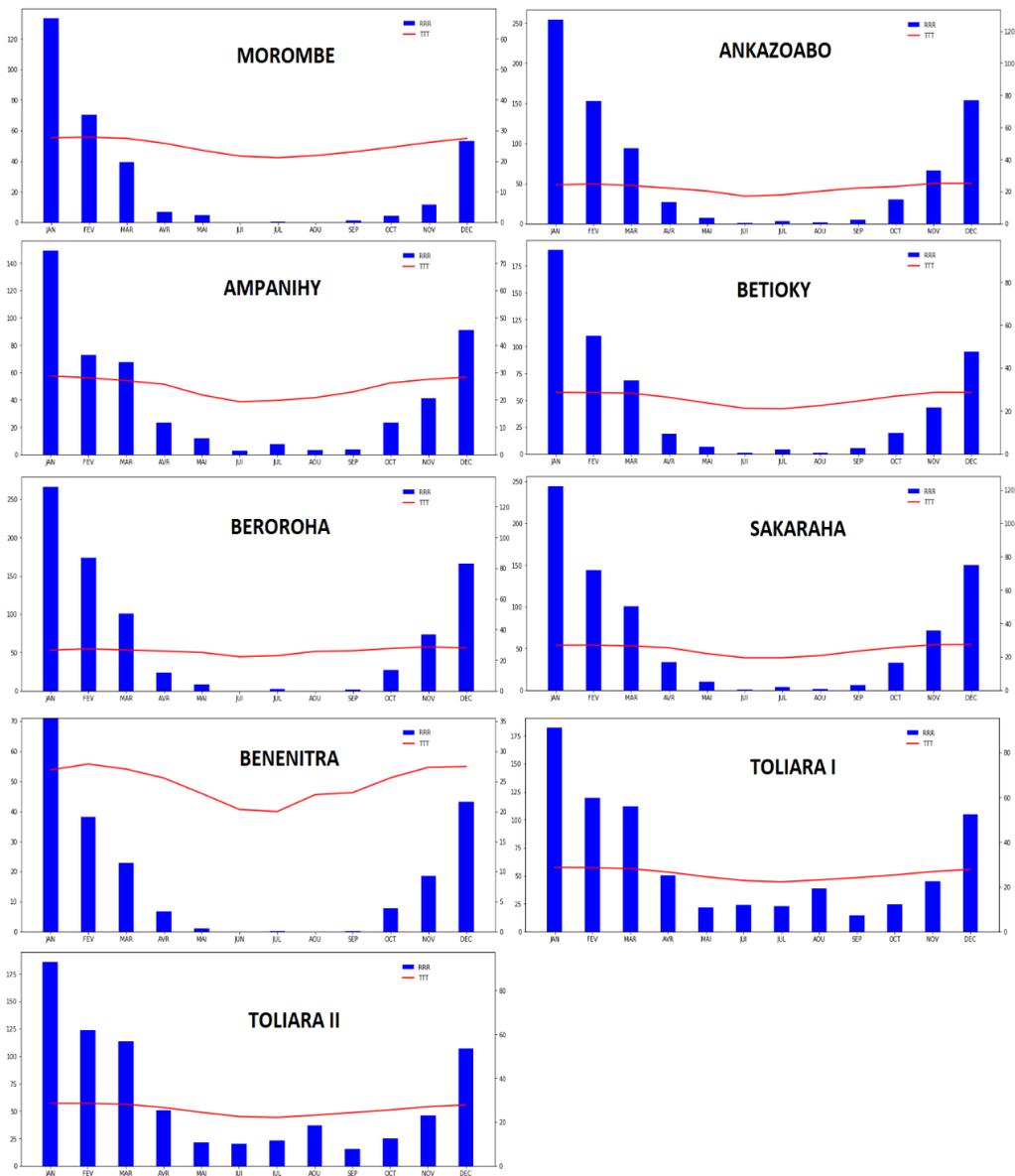
RESULTATS

Cartographie des paramètres hydrométéorologiques

Du mois d'avril au septembre, la pénurie d'eau touche le Sud et l'Ouest de la zone d'étude et cela s'aggrave jusqu'au mois de novembre. C'est le cas de Bekily (Figure 04, 05 et 06).

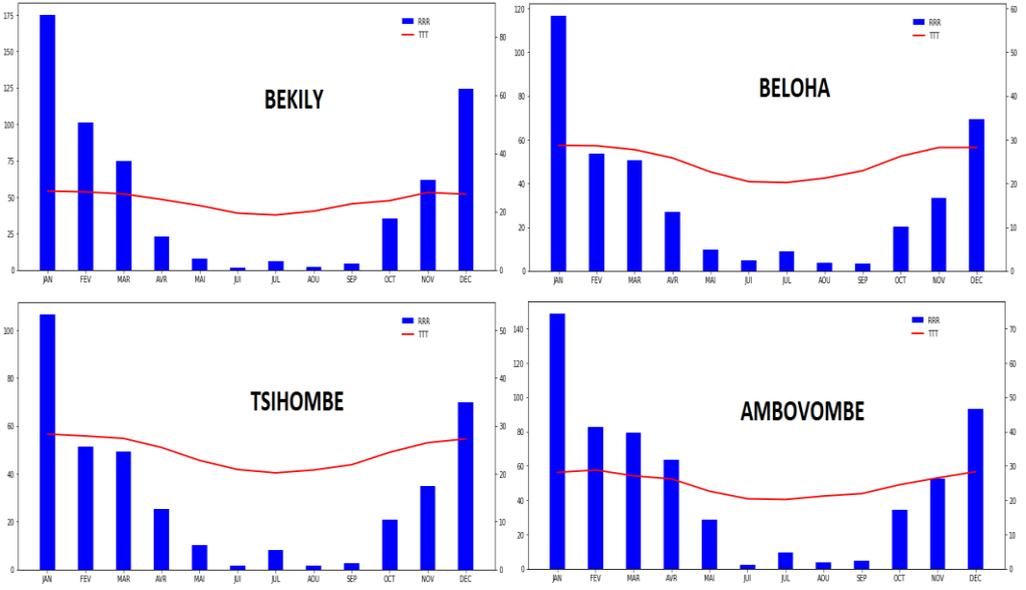
La valeur des RU moyenne croit de Janvier (valeur maximale=77,01mm) à Novembre (valeur minimale = 16,98mm). Une augmentation brusque de 28,13mm se manifeste en Décembre. Cette variation est clairement visible sur les cartes présentées (Figure 08). Dans le Sud de Madagascar, un grand décalage de l'effet du déficit en eau est constaté car, de février en décembre, une progression nette d'assèchement est trop visible de l'Ouest vers le Sud de notre site, par contre l'Est est toujours sous humidité durant toute l'année car elle demeure avec une RU presque élevée par rapport aux autres régions.

La majorité de la superficie du Sud de Madagascar présente une IA faible, entre autres la plupart des districts ont des réserves inférieures à 50 [mm]. Mais d'autre part, certains districts ont une IA élevée et des réserves supérieures à 50 [mm]. De ce fait, le territoire représente deux grandes zones différentes (Figure 09).



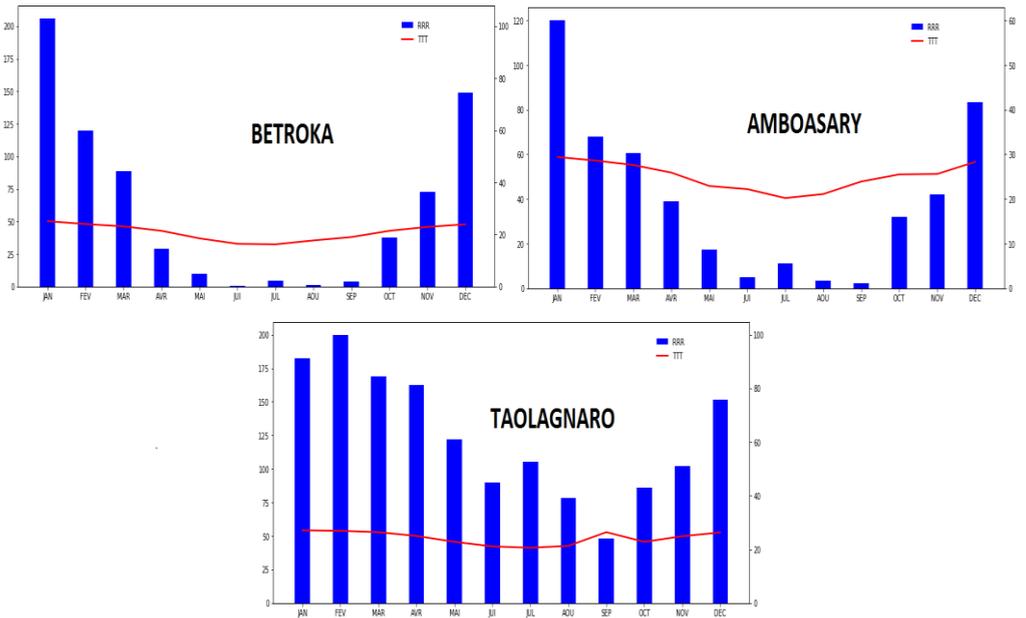
Source : Auteur, 2020

Figure 4 : Les diagrammes ombrothermiques des districts de la région Atsimo-Andrefana (1985-2014)



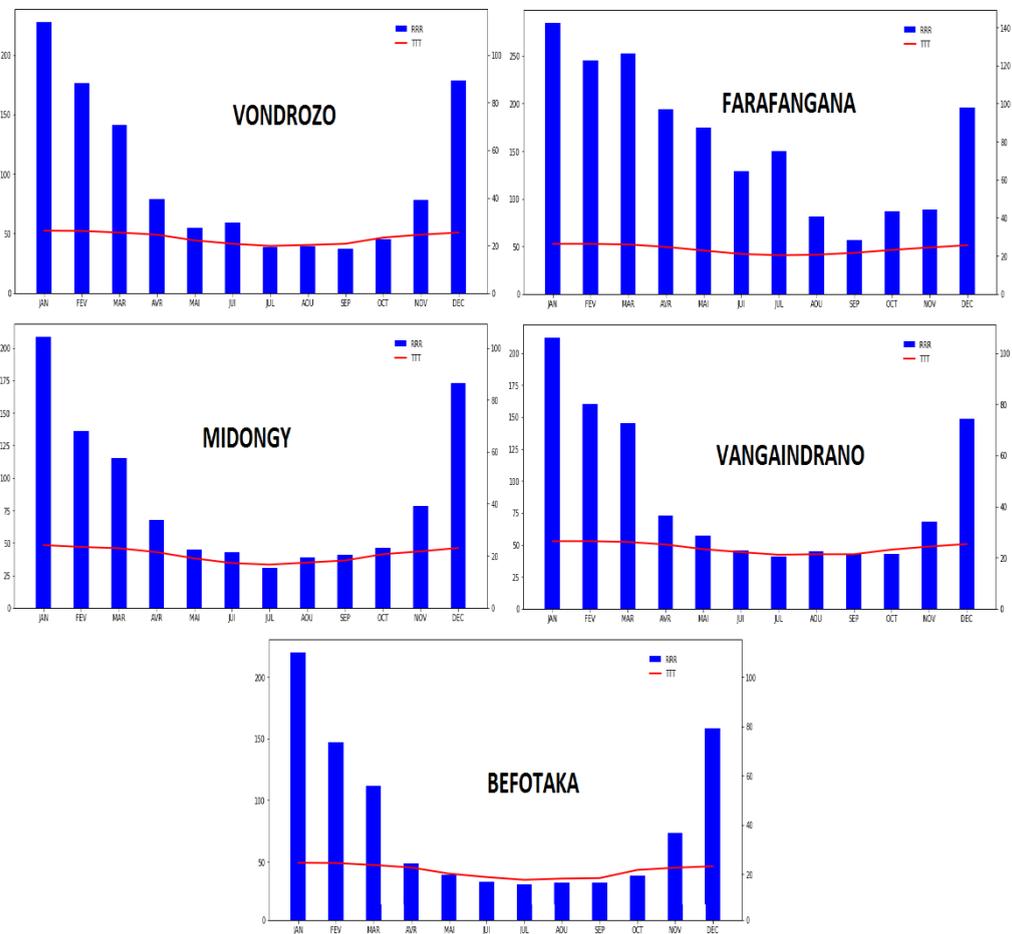
Source : Auteur, 2020

Figure 5 : Les diagrammes ombrothermiques des districts de la région Androy (1985-2014)



