



**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série Sciences Technologiques

N°7 – 2022

Antananarivo - Madagascar

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

ISSN 1022 - 8691

**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT
Série
Sciences Technologiques
N°8 – 1er semestre
2022**

Membres du Comité de lecture :

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

Ce numéro a été édité avec le concours de

**Université d'Antananarivo
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 1025-3475

**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série Sciences Technologiques

N°8

2022

NOS PRINCIPALES REALISATIONS

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

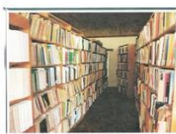
Production documentaire : Fiches techniques
66 thèmes sur l'agriculture et l'élevage

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

Base de données bibliographiques : MIREMBY
41537 Références multidisciplinaires

Edition de la Collection
"Revue Recherche pour le Développement"
42 numéros dont :
Série Sciences Biologiques : 25
Série Sciences de l'Homme et Société : 9
Série Sciences Technologiques : 2