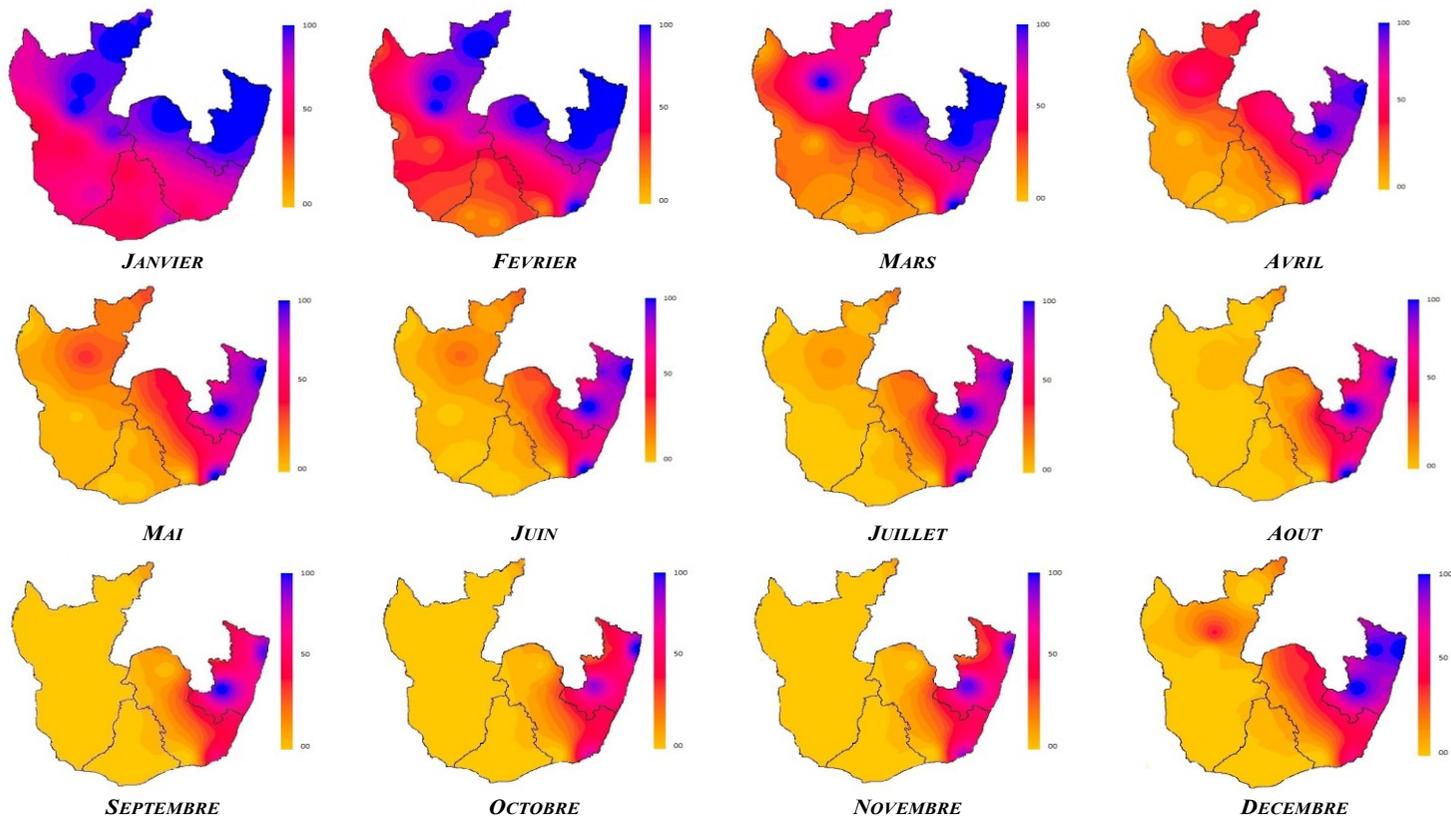
Source : Auteur, 2020

Figure 6 : Les diagrammes ombrothermiques des districts de la région Anosy (1985-2014)



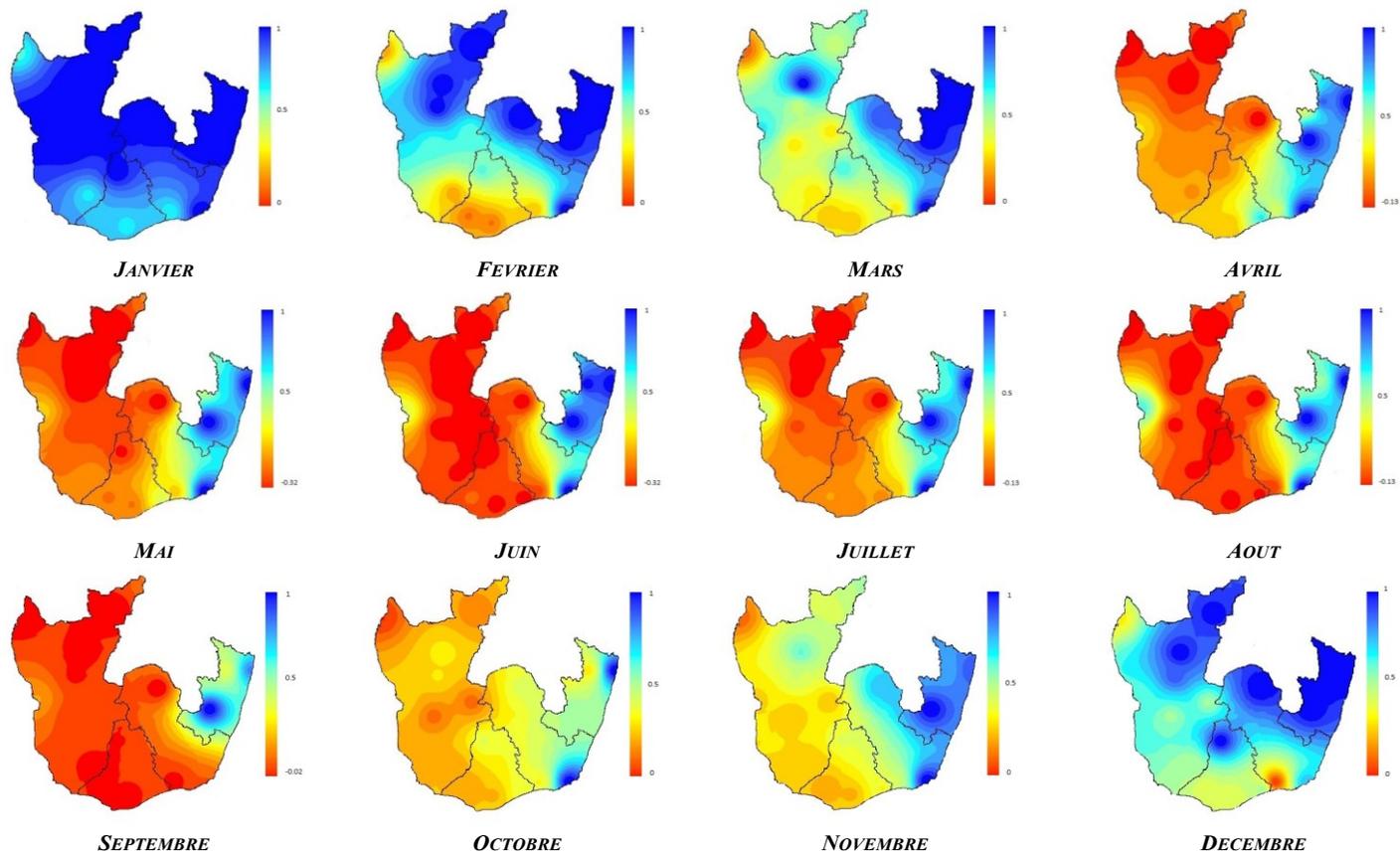
Source : Auteur, 2020

Figure 7 : Les diagrammes ombrothermiques des districts de la région Atsimo-Atsinanana (1985-2014)



Source : Auteur, 2020

Figure 8 : Carte des RU du Sud (1985-2014)



Source : Auteur, 2020

Figure 9 : Carte des IA du Sud (1985-2014)

Evolution future du déficit en eau (2015-2029)

Après l'analyse temporelle par le modèle de prédiction SARIMA, on a pu élaborer les diagrammes ombrothermiques prévisionnels sur une période de 15 ans (2015-2029).

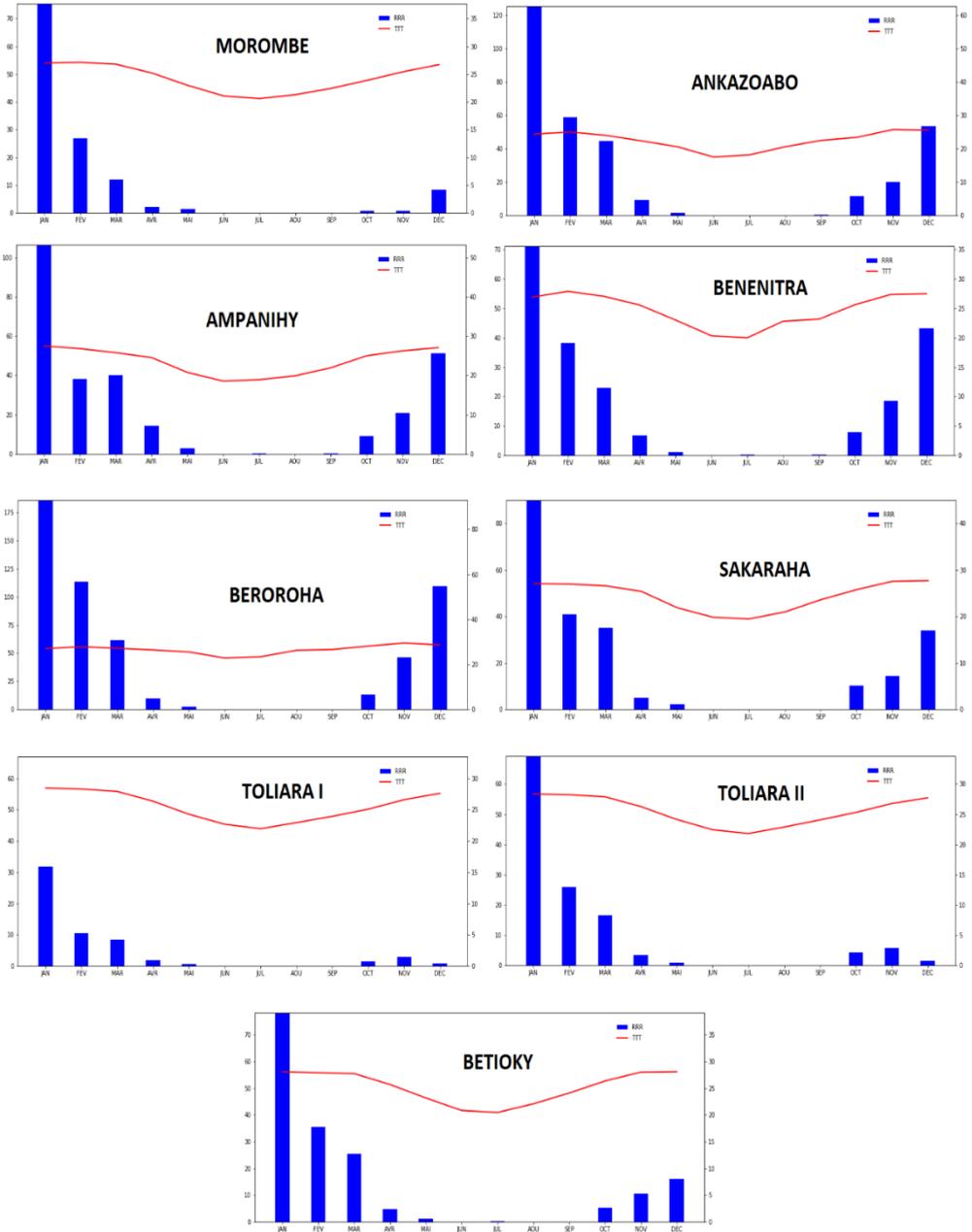
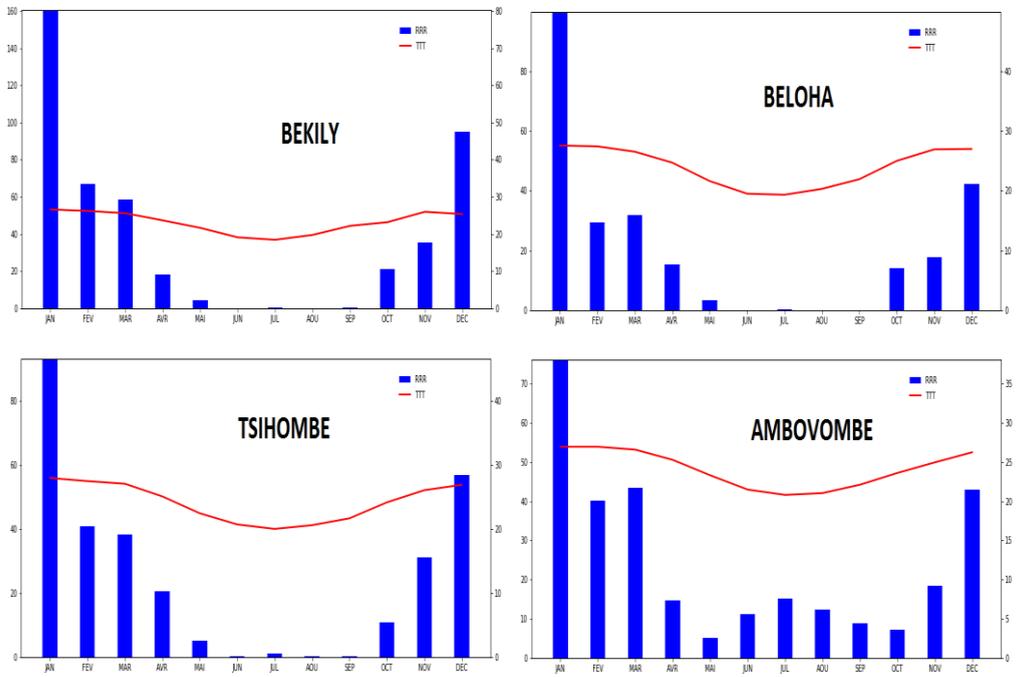
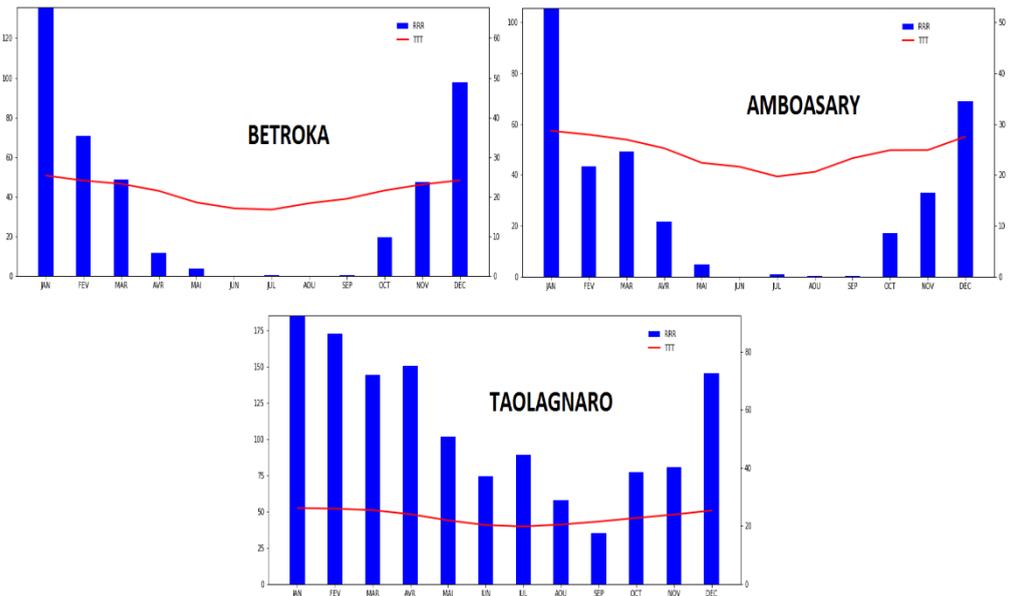


Figure10 : Diagrammes ombrothermiques prévisionnels des districts de la région Atsimo-Andrefana (2015-2029)



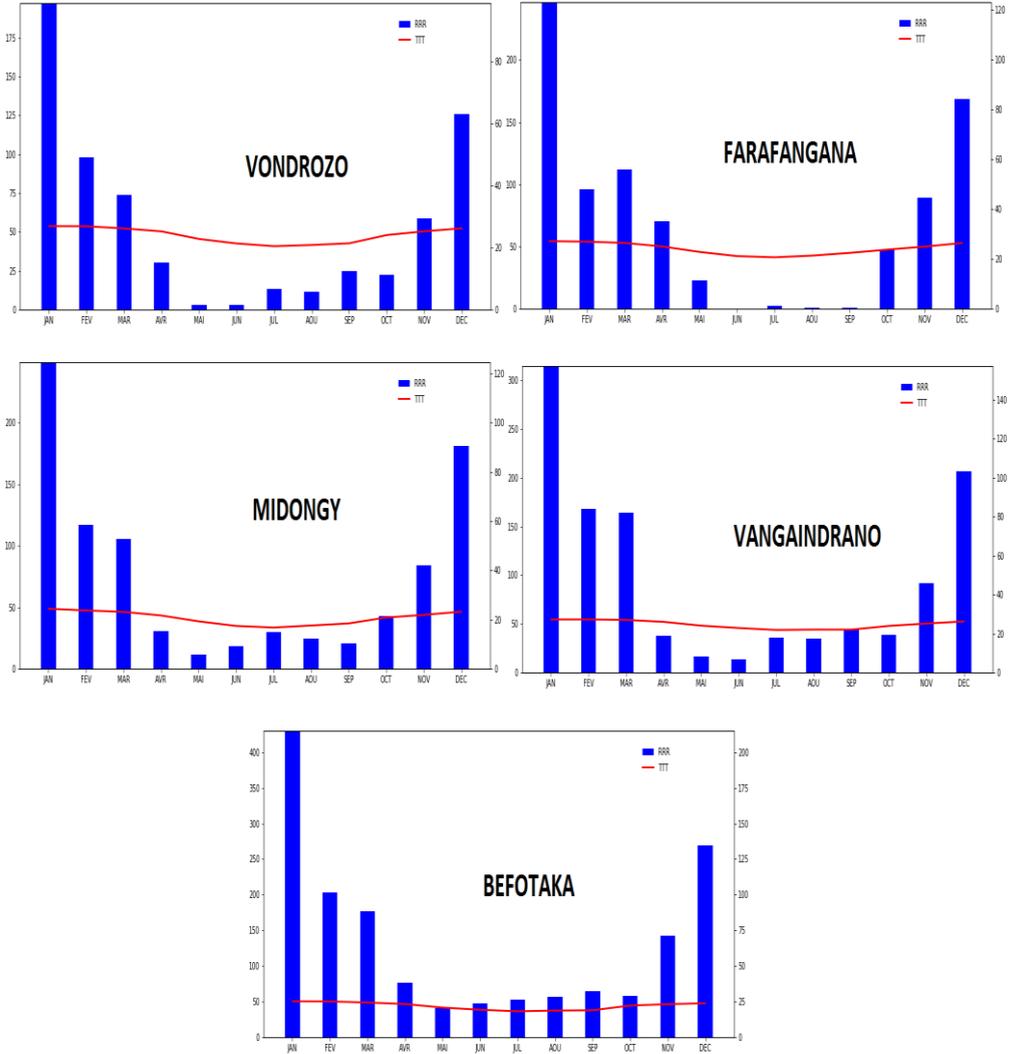
Source : Auteur, 2020

Figure11 : Aperçu des diagrammes ombrothermiques prévisionnels des districts de la région Androy (2015-2029)



Source : Auteur, 2020

Figure12 : Diagrammes ombrothermiques prévisionnels des districts de la région Anosy (2015-2029)



Source : Auteur, 2020

Figure13 : Diagrammes ombrothermiques prévisionnels des districts de la région Atsimo-Atsinanana (2015-2029)

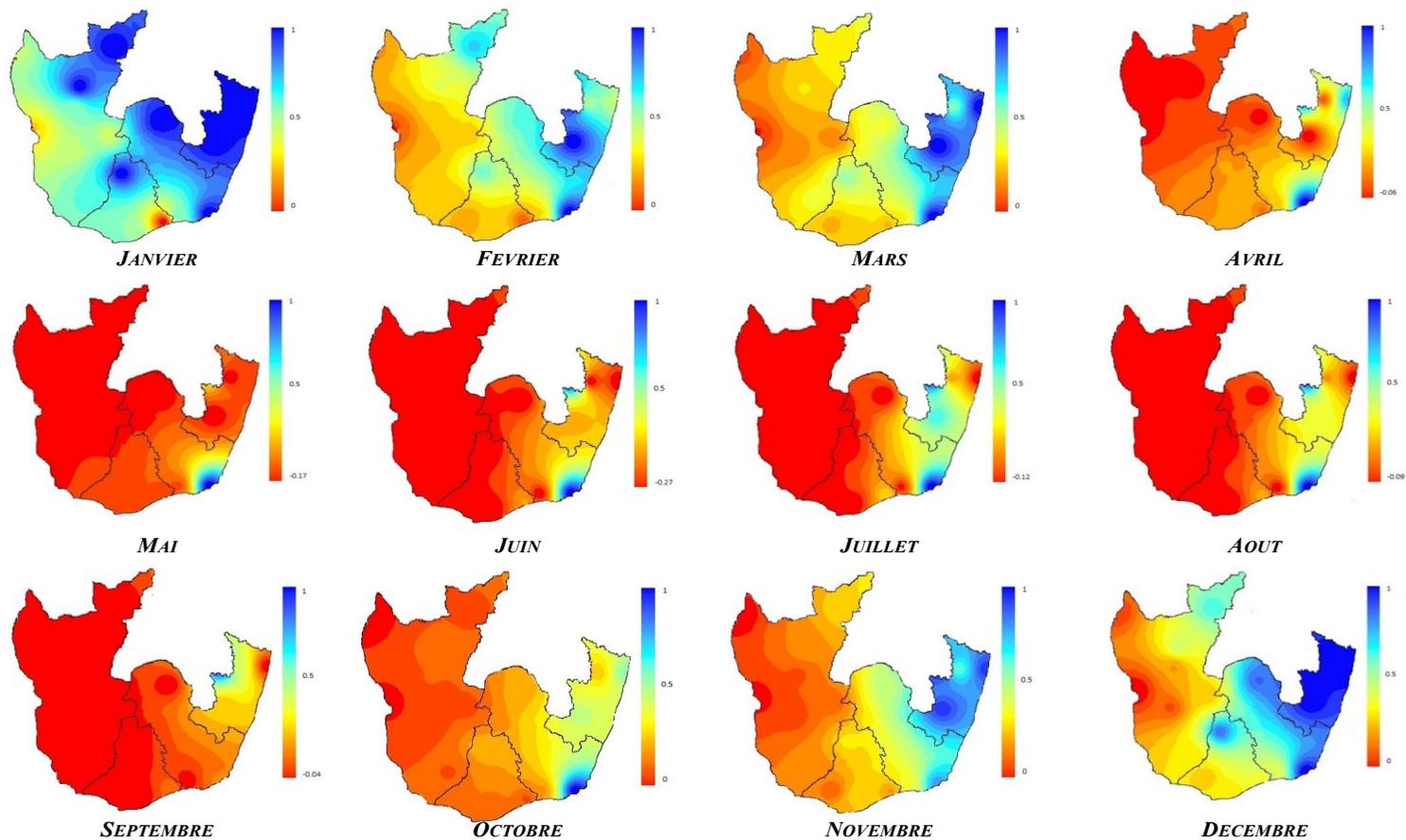


Figure 14 : Carte des IA du Sud (2015-2029)

DISCUSSION

Les résultats obtenus ont permis de subdiviser la zone d'étude en deux zones climatiques : Zone A : la partie Est (les districts de la région Atsimo-Atsinanana et Taolagnaro) et Zone B : la partie Sud-Ouest (les districts de la région Atsimo-Andrefana, Androy et Anosy (sauf Taolagnaro)).

La Zone A correspond à une zone où l'indice d'aridité est supérieur à 0.5 et a des stocks en eau plus de 50 [mm]. Elle ne rencontre pas un déficit hydrique tout au long de l'année (de janvier à décembre,). Cet avantage est peut-être dû à la géomorphologie de la zone qui est montagneuse. Les diagrammes ombrothermiques confirment cette abondance en eau ; les pluviométries sont au-dessus de la moyenne (cf Figures 10, 11, 12 et 13).

Contrairement à la précédente, la zone B rencontre une situation très difficile en termes d'eau, à cause du déficit en eau. L'indice d'aridité va de 0.4 à -0.32. L'IA et le déficit en eau est inversement proportionnel. En général, cette situation a lieu entre les mois d'avril et novembre, et sa vulnérabilité est intensifiée surtout en hiver (entre les mois de mai et septembre). Pour le district de Betroka et de Bekily, ce phénomène est bien visible. Elle rencontre donc une période sèche presque toute l'année.

Suite à l'analyse temporelle (Figure 14), la situation prédite du 2015-2029 risque de s'empirer de jour au lendemain. Une grande partie de notre zone d'étude sera vulnérable et le déficit s'étale du mois de Février au mois de Décembre. Befotaka et Taolagnaro sont les zones qui ne seront pas touchées par ce problème.

On observe une tendance à la baisse pour la pluviométrie et une tendance en hausse pour la température, dans presque l'ensemble de notre zone d'étude. Ces écarts indiquent une grande variation et un changement de la situation climatique de la zone.

On constate également que les stocks d'eau diminuent même dans la zone A. Le manque d'eau dans les autres zones augmentera. La carte des IA (Figure 14) valide cette évolution car elle montre que la plupart des valeurs de cet indice est égale à zéro (0). Quelque fois, on évalue même des valeurs négatives d'IA dans notre analyse. Ce qui met en évidence l'insuffisance ou même l'absence d'eau dans notre lieu d'étude.

CONCLUSION

Le Grand Sud de Madagascar est marqué par un déficit sévère en eau depuis des nombreuses années. Différentes études et analyses ont été faites auparavant pour essayer de résoudre ce problème mais le manque d'eau reste toujours une réalité. Cette étude contribue à l'analyse du manque d'eau qui persiste dans cette partie de Madagascar. L'approche hydrométéorologique, couplée avec des analyses temporelles (modèle de prédiction SARIMA) a permis de caractériser ce problème et

surtout faire des projections futures. Les analyses par diagrammes ombrothermiques, la réserve utile, et l'indice d'aridité ont mis en exergue la présence de deux zones climatiques bien distinctes. Les régions Atsimo-Andrefana, Androy et Anosy, sauf Taolagnaro, sont les zones très vulnérables.

Suite à une analyse temporelle, de la période 2015-2029, l'étude réalisée a montré que la zone d'étude sera face à une accentuation du déficit en ressource en eau. Les périodes de manque d'eau s'étaleront du mois de Février au mois de Décembre. Presque tous les districts, à l'exception de Befotaka et de Taolagnaro, rencontreront ce même problème.

En termes de perspective, il est indispensable de trouver un système d'adaptation pour faire face à cette situation, et il est aussi nécessaire de prendre des précautions pour alléger le niveau de déficit en eau, pour le bien-être de la population du sud.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) BONNET M., DELAROZIERE O., JUSSERAND CI. et P. ROUX, 1970, Calcul automatique des bilans d'eau mensuels et annuels par les méthodes de Thornthwaite et de Turc.
- 2) CHARMOILLE A., 2017. Accès à l'eau dans le "GRAND SUD" de Madagascar, évaluation du potentiel hydrogéologique au niveau des zones d'intervention de l'ONG AVSF projets : Zoloke, Sohavelo et Fanantenana, rapport de recherche AVSF, HAL Id: hal-01873112, 88pages.
- 3) FONDS AFRICAIN DE DEVELOPPEMENT (FAD), 2001, Rapport D'évaluation Alimentation en eau potable et Assainissement en milieu rural dans le Grand Sud, 51pages.
- 4) Holt, C.C., 1957, Forecasting Seasonals and Trends by Exponentially Weighted Moving Averages. ONR Memorandum, Vol. 52, Carnegie Institute of Technology, Pittsburgh. Available from the Engineering Library, University of Texas.
- 5) RANDRIATSITOHAINA J. B., et al., 2019, Vulnérabilité de Toliara face à l'insuffisance en eau, région Sud-Ouest de Madagascar, HAL Id : hal-02102994, LETG Angers, Université de Toliara.
- 6) Thornthwaite, C.W. and Holzman, B., 1939, The determination of evaporation from land and water surfaces. Monthly Weather Review, 67(1), pp.4-11.
- 7) USAID, 2016, Madagascar au cœur de la sécheresse.

FABRICATION D'EMBALLAGE BIOPLASTIQUE A PARTIR DES PEAUX DE BANANES

par

RAMANOARY Andry M.⁽¹⁾, ANDRIANIMANANA Julie S.⁽²⁾,
ANDRIANARISON Edouard R.⁽³⁾

- (1) Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar
- (2) Ecole Doctorale Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo
- (3) Professeur, Chimie Innovante et Ingénierie de la Transformation, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo

RESUME

Les rejets des déchets en matières plastiques pétrochimiques constituent un grand risque pour notre écosystème. Elles mettent jusqu'à plusieurs années pour se dégrader. En effet, elles représentent un facteur, d'une part, de dégradation de l'environnement, et d'autre part, surtout de problème de santé. Des chercheurs découvrent de nouvelles sources de matières premières dont le maïs, les pommes de terre et le manioc, susceptibles de remplacer ce combustible fossile et n'ayant pas de conséquences graves pour l'environnement. Les bioplastiques ainsi produits sont des solutions plus écologiques. L'objectif principal de cet article étant d'inventer une technique de transformation de peau de banane en emballage bioplastique, en utilisant à la base son amidon et ses fibres. Notre méthode consiste à la libération d'amidon des peaux de bananes permettant d'attaquer l'amylopectine pour avoir une chaîne linéaire d'amylose afin de produire l'emballage bioplastique. En utilisant 100g de pâte obtenue après préparation des peaux de bananes pour chaque expérience, des films souples de bioplastiques de dimension 25 cm x 15 cm, de faible épaisseur inférieure à 1mm, de couleur jaune clair ont été obtenus. Les différents tests réalisés pour la caractérisation du produit final ont montré sa grande souplesse, sa flexibilité, sa finesse et son imperméabilité à l'eau est moyenne. La réalisation de ce projet contribue davantage sur la protection de l'environnement, ainsi qu'un développement important du bioplastique de deuxième génération.

Mots-clés : Amidon, Fibre, Amylopectine, Amylose, Bioplastique.

ABSTRACT

The discharge of petrochemical plastic waste is a great risk to our ecosystem. They take up to several years to degrade in nature. Indeed, they represent a factor of environmental degradation especially the health problem. Researchers are discovering new sources of raw materials such as corn, potatoes and cassava, which can replace this fossil fuel and have no serious consequences for the environment. Bioplastics produced in this way are more environmentally friendly solutions. The main objective of this book is to invent a technique for transforming banana peel into bioplastic packaging, using its starch and fibers as a base. Our method consists of releasing starch from the banana peels to attack the amylopectin to have a linear chain of amylose to produce the bioplastic packaging. Using 100g of paste obtained after preparation of the banana skins for each experiment, we obtained flexible films of bioplastics with dimensions 25 cm x 15 cm, thin thickness less than 1mm, light yellow color. The different tests carried out for the characterization of the final product have shown its high flexibility, fineness and average water impermeability. The realization of this project contributes further to the protection of the environment, as well as an important development of the second-generation bioplastic.

Key words : Starch, Fiber, Amylopectin, Amylose, bioplastic.

INTRODUCTION

La production des diverses matières en plastique se répand dans le monde. Or, ces matériaux utilisés quotidiennement ne se dégradent pas ou prennent des dizaines, voire des centaines d'années pour se dégrader. Parmi ces matériaux, les emballages alimentaires constituent une part considérable. L'inquiétude repose sur la consommation massive du pétrole qui est la principale source pour la fabrication des matières plastiques. Par ailleurs, la dispersion des déchets de plastiques pétrochimiques constitue un grand danger pour notre écosystème, entraînant des problèmes écologiques et de santé publique. L'épuisement des ressources fossiles, dont la conséquence est l'augmentation sans cesse croissante du prix du pétrole et le problème de pollution causée par des matériaux plastiques non-biodégradables à base du pétrole sont des préoccupations environnementales et de développement durable qui ont conduit à un regain d'intérêt dans le développement des matériaux biodégradables à partir de biopolymères naturels tels que les polyesters biodégradables (Belibi, 2013). Ainsi, le monde de la recherche s'emploie activement à trouver de nouvelles sources de matières premières, susceptibles de remplacer ce combustible fossile et n'ayant pas de lourdes conséquences pour l'environnement. Dans le secteur des plastiques notamment, se développe, depuis les années 2000, une offre de plastiques issus de sources renouvelables (végétale, animale...), également appelés plastiques végétaux, plastiques biosourcés ou « bioplastiques ». S'ils représentent

encore une part marginale dans la production de plastiques (moins de 0,3% en 2010 dans le monde), ces matériaux sont appelés à se développer rapidement notamment dans le secteur de l'emballage (Matondo, 2018). L'amidon est le bioplastique naturel issu directement de la biomasse qui est le plus présent au niveau de l'emballage avec un marché de 22.2 % selon Smithers Pira (Pierce, 2011). Participant à ce grand challenge, d'un côté, il s'agit, pour nous, d'essayer de recourir à d'autres sources de matières premières, de l'autre côté, de participer à la protection de l'environnement. Dans cette perspective, nous essayons de repartir avec des déchets alimentaires, plus précisément à la valorisation des déchets des fruits. L'amidon des peaux de bananes a été choisi pour la fabrication d'emballage bioplastique. L'amidon constitue de multiples fonctions comme épaississant, gélifiant, liant sous sa forme d'empois d'amidon granulaire et comme matières sucrantes, liantes, support lorsqu'il est utilisé sous forme hydrolysée. Le taux d'amidon est mesuré aux différents stades de couleur de la peau de banane. Il diminue de 39,3% à 0,1%, du stade d'immature au stade de mûrissement (Bonnet, 2012).

MATERIELS ET METHODES

L'étude expérimentale a été effectuée au sein du Laboratoire de la Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo.

Matières premières

Les peaux de bananes qui commencent tout juste à mûrir, de variété « taiparasy », à extrémité en forme de goulot de bouteille, d'aspect épaisse et lisse, de couleur jaune verte ont été choisies.

Le solvant et les réactifs utilisés étant :

- l'eau distillée, qui est le milieu réactionnel de la fabrication du bioplastique, et elle joue aussi le rôle de plastifiant.

- l'Hydrosulfite de sodium ou dithionite de sodium $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$, qui se présente sous la forme d'une poudre cristalline blanche, d'odeur à faible caractéristique (odeur soufrée) et qui est un agent de blanchiment.

- la Chlorure d'hydrogène ou acide chlorhydrique HCl qui sert à favoriser la déstructuration du grain d'amidon et facilite le passage de l'amylose en solution.

- le Glycérol ou glycérine servant de plastifiant, qui permet d'augmenter le volume libre entre deux chaînes de polymères pour en diminuer les interactions et ainsi favoriser le mouvement de l'une par rapport à l'autre. Passant, ainsi, d'un matériau rigide à un plastique. Le film fabriqué sera alors plus résistant à la tension et à la

flexion. Il n'interagit pas chimiquement avec la matrice dans laquelle il est dispersé. De plus l'ajout de glycérol rend le film plastique transparent.

- l'Hydroxyde de sodium NaOH est un solide blanc, inodore, qui sert à diminuer la viscosité de la solution (neutraliser le milieu).

Quatre expériences ont été effectuées en variant les concentrations de HCl et de NaOH : 0,10M ; 0,25M ; 0,50M et 0,75M.

Matériels

Les matériels utilisés étant :

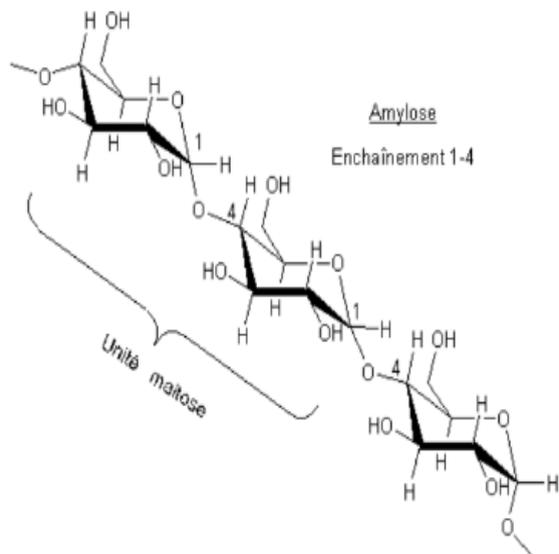
- Bêchers de 250ml et de 100ml
- Pipette graduée de 20ml
- Spatule
- Balance de précision (10-4g)
- Mixeur ou blender
- Plaque chauffante (Max 200°C, VISTA)
- pH-mètre ISOLAB
- Etuve à 70°C
- Moule en verre (e= 3mm, L=25cm, l=15cm).



Figure 1 : Moule en verre

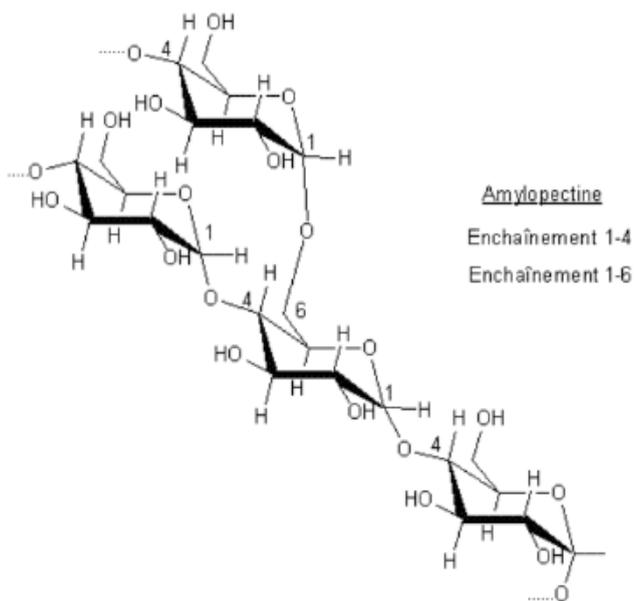
Méthodes

Le principe de cette synthèse est d'attaquer l'amylopectine de l'amidon avec de l'acide pour obtenir des molécules linéaires d'amylose afin de pouvoir les solubiliser dans l'eau.



L'enchaînement des motifs se fait par liaisons glycosidiques α -1,4

Figure 2 : Amylose (*enchaînement 1-4*)



L'enchaînement des motifs se fait par liaisons glycosidiques α -1,4 et α -1,6.

Figure 3 : Amylopectine (*enchaînement 1-4 et enchaînement 1-6*)

Fabrication d'emballage bioplastique

Les Figures 4, 5, 6, 7 et 8 suivantes nous montrent le procédé de fabrication d'emballage bioplastique.



Figure 4 : Trempage dans la solution $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$



Figure 5 : Bouillage des peaux de bananes



Figure 6 : Mixage des peaux de bananes



Figure 7 : Ajout de solution d'HCl du glycérol et de NaOH

Les peaux de bananes sont trempées dans une solution de $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ pendant 1h, mises ensuite dans l'eau bouillante pendant 30mn. Suivi d'un mixage pendant 20mn. Après avoir obtenu la pâte, une masse bien définie de cette pâte a été prise en ajoutant du HCl et du glycérol. En remuant le mélange pendant 15mn. Le mélange a été ensuite neutralisé ensuite avec du NaOH. Après, le mélange a été étalé uniformément dans une moule en verre ($e=3\text{mm}$, $L=25\text{cm}$, $l=15\text{cm}$)



Figure 8 : Coulage de la pâte dans un moule

Enfin, le passage au séchage qui consistait à mettre les polymères dans une étuve à 70°C pendant 24h.

Une autre expérience a été faite avec 0,25 M de HCl et 0,25 M de NaOH en mettant le polymère dans l'étuve pendant seulement 8h afin d'éliminer une grande quantité d'eau, ensuite il est laissé se sécher à l'air libre jusqu'à ce que le film ait décollé du moule.

Les caractéristiques physiques de l'emballage

Souplesse et flexibilité

Le test sensoriel (vision, contact) a été appliqué pour déterminer la souplesse et la flexibilité de l'emballage.

Imperméabilité à l'eau

L'imperméabilité désigne la capacité à empêcher la pénétration de l'eau provenant de l'extérieur. La surface d'essai a été en contact avec de l'eau. Nous avons vérifié s'il y avait des gouttelettes d'eau qui fuient des endroits différents à travers l'échantillon.

Test d'absorption d'eau

L'échantillon de masse bien déterminée a été mis dans un bécher contenant de l'eau de façon à ce qu'il soit entièrement immergé pendant quelques minutes, au moins 15mn.



Figure 9 : Test d'absorption d'eau

Et l'absorption d'eau a été définie par la différence entre la masse finale de l'échantillon et sa masse initiale dont la formule est la suivante :

$$AE = \frac{(\text{masse de l'échantillon mouillé} - \text{masse de l'échantillon initial}) \times 100}{\text{masse de l'échantillon initial}}$$

avec AE représente le % d'absorption d'eau.

Résistance à la rupture

Il s'agit de tirer avec les deux mains dans le sens contraire les deux extrémités de l'échantillon.

RESULTATS

Le mélange obtenu est un fluide un peu visqueux, coloré en marron clair à pH environ 6,12.

Les résultats des différentes expériences sont représentés dans les figures 10, 11, 12 et 13 :

- En effectuant l'ajout de 0,10 M, 0,25M, 0,50 M et 0,75 M respectivement de HCl et de NaOH et avec un séchage à l'étuve à 70 °C pendant 24h.



Figure 10 : Résultat avec 0,1M HCl,
0,1M NaOH



Figure 11 : Résultat avec 0,25M HCl
0,25M NaOH

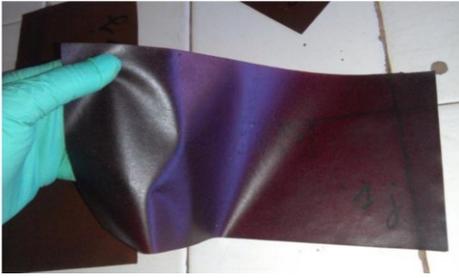


Figure 12 : Résultat avec 0,5M HCl, 0,5M NaOH



Figure 13 : Résultat avec 0,75M HCl, 0,75M NaOH

Après 24h de séchage du film dans l'étuve, des emballages souples de bioplastiques où quelques fibres sont encore visibles, de couleur marronne ont été obtenus.

- En effectuant l'ajout de 0,25 M de HCl et 0,25 M de NaOH, avec un séchage à l'étuve à 70°C pendant seulement 8h, puis à l'air libre, le résultat obtenu est illustré dans la Figure 14.



Figure 14 : Résultat de la 5ème expérience

Le nouvel emballage sorti est presque transparent, de couleur jaune clair, d'épaisseur inférieure à 1mm.

Le Tableau 1 montre les résultats de quelques caractéristiques des plastiques obtenues lors des quatre expériences.

Tableau 1 : Quelques caractéristiques des plastiques obtenus

<i>Concentrations HCl, NaOH Utilisées (M)</i>	<i>Masse (g)</i>	<i>Épaisseur</i>	<i>Couleur</i>	<i>Aspect</i>	<i>Souplesse et flexibilité</i>	<i>Imperméabilité à l'eau</i>	<i>Résistance à la rupture</i>
0,10	7,80	faible	marron	lisse	Souple et flexible	semi-perméable	faible
0,25	8,15	faible	marron	lisse	Souple et flexible	semi-perméable	moyenne
0,50	8,38	faible	marron	lisse	Souple et flexible	semi-perméable	faible
0,75	8,98	faible	marron	lisse	Souple et flexible	semi-perméable	faible

Lors de ces expériences, les masses des emballages obtenus sont différentes, de faibles épaisseurs, de couleur marron, d'aspect lisse, souple et flexible, semi-perméable, de faible ou moyenne résistance à la rupture.

Le Tableau 2 montre les capacités des films bioplastiques à absorber l'eau.

Tableau 2 : Résultats du test d'absorption d'eau

<i>Expériences</i>	<i>Masse initiale (g)</i>	<i>Masse finale (g)</i>	<i>Augmentation de masse</i>	<i>% d'absorption d'eau</i>
1	0,391	0,860	0,469	-
2	0,338	0,527	0,189	55,917
3	0,387	0,727	0,340	87,855
4	0,354	0,887	0,530	-

DISCUSSION

La pâte possède un pH égal à 6,12 : c'est un pH acide. D'après une autre étude, le pH d'amidon a été mesuré pour une suspension à 2 % d'amidon, de 5,78 (Mbey, 2013), c'est aussi un pH acide. Et le pH optimum pour une bonne gélatinisation est de l'ordre de 7 à 7,5 (Mbougoung, 2009) (Tambo et al., 2019). Ainsi, 6,12 étant inférieur à 7 ou à 7,5 donne une bonne gélatinisation. L'ajout de la solution d'acide chlorhydrique dans la pâte favorise la séparation amylose/amylopectine c'est-à-dire une déstructuration du grain d'amidon par un phénomène d'hydrolyse ménagée. La durée de cette hydrolyse doit être contrôlée, car l'acide s'attaquera à terme à l'amylose (Roberts et al., 2002). Ceci est suivi d'une addition de quelques grammes de glycérol pour donner aux films fabriqués un caractère plus résistant à la tension ainsi qu'à la flexion. Il est vraiment nécessaire de neutraliser ensuite le milieu avec une solution de soude avant de procéder au séchage. Le séchage à l'étuve à 70°C pendant 24h donne

aux emballages ainsi obtenus une couleur marron de faible épaisseur, d'aspect lisse. Plus, les emballages restent plusieurs heures dans l'étuve très chaude, plus leurs couleurs deviennent foncées. Evidemment en raison de cette chaleur, l'eau est absorbée, les emballages sont séchés. Ainsi, leurs masses sont différentes en variant les concentrations de HCl et de NaOH. Le chlorure d'hydrogène n'est qu'un catalyseur. Et l'addition de NaOH permet la diminution de la viscosité de la solution. En modifiant sa concentration, la viscosité change aussi, et ceci entraîne une variation de la masse de l'emballage. Par ailleurs, l'acide chlorhydrique hydrolyse également la cellulose (composant majoritaire des fibres naturelles) contenue dans la fibre et la transforme en glucose soluble dans l'eau. Et selon notre point de vue, les fibres interviennent sur la structure et les propriétés de l'emballage film obtenu notamment, elles augmentent l'élasticité et la résistance du film et lui apportent ainsi de la souplesse.

Aujourd'hui avec l'intérêt croissant des industries pour des produits écologiquement corrects, des fibres naturelles sont produites pour des applications en tant que renfort dans des matrices polymères (biodégradables ou non). Les marchés principaux sont l'industrie automobile et l'industrie de l'emballage. De bonnes propriétés mécaniques, une faible densité, un faible coût ainsi que la disponibilité des fibres naturelles représentent les avantages majeurs par rapport aux fibres traditionnellement utilisées dans les composites (fibres de verre). (Davidovic, 2006). Les fibres naturelles présentent donc de bonnes propriétés mécaniques, mais leur utilisation est limitée par leur caractère hydrophile et leur faible stabilité thermique. Pour les caractéristiques physiques, en faisant le test d'imperméabilité à l'eau, les emballages obtenus sont tous semi-perméables. Une membrane semi-perméable se dit d'une membrane qui ne laisse passer que les solvants, comme l'eau, et non les substances en solution.

En effet, ces emballages présentent une bonne activité. Après le test d'absorption d'eau, les emballages obtenus par ajout de 0,10M; 0,50M; 0,75M de HCl et de NaCl ont eu leurs pouvoirs d'absorption d'eau faibles. Seul l'emballage obtenu par ajout de HCl et de NaOH à 0,25 M a eu son pouvoir à absorber l'eau, moyen, il est donc plus résistant à l'eau par rapport aux autres. C'est-à-dire qu'il a une porosité plus petite que celles des autres résultats. Et l'avantage du résultat de cette dernière expérience par rapport aux autres au niveau de la résistance à l'eau est expliqué par la vitesse d'attaque de l'acide à l'amylopectine en fonctions du temps et de concentration. De même pour la résistance à la rupture, les emballages obtenus par addition de 0,10M, 0,50M, 0,75M, de HCl et de NaOH ont eu leurs résistances à la rupture faibles. Seul l'emballage obtenu par ajout de HCl et de NaOH à 0,25 M a eu sa résistance à la rupture moyenne. Par conséquent, dans la présente étude, 0,25 M est la concentration parfaite utilisée pour la formule de fabrication d'emballage à partir des peaux de bananes. Après changement de mode de séchage de l'emballage, séchage à l'étuve à

70°C pendant seulement 8h, puis à l'air libre, le nouvel emballage obtenu est un peu plus transparent que le film précédent, de couleur jaune clair, d'épaisseur inférieure à 1mm. Il n'est donc pas nécessaire de mettre plusieurs heures l'emballage dans l'étuve pour le sécher. Huit (8) heures dans l'étuve suffisent pour avoir un meilleur résultat que précédemment. Seuls de simples tests ont été effectués, en raison de manque d'appareillage et d'insuffisance de matériaux d'analyses. En effet, toutes les caractéristiques physico-chimiques de produits utilisés n'ont pas pu être trouvées.

Le fait que le plastique biodégradable fabriqué ne soit pas aussi solide que le plastique commercial peut être dû à divers facteurs. Mais au stade actuel de nos connaissances, nous pensons que ceci est dû par le simple fait que le produit est fait à base d'amidon, et que ce produit est un sucre, donc pas résistant à l'eau. Il serait donc très intéressant d'essayer de rendre ce type de plastique résistant à l'eau. En ce sens, nous pensons qu'en ajoutant de l'huile végétale au mélange, cela aurait pour effet de rendre le plastique plus résistant à l'eau.

CONCLUSION

L'intérêt de la présente étude réside dans l'exploitation de la nouvelle ressource de préparation de bioplastique à partir de déchets alimentaires : les peaux de bananes. La banane est l'un des fruits les plus courants à travers Madagascar. Il n'y aurait donc pas besoin d'une production supplémentaire. Cette recherche a permis de fabriquer un emballage à partir de l'amidon des peaux de bananes. Même si le taux d'amidon contenu dans les peaux de bananes diminue au stade de murissement, il est profitable. Cette technique essaie de valoriser les déchets et permet de réduire l'utilisation des produits chimiques qui présentent des risques pour l'environnement et la santé. D'autres études comme le test chimique, l'étude économique devraient encore être faites avant la production de l'emballage. Il est souhaitable de créer des petites entreprises malgaches de production d'emballage bioplastique à partir de l'amidon des peaux de banane, dont l'exploitation contribuerait au développement durable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Belibi P. C. (2013). Elaboration et caractérisation des biofilms à base d'amidon de manioc renforcé par des charges minérales bi et tridimensionnelles. Université de Haute Alsace - Mulhouse ; Université de Yaoundé. Français. 130p.
- 2) Bonnet-Bruno C. (2012). Valorisation de la banane Cavendish FWI, à différents stades physiologiques de récolte pour l'obtention par procédés de chimie verte de molécules d'intérêt biologique impliquées dans des activités anti-ulcères et cardiovasculaires. Pointe-à-Pitre, 175p.

- 3) Bouafou K. G. M. et al. (2012). Les produits et sous-produits du bananier dans l'alimentation animale. *Int. J. Biol. Chem. Sci.* 6(4): 1810-1818, DOI : <http://dx.doi.org/10.4314/ijbcs.v6i4.36>.
- 4) Collin M. et Dalnic R. (1991). Himeda M. (2012). Propriétés physico-chimiques et rhéologiques de la farine et de l'amidon de taro (*Colocasia esculenta* L. Schott) variété Sosso du Tchad en fonction de la maturité et du mode de séchage. Université de Lorraine et l'Université de Ngaoundéré. 232p vol.46. nO 1,p.13-17.
- 5) Davidovic A. S. (2006). Matériaux biodégradables à base d'amidon expansé renforcé de fibres naturelles - Application à l'emballage alimentaire. Université du Sud Toulon Var, Français. 196p.
- 6) Matondo A. (2018). Fabrication d'un bioplastique. Université de Kinshasa. https://www.researchgate.net/publication/323187743_Fabrication_d'un_Bioplastique.
- 7) Mbey J. A. (2013). Films composites amidon de manioc-kaolinite : Influence de la dispersion de l'argile et des interactions argile-amidon sur les propriétés des films. Université de Lorraine. 52. 138p.
- 8) Mbougoung P. D. (2009). Influence des amidons natifs ou acétylés de manioc et de pomme de terre sur les propriétés physico-chimiques et texturales du pâté de Bœuf. Université de Ngaoundéré. 192p.
- 9) Pierce, L.M. (2011). PHA and bio-derived PE to drive bioplastic packaging market to 2020: study. http://www.packagingdigest.com/article/517396PHA_and_bo_derived_PE_to_drive_bioplastic_packaging_market_to_2020_study.php.
- 10) Roberts S.A et al. (2002). The effects of concentration and sodium hydroxide on the rheological properties of potato starch gelatinization, *Carbohydrate Polymers*.50.
- 11) Tambo S. T. et al. (2019), Application of amylase rich flours of corn and sweet potato to the reduction of consistency of cassava and corn gruels.

DECONTAMINATION D'EAU PAR RAYONNEMENT D'ARC ELECTRIQUE

par

RAFALIMANANA Sonia Jeanne⁽¹⁾, RAMAROZATOVO Vonjy⁽¹⁾

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

RESUME

De l'eau de qualité, c'est primordial pour la vie de l'Homme. La filière de la décontamination de l'eau est en expansion dans le monde. Les plus reconnus sont les procédés par chloration, par filtration, par désinfection solaire, par ozonation, par ultraviolet et par arc pulsé. Ce dernier procédé se révèle être nouveau pour Madagascar. Il combine à la fois des effets physiques (énergie électrique, énergie thermique) et des effets chimiques (enthalpie, oxydo-réduction). Le principe consiste à injecter un arc électrique dans de l'eau afin d'y apporter de l'énergie élevée tout en y émettant une radiation ultraviolette. Toutefois le procédé existant utilise la conduction comme transfert d'énergie. Une contamination par contact avec les électrodes peut survenir, d'où son inconvénient. De ce fait, l'approche expérimentale qui a été menée vise à l'exploitation du transfert d'énergie de l'arc par rayonnement au lieu d'être par conduction. L'*Escherichia coli* et les coliformes totaux sont choisis comme agent test. Après plusieurs expériences, des impulsions d'arc de cuivre à pression atmosphérique à proximité d'une quantité d'eau isolée dans un récipient ont été générées. Au bout d'un certain temps d'exposition, à une température d'eau de 40°C, assez d'énergies pour supprimer les micro-organismes cibles ont été transmises. Cependant, une modélisation mathématique mettant en relation les caractéristiques de l'arc et un élément à annihiler contenu dans l'eau pourrait être élaborée. Cette étude pourrait aboutir à la réalisation d'un réacteur capable d'éliminer les métaux lourds dans de l'eau destinée à la consommation.

Mots-clés : Arc haute tension, Désinfection, *Escherichia coli*.

ABSTRACT

Healthy water is essential for the good sake of the Humanity. The study of the water decontamination is in expansion in the world. The most acknowledged are the process by chlorination, by filtration, by solar disinfection, by ultraviolet and by pulsed arc.

This last process seems to be new for Madagascar. It joints at the same time: physical effect (electrical energy, thermal energy) and chemical effect (enthalpy, oxydo-reduction). The principle consists in injecting electrical arc into water to give a high energy to this last by emitting also an ultraviolet radiation. However, this process use conduction as an energy transmission. Nevertheless, a contamination by contact with the electrodes may occur, that is its main drawback. Then, the experimental approach that we adopted is opting for the exploitation of the transmission of the arc's energy by radiation, instead of the transmission by the conduction's way. The « *Escherichia coli* » and the « totals coliform » were chosen as test factor. After many experiences, we have generated an atmospheric pressure's copper arc impulsion, close to a size of a water isolated inside a recipient. Few moments of exposition later, when the water's temperature reaches 40°C, there is enough energy transmitted to remove the targeted micro-organism. Meanwhile, a mathematic model uniting the characteristic of the arc and an element meant to be annihilated contained inside the water, might be elaborated. This study might result in the realisation of a reactor able to eliminate the heavy metal residing inside the consumable water.

Key words : Desinfection, Decontamination, *Escherichia-coli*, High voltage arc.

INTRODUCTION

Le présent article est une contribution scientifique dans le vaste domaine de la décontamination d'eau en utilisant les propriétés physiques des arcs électriques. L'arc électrique est un phénomène physique qui apparaît entre deux ou plusieurs contacts métalliques. Ce phénomène, visible à l'œil nu, est essentiellement dû à un transfert d'énergie non-interrompu entre ces contacts lorsqu'on les sépare. Dans le domaine du 'génie de procédé', une des applications pratiques de l'arc électrique est la décontamination d'eau, entre autres, la décontamination des eaux usées en visant des cibles bien précises selon les paramètres opératoires. « Advanced Oxydation technology » ou AOT a démontré que l'émission d'ultraviolet par une décharge électrique dans l'eau permettait la réduction de micro-organisme (Laforest Z., 2017). Des études menées par des ingénieurs ont révélé qu'on peut éliminer des éléments cibles tel le bleu de méthylène, l'atrazine, la levure, l'*Escherichia Coli*, etc. via différentes caractéristiques et type de génération d'arc dans l'eau (Touya G., 2005, N. Karpel Ven Leitner, 2005).

L'arc électrique est utilisé en tant que procédé de décontamination d'eau. Toutefois, on doit le mettre en contact avec l'eau à traiter. En s'inspirant du projet SODIS, une décontamination d'eau via le rayonnement d'un arc serait-il envisageable ?

Cela nous a incités à effectuer une étude expérimentale concernant la « décontamination d'eau potable par rayonnement d'arc électrique ». Elle a pour

objectif d'éliminer l'Escherichia Coli, d'améliorer la qualité bactériologique de l'eau et diminuer ainsi le risque sanitaire dans sa consommation sans laisser des contaminants dérivés.

MATERIELS

Dispositifs expérimentaux

Ont été étudiés des arcs électriques générés par différentes tiges de cuivre et d'aluminium. Des essais selon le diamètre, le couplage (cuivre-cuivre ou cuivre alu ou alu-alu), et la distance inter-électrode ont été menés. Le dispositif présenté sur la figure 1-a a servi de support. Un moteur pas à pas a été installé pour mouvoir la partie supérieure de l'électrode.

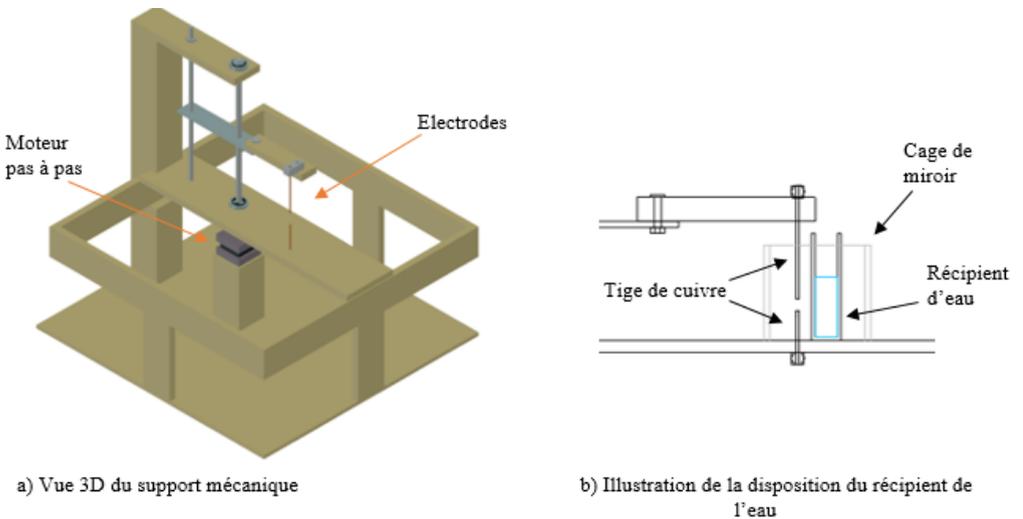


Figure 1 : Illustration des supports expérimentaux

Après plusieurs essais basés sur une approche stratégique, un transformateur de type Flyback a été choisi pour générer l'arc. Comme oscillateur destiné à provoquer la variation de flux dans la partie primaire du transformateur, un « Zero Volt Switching » ou ZVS a été choisi.

Ce rôle aurait pu être assuré par des commutateurs électroniques de haute fréquence commandés par des signaux analogiques. Cependant, un ZVS présente un rendu plus performant et un rendement optimisé. Il y a alors minimisation des perturbations.

Afin d'assurer un fonctionnement continu du Fly back, un condensateur égal à 2.2uF a été utilisé, donnant ainsi une fréquence d'environ 14.58kHz. Le résultat fut satisfaisant et peu importe la consigne de durée d'impulsion de l'arc, la génération

reste continue donnant un arc de température raisonnable, rayonnant et dont la longueur peut atteindre jusqu'à 2 cm.

Différentes mesures électriques et thermiques ont été menées afin de caractériser les phénomènes existants. La consommation de courant est relevée par l'intermédiaire de pince ampérométrique et la radiation moyenne thermique du milieu via une caméra thermique Thermal Imager Ti450. En effet, selon Vacquié S « la puissance transmise aux électrodes peut être considérée égale au produit de l'intensité par la chute de tension totale aux électrodes, si les matériaux des deux contacts sont les mêmes » (Vacquié S., 2000). Quelques études expérimentales non loin de la réalité confirment cette affirmation (L. I. Sharakhovsky, 1997) (Bayda H El, 2013). L'on peut, alors, dire que connaître le courant de l'arc nous permet de savoir approximativement les caractéristiques électriques de l'arc.

Désinfection de l'eau

Etant donné que la grandeur à exploiter est le rayonnement de l'arc, le recourt à une cage en miroir et des papiers aluminium afin de minimiser les pertes de diffusion (Figure 1-b) a été privilégié. La cage forme un cube de 8 cm d'arrête. Dans les zones supérieures et inférieures de la cage où la mise en place du système de miroir poserait problème, des papiers aluminium ont été placés pour assurer la réflexion de la lumière et de la chaleur.

L'eau est placée dans un récipient en verre transparente de 0.2 cm d'épaisseur, situé à 1 cm de l'arc. Le récipient a pour dimension extérieure de $9 \times 4.4 \times 2.8$ cm. En dessous de cette distance, une partie du verre devient noir après quelques minutes d'exposition créant un obstacle au transfert du rayonnement. Un récipient en verre et non en plastique est choisi pour éviter une éventuelle formation de photo-produit mais aussi par crainte que le récipient fond au fil du temps.

METHODES

Etat de l'art sur la désinfection par rayonnement - SODIS

La présente étude porte sur la désinfection des matières organiques pathogène telles les bactéries, les microbes et les spores. Elle s'est basée sur le procédé de désinfection solaire initié par Aftim Acra en 1984, expérimenté par l'EAWAG/SANDEC en 1991 et diffusé mondialement depuis 1999, divulgué sous le nom de SODIS (EAWAG, 2005).

Le procédé du SODIS consiste à étaler des bouteilles d'eau sur une tôle ondulée, de l'aluminium ou une surface réfléchissante exposée au soleil. La profondeur de l'eau ne doit pas excéder 10 cm, de turbidité inférieure à 26NFU et le récipient doit être transparent pour que la désinfection soit efficace. A 30°C, une énergie solaire de 555 Wh/m² peut réduire 3log de coliformes fécaux par effet germicide du rayonnement

UV. A part cela, une pasteurisation de l'eau par rehaussement de la température jusqu'à 70°C à 75°C (due au rayon infrarouge) pourrait surgir. Mais aussi, par synergie, à une température d'eau de 50°C pour un même taux de mortalité que précédent, seulement 140 Wh/m² est nécessaire (EAWAG, 2005).

De ces faits, les travaux ont été menés en se basant sur les idées générales du projet mais en exploitant les propriétés radiatives des arcs électriques.

Génération de l'arc électrique

Le but de l'étude est d'exploiter le rayonnement de l'arc électrique pour de la décontamination de l'eau. Le processus se fait sans contact et sans détérioration de paroi du contenant. Selon la littérature, l'arc pulsé à forte énergie est optimal pour de la dépollution. Avant adoption du mode opératoire définitif, plusieurs expérimentations relatives au mode d'alimentation (condensateur, transformateur) ont été réalisées pour finalement opter pour un arc haute tension amorcé par surtension.

L'installation est composée de trois grandes parties reliées entre elles : l'alimentation, l'oscillateur et l'éclateur d'arc.

Vu la quantité d'énergie déployée résultant du rapport de la puissance emmagasinée par le temps d'injection, de l'arc impulsional a été généré. Ceci a permis la diminution de l'échauffement du transformateur ainsi que la consommation excessive d'énergie. Un relais T commandé par un signal rectangle a été utilisé pour avoir les impulsions.

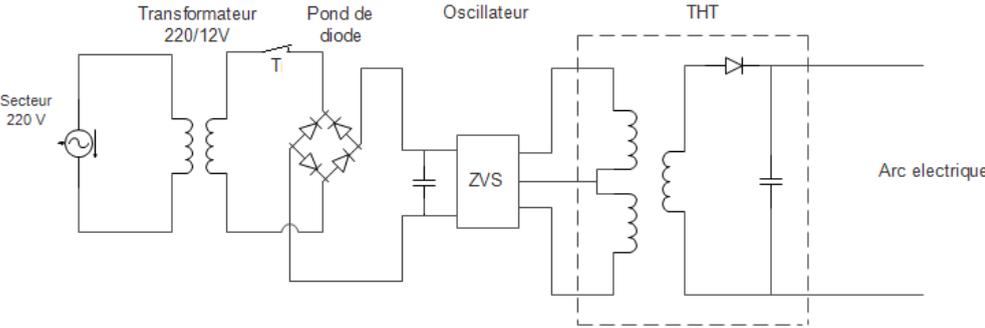


Figure 2-a : Circuit électrique de l'installation

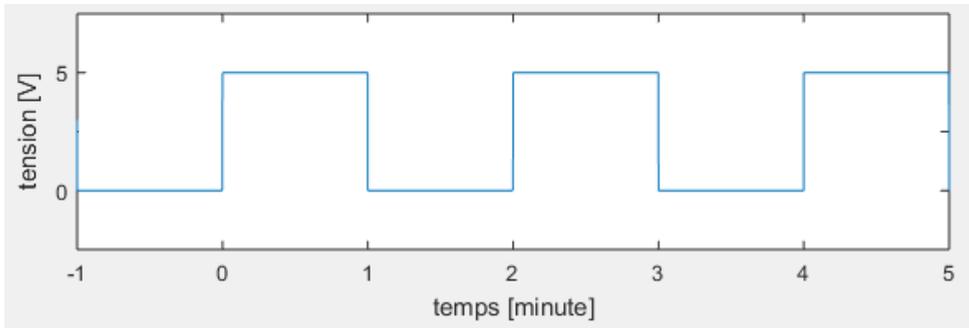


Figure 2-b : Signal de commande de la relais T

Le transport d'énergie par convection est négligé du fait que le mouvement du vent était très minime. L'expérience a été réalisée dans une salle bien isolée. Le transfert de chaleur a été effectué par conduction et par rayonnement.

Désinfection de l'eau

Le traitement se fait par absorption du rayonnement de l'arc par l'eau. Comme toute opération de désinfection, une vérification de la clarté de l'eau est primordiale. Cette clarification est établie par coagulation, floculation, décantation et filtrage. « Depuis 1994, l'OMS (Organisation Mondial de la Sante) considère qu'il n'est pas possible de garantir la désinfection d'une eau dès lors que sa turbidité dépasse 1NTU » (Legube B, 2015)

L'eau considérée dans l'étude est une eau de puits clarifiée. Après traitement, elle est prélevée dans un flacon pré-stérilisé. Un test relatif aux coliformes fécaux (*Escherichia Coli*) et coliformes totaux a été réalisé avant-après exposition vue que ce sont des agents banals responsables de la non potabilité d'une eau. Ces bactéries, principaux agents provoquant la diarrhée, éliminées par les rayons solaires, à un certain temps d'exposition. Des cultures microbiennes dans des boîtes de pétri de l'eau avant-après exposition a permis d'analyser l'effet de l'irradiation.

RESULTATS ET DISCUSSION

Les relevés de consommation de courant et la température environnante engendré par les diverses expérimentations d'arc sont présentés dans le tableau 1.

Les températures recueillies par la caméra thermique concernent, ici, de la température moyenne de l'environnement se trouvant dans un rayon de 3 cm de l'arc. L'appel de courant s'accroît avec la longueur de l'arc. Les quantités de chaleur émises viennent du fait que l'arc électrique se comporte comme une résistance. Lors de l'éclatement, elle est parcourue par une forte quantité de courant. Par effet Joule, une grande quantité de chaleur proportionnelle au carrée de l'intensité de courant est

dégagée par l'arc mais aussi par les électrodes. Selon la loi de Stephan, un corps chauffé induit un flux d'énergie E de tel sort que :

$$E = \sigma T_a^4 \quad (\text{Equation 1})$$

Où σ est la constante de Stephan et T_a est la somme des températures absolues de l'arc et des électrodes chauffées. Donc de l'énergie est rayonnée par les matières chauffées.

Tableau 1 : Relevé de courant mis en jeu et de température dégagée durant les différents éclatements selon les électrodes et le gap électrique

Dimension et type des électrodes [mm ²]	Distance inter-électrode [cm]	Courant consommé [A]	Température environnante moyenne [°C]
Cu 1.5 – Cu 1.5	0.5	4.8	-
	1	5.5	-
	1.5	5.8	-
	2	6	-
Cu 1.5 – Cu 2.5	0.5	5.7	28.1
	1	6	30.1
	2	6.2	30.1
Cu 1.5 – Cu 4	0.5	5	27.1
	1	5.6	28.0
	2	5.8	28.9
Cu 2.5 – Cu 4	0.5	5.3	31.7
	1	5.4	31.5
	2	5.2	31.0
Cu 4 – Cu 4	0.5	4.8	29.3
	1	5.5	30.1
	2	5.7	29.4
Cu 2.5 – Cu 2.5	1	5.3	30.3
Al 2.5 – Al 2.5	1	5.3	30.4
Al 2.5 – Cu 4	1	5.4	29.9

Une mesure de radiations thermique après 10 s d'éclatement avec différentes combinaisons d'électrode nous a permis de dresser le diagramme comparatif présenté dans la Figure 3.

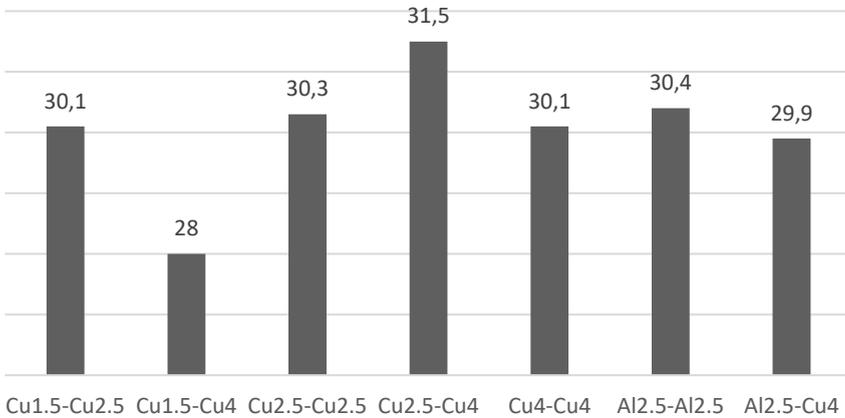


Figure 3 : Température moyenne de différent couplage d'électrode

Il y a été observé que l'arc électrique généré entre les électrodes Cuivre 2.5 mm² - Cuivre 4 mm² présentait le plus de rayonnement. La configuration pointe-plan est favorable du fait qu'un arc électrique découle d'un spot cathodique (RATOVOSON P. L., 2015). Par ailleurs, le cuivre 1.5mm² n'a pas supporté l'échauffement élevé de la colonne et a présenté une fusion rapide (0.3mm de longueur par seconde). En effet, plus l'éclatement de l'arc dure, plus les rayonnements augmentent, c'est la raison de ce faible rayonnement. Le cuivre admet un point de fusion égale à 1084,62°C qui est largement supérieur à celle de l'aluminium (660,323°C) donc ce dernier se détériore plus rapidement.

Par ailleurs, les mouvements particuliers au sein du plasma de l'arc émettent des rayonnements particuliers qui eux aussi transportent des énergies de photon. Au fur et à mesure qu'il y a érosion des électrodes, le plasma de l'arc se charge en particule de cuivre. Or ce dernier possède un potentiel d'ionisation plus faible que celle de l'azote ou de l'oxygène. Il y a alors une augmentation de population à l'état excité favorisant l'émission des raies selon loi de Boltzmann. Mais aussi plus d'émission de rayonnement de freinage et de recombinaison radiatif.

L'expérience s'est alors focalisée sur l'arc de Cu2.5-Cu4. En observant la répartition de la température de celle-ci suivant la distance d'éloignement, l'allure montrée par la Figure 4 a été obtenue. Il y a régression progressive de la température. Cependant, due à la présence de miroir installée pour optimiser le procédé, par effet optique, le rayon émis et le rayon incident coïncident à 2 cm du foyer de l'arc.

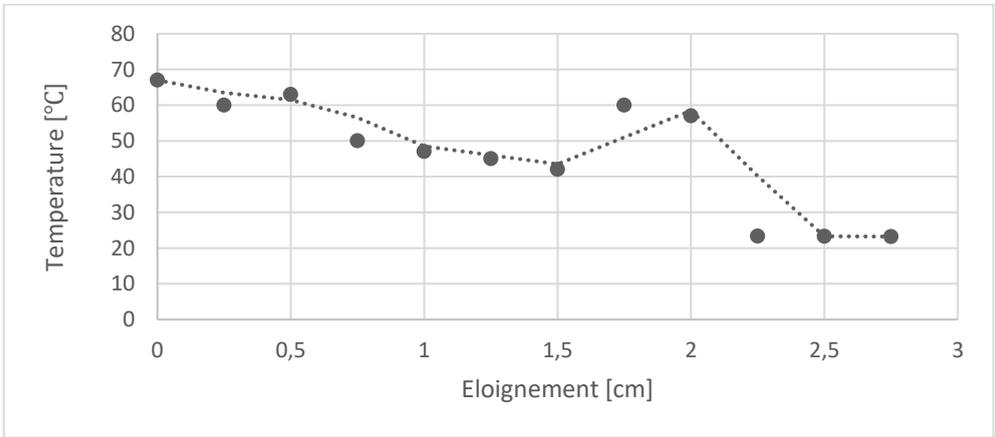


Figure 4 : Discrétisation de la radiation thermique de l'arc entre Cu2.5 et Cu4 selon l'éloignement

Les études ont été réalisées dans les conditions d'équilibre thermique local. En appliquant la loi de Kirchhoff (Equation 2) corrélée avec la distribution de Boltzmann (Equation 3), l'émissivité a pu être estimée selon la température par méthode inverse. L'allure de l'évolution de l'émission ressemble à celle de l'irradiation thermique, alors que la variation des valeurs est moindre. Pour une durée d'éclatement d'arc de 10 secondes, un rayonnement moyen de $4,47 \text{ J. cm}^{-3}$ est diffusé.

$$\varepsilon_{\nu} = \frac{h\nu}{4\pi} A_{hb} N_h \quad (\text{Equation 2})$$

Où h : constante de Planck; A_{hb} : probabilité d'émission spontanée, qui est répertoriée dans la littérature ; N_h : densité atomique excitée dans le niveau haut.

$$N_h = g_h \exp\left(-\frac{E_h}{kT}\right) \quad (\text{Equation 3})$$

Ou N_h : densité atomique excitée dans le niveau haut ; g_h : dégénérescence du niveau haut ; E_h : énergie du niveau haut ; k : constante de Boltzmann et T : température absolue

Afin de constater l'efficacité du rayonnement, une application du transfert d'énergie dans le traitement d'eau a été mise en place. L'eau considérée a été de l'eau de puits prélevée dans les CNTP. Après 15 minutes d'exposition prêt de l'arc électrique, il y a eu augmentation de sa température jusqu'à 40°C . Les résultats comparatifs avant-après sont présentés dans le Tableau 2 et Tableau 3. Tous les microbes ont été éliminés.

Tableau 2 : Résultats de l'analyse physique de l'eau avant et après traitement

Caractéristique physique	Avant traitement	Après traitement	Norme de potabilité (OMS)
pH	6.32	6.78	6,5 – 9,0
Turbidité [NTU]	2.6	2.37	< 5
Minéralisation [mg/l]	570	583	-
Conductivité électrique [uS/cm]	687	703	< 3000

Tableau 3 : Résultats de l'analyse microbienne de l'eau avant et après traitement

Microbe à détecter	Avant traitement	Après traitement	Norme de potabilité (OMS)
Coliforme totaux	1.9×10^3	< 1	< 1
Coliforme fécaux (dont l'E.coli)	3.9×10^3	< 1	< 1

L'énergie nécessaire pour l'élimination d'1log des Escherichia coli est de $10\text{J}/\text{cm}^3$ (Touya G., 2005). De ce fait, selon le résultat de l'analyse microbienne susmentionné, le transfert d'énergie traversant le récipient a été supérieur ou égale à $30\text{J}/\text{cm}^3$

CONCLUSION

La surface au voisinage de la colonne d'arc se charge par des molécules d'air dissociée et des particules de cuivre résultant de l'érosion des électrodes. La densité électronique s'accroît progressivement, diverses réactions de combinaison et de dissociation engendrant des émissions d'énergie d'enthalpie surgie. Les énergies se dégagent sous forme de chaleur et de lumière rayonnées.

La mise en évidence de ces transferts via le procédé de décontamination d'eau potable a porté ses fruits. La période d'incubation des coliformes totaux et fécaux est respectivement 37°C et 44°C . Or, l'on a pu en éliminer dans de l'eau ayant une température finale égale à 40°C . Le rehaussement donc de la température n'est pas le principal agent désinfectant responsable du résultat. Par conséquence, l'énergie rayonnée est responsable du phénomène de désinfection.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Bayda H El, Valensi F, Masquère M, Gleizes A (2013). Energy losses from an arc tracking in aeronautic cables in DC circuits. In IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation 1: 19-27.
- 2) EAWAG-Institut de Recherche de l'eau du domaine des EPF. (2005). Desinfection solaire de l'eau. In Guide pour l'application SODIS : 84. Suisse : Duebendorf
- 3) Laforest Z, J.-J Gonzalez, P Freton. (2017). Etude expérimentale et numérique d'un arc électrique dans un liquide : 227. France : Université Paul Sabatier - Toulouse III
- 4) Legube B. (2015). Production d'eau potable - Filières et procédés de traitement. In Technique de l'ingénieur : 243. Paris: DUNOD.
- 5) L. I. Sharakhovsky, A. Marotta, V. N. Borisyuk. (1997). A theoretical and experimental investigation of coppers electrode erosion in electric arc heaters. In Journal of Physics D - Applied Physics vol 14: 2395-2403
- 6) N. Karpel Ven Leitner, G Syoen, H Romat, K Urashima, J-S Chang. (2005). Generation of active entities by the pulsed arc electrohydraulic discharge system and application to removal of atrazine. In Water Research: 4705-4714: ELSEVIER.
- 7) RATOVOSON P. L. (2015). Caractérisation expérimentale d'un arc impulsif: 236. France : Université Paul Sabatier - Toulouse III
- 8) Touya G. (2005). Contribution à l'étude expérimentale des décharges électriques dans l'eau et des ondes de pression associées - Réalisation d'un prototype industriel 100kJ pour le traitement de déchets par puissances électriques pulsées. In HAL : 197. France : Université Paul Sabatier - Toulouse III
- 9) Vacquié S. (2000). l'Arc électrique. In Technique de l'ingénieur : 27. Paris: CNRS.

ETUDE DE LA PERFORMANCE DU MATERIAU COMPOSITE RENFORCÉ DE FIBRE DE CARBONE

par

ANDRIAMIHAJARIVO Sandratra A.⁽¹⁾, RAKOTOMALALA Jean L.⁽¹⁾
RAZAFINJATO Victor⁽¹⁾

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

RESUME

Des littératures et revues scientifiques ont soulevé une certaine rivalité entre l'armature en acier pour le renforcement des ouvrages en béton et les matériaux composites. La recherche que nous avons menée s'intéresse au mode de rupture du béton renforcé par le MC-PRFC, (Matériau Composite à base de polymère renforcé de fibre de carbone) en comparaison à celui de l'acier. Si depuis longtemps l'armature en acier a été connue et choisie pour reprendre les contraintes de traction du béton ; la performance du MC-PRFC n'en sera pas moins dans ce domaine. En effet, ce dernier est un produit fabriqué à partir de tissu de fibre de carbone. Il s'agit ici de fibre longue traitée par pyrolyse de fibre organique appelée précurseur dont la majorité des cas de fabrication industrielle est le Polyacrilonytrile [CH₂-CH-CN]_n, qui permet au tissu d'acquérir une performance mécanique intéressante et applicable pour le renforcement de structure.

Mots clés : Matrice, Renfort, Composite, Fibre de carbone, Béton, Résistance, Performance.

ABSTRACT

Scientific review has highlighted some challenges concerning steel reinforcement for concrete and composite materials. The research we have run focuses on the mechanical behavior of the concrete reinforced with composite material based fiber carbon (MC-PFRC) in comparison with steel. Steel has always been known as the first option to insert in the concrete in order to deal with the tensile strength developed in the concrete; the MC-PRFC also offers characteristic that can perform challenging mechanical behavior in the conception of the structure. Precursors known as the PAN (Polyacrilonytril [CH₂-CH-CN]_n are used to produce carbon fiber, this is the main element that offer the fiber its high mechanical performance. This potential

is the focus of this article so that we can conclude and exploit it in the structural engineering context.

Key words : Matrix, Reinforcement, Composite, Carbon fiber, Concrete, Resistance

INTRODUCTION

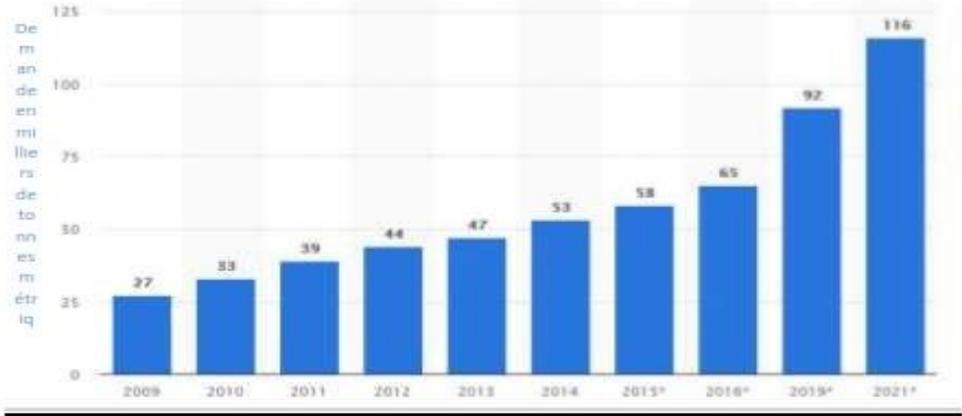
Les matériaux composites à base de polymère renforcés de fibre de carbone (MC-PRFC) font partie des matériaux phares qui ont toujours suscité un grand intérêt chez les chercheurs. Depuis sa découverte, les scientifiques se sont penchés sur la possibilité d'exploitation de ces matériaux, dans le domaine industriel (Charlie Tachi, 2012), notamment la fibre de carbone, les secteurs les plus fascinés par ce matériau ont été, au début, l'industrie aéronautique et navale. Les ingénieurs sont particulièrement attirés par le fait que la fibre de carbone possède une très bonne performance mécanique notamment la traction, pour une valeur en poids très faible (Jean Luyckxc, 2008). Dans la construction des avions par exemple, cette propriété va non seulement permettre aux engins volants de se déplacer plus vite mais aussi de diminuer la consommation de kérosène. Dans des applications plus étendues, on trouve l'utilisation de la fibre de carbone dans la conception des motos de course, des bicyclettes, des voitures, des skateboards, des planches à voile, et bien d'autre article de loisir.

La performance mécanique délivrée par le mariage de polymère therm durcissable et le tissu de fibre de carbone est la principale motivation du choix de ce matériau dans le cadre de cette recherche. Elle se propose ainsi d'exploiter les potentiels de cette composition afin d'en tirer le meilleur profit, en particulier le travail mécanique qu'elle peut offrir pour les structures porteuses en béton armé qui sont victimes de fissuration et présentent des risques d'effondrement de l'ouvrage.

- En matière de rentabilité technique, son application ne requiert pas de matériel mécanique avec des exigences compliquées. Sa mise en œuvre ne nécessite également pas de grande force physique comme pour le façonnage des armatures en acier. Les principaux travaux à faire sont la préparation de la surface de la paroi qui va recevoir le MC-PRFC et puis son collage.

- En matière de coût et rentabilité compétitive, le prix moyen au kilo, le coût de la fibre de carbone est de 25 Euro (100 000 Ar), il est très élevé par rapport à l'acier (0,49 Euro ~1950 Ar). Cette différence est surtout due au soin apporté au cours de la fabrication de la fibre de carbone qui fait intervenir des matériels de pointe et équipements très sophistiqués. Cependant, le cadre de notre recherche se limite au renforcement des structures. Dans ce cas, le MC-PRFC sera utilisé de façon ponctuelle seulement dans les zones nécessitant un renforcement et non sur la totalité de la structure. L'option du MC-PRFC propose une compétitivité accessible en terme de

quantité à mettre en œuvre pour un projet et plus particulièrement, sa performance mécanique en comparaison avec les autres matériaux (Figure 2). A cela s'ajoute l'amplification, ces 10 dernières années, des demandes en fibre de carbone ces qui a aussi entraîné un décroissement considérable du prix de ce produit (Figure1).



source : statista 2020

Figure 1 : Demande en fibre de carbone dans l'industrie

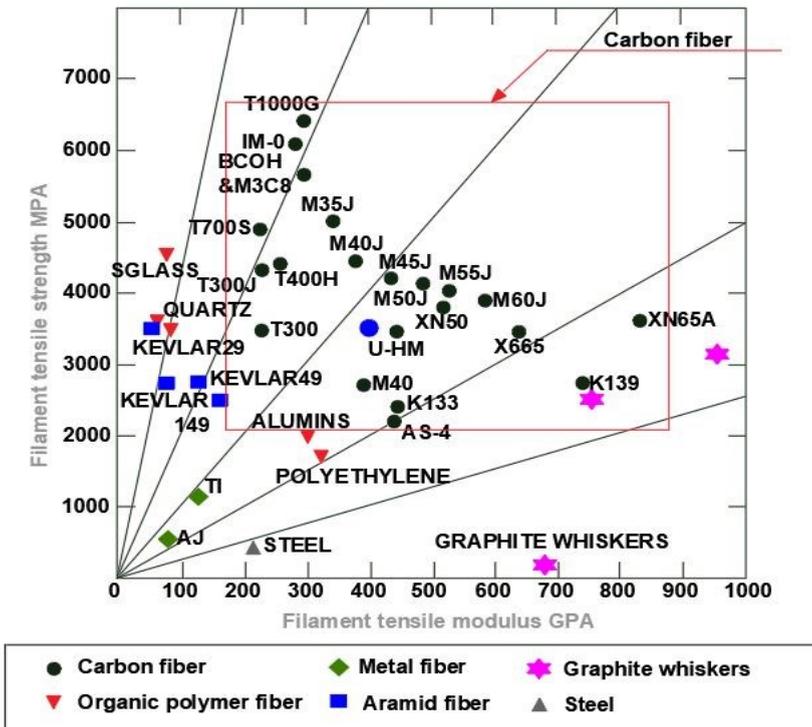


Figure 2 : Diagramme comparatif de la propriété des différents matériaux

MATERIELS ET METHODES

Le test d'écrasement a été effectué avec la machine d'essai universelle – WOLPERT TESTWELL du bloc technique d'Ankatso. Le test effectué se focalise sur l'analyse du mode de rupture du béton renforcé du MC-PRFC en vue de l'exploiter en tant que matériau de renforcement des structures porteuses en béton. Le même test a également été appliqué sur du béton armé d'acier dans la campagne d'essai afin d'accéder à des résultats comparatifs basé sur l'emploi de ces deux (02) matériaux (l'acier et le MC-PRFC).

Pour le matériau composite qui constitue l'objet, principal, du test de cet article, l'étude s'est basée sur la littérature scientifique ancienne qui traite du mariage approprié dont :

- la matrice : la résine Epoxy qui est le polymère organique thermodurcissable ;
- le renfort : le tissu en fibre de carbone T.F.C.

La matrice joue 2 rôles fondamentaux dans la simulation étudiée. Elle assure d'une part, le collage direct du T.F.C sur la paroi de l'éprouvette en béton et d'autre part, l'imprégnation du T.C.F ou T.F.C.? lui-même dont l'objectif est de former le matériau composite. Un dosage obligatoire de 1/3 doit être respecté pour le mélange afin d'assurer une bonne tenue chimique de la matrice (Photos 1 et 2).



Photo 1 : Composant résine/durcisseur



Photo 2 : Mélange résine/durcisseur avec ratio 1/3

Caractéristique de l'éprouvette en béton

Deux éprouvettes prismatiques de 15 x 15 x 45 [cm] en béton dosé à 350 Kg/m³ ont été confectionné pour simuler le format réel d'une poutre porteuse.

Tableau 1 : Caractéristique de l'éprouvette

	Eprouvette 01	Eprouvette 02
Géométrie	15 x 15 x 45 [cm]	15 x 15 x 45 [cm]
Nature	Béton armé	Béton non armé
Dosage [Kg/m ³]	350	350
Armature de renfort	Acier 2HA 10 (Diamètre 10 mm)	3 mm de MC-PRFC
Emplacement	Enrober dans le béton à 3 cm de la fibre inférieure	Coller sous la face inférieure de l'éprouvette
Illustration figure (en rouge l'emplacement des armatures de renfort).	Eprouvette 01	Eprouvette 02
		
Poids [Kg]	25,3125	24,8063

- Eprouvette 01 : armé de 2 filants de fer rond 10 – nuance HA
- Eprouvette 02 : non armé renforcé de MC-PRFC au niveau de la fibre inférieure.



Photo 3 : Eprouvette pour test

RESULTATS

Le test de flexion simple a été effectué pour les deux éprouvettes. Les valeurs expérimentales ciblées sont celles qui traduisent le mode de déformation de la pièce sous l'évolution de la charge appliquée. Ainsi la charge de rupture du béton - F_{rupt} , son temps de rupture t_{rupt} , ainsi que la flèche après rupture, y ont été enregistrés.

Tableau 2 : Résultat du test

Identification des éprouvettes		Eprouvette 01	Eprouvette 02
Type d'écrasement		Flexion simple	
Simulation mécanique		Poutre sur appui simple	
Calibre de chargement [DaN]		12 000	
Type de renfort		Acier 2HA 10	3 mm de MC-PRFC
Début de rupture [seconde]	t1	13	7
Fin de rupture [seconde]	t2	23	15
Charge de rupture du béton	F_{rupt}	3 750	2 753

DISCUSSION

Approche mécanique

Sous la séquence de flexion, le *MC-PRFC* a pu tenir le béton dans son état élastique linéaire pendant 7 secondes -la charge de rupture enregistrée étant 2 753 DaN. Pour le cas des 2 filants d'acier HA 10, le béton est resté intact plus longtemps et s'est rompu à la 13ème seconde sous une charge de rupture de 3 750 DaN. Après la rupture totale, l'éprouvette perd intégralement son inertie et ne dégage plus aucune résistance. Sur la base de cette expérience, nous pouvons conclure que l'acier a offert une meilleure valeur de résistance que le *MC-PRFC*. Cela est en partie dû au fait que les filants d'acier choisis pour le test possède une meilleure inertie (avec 10 mm de diamètre) par rapport au *MC-PRFC* qui est de 3 mm d'épaisseur).

En effet, l'épaisseur du *MC-PRFC* représente 5 couches successives de tissu. Par raisonnement linéaire, l'application du double de cette épaisseur (soit 6 mm) permettra d'augmenter la performance du tissu avec une valeur de rupture estimative de 5 506DaN contre 3 750 DaN pour l'acier.

Tableau 3 : Comparaison des charges de rupture

MC-PRFC			2 HA 10 (filant de 10 mm de diamètre)
Epaisseur [mm]	Nombre de couche	Charge de rupture [daN]	Charge de rupture [daN]
3	5	2 753	3 750
6	10	5 506	3 750

Par rapport à d'autres travaux similaires, les résultats ont démontré l'efficacité de l'insertion de la fibre de carbone dans le renforcement des structures en ingénierie. Dans l'ouvrage : "Applying carbon fiber in building structures" de Litvinov Artem, les résultats affichés, bien que différents, convergent vers une même conclusion sur la performance du matériau. Cette différence peut s'expliquer directement par le fait que chaque pays et (ou) chaque université possèdent leur propre méthodologie d'analyse.

Analyse du mode de rupture

Dans les 2 tests, le *MC-PRFC* et l'acier HA n'ont subi aucune rupture.

La présence de ces renforts a brusquement dévié le plan de coupe au niveau de l'appui (Photo 5). Directement au droit de la charge appliquée au niveau de la fibre inférieure, c'est-à-dire à mi-portée, les renforts n'ont présentés aucune déformation (Photo 5). Par ailleurs, les déformations majeures sont localisées au droit des appuis dû à l'effet du moment engendré par la flexion. Pour l'éprouvette armée, la fissure suit un plan de rupture oblique depuis le milieu de la fibre supérieure jusqu'à couper entièrement la pièce à son appui (Photo 4). Ainsi, la fibre inférieure est sévèrement déformée avec un bombement localisé (en trait continu rouge sur la Photo 4). Pour le *MC-PRFC*, l'allure de la rupture est très irrégulière et ne traverse pas la section dans son intégralité mais tend à s'orienter vers l'extrémité de la section (Photo 5).



Photo 4 : Eprouvette 01 armé de 2 filants HA10



Photo 5 : Eprouvette 02 renforcé déu M.C.F.C

CONCLUSION

Les *MC-PRFC* dans leur configuration mince ne sont pas adaptés pour travailler en flexion et cisaillement direct, mais par contre, ils dégagent plus de travail mécanique dans les sollicitations en traction. Les ressources matérielles n'ont pas permis de travailler dans ce sens. Effectivement, Madagascar ne développe pas les matériaux composites. Par conséquent, le pays ne possède pas de matériel adapté pour les essais destinés aux **matériaux composites**. L'essai de flexion a été choisi comme indicateur de base de la performance de celui-ci.

L'expérience effectuée montre que le *MC-PRFC* est un matériau exploitable dans le domaine de l'ingénierie de la construction. Le focus du projet n'étant pas de remplacer l'acier mais d'introduire ce matériau composite dans le cadre de renforcement des structures.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Craveur J. C., (2008), Modélisation des éléments finis. *In Dunod.*
- 2) Luyckxc J., (2008), Composites à fibre de carbone dans le génie civil. Conservatoire nationale des arts et métiers.
- 3) Gendre L., (2011), Matériaux composites et structures composites. Université Paris-Saclay.
- 4) Artem L., (2010), Applying carbon fiber in building structures. Saimaa University of Applied Sciences.
- 5) Meier U., (1987), Proposal for a carbon fiber reinforce composite bridge across the Strait of Gibraltar at its narrowest site. In Elsevier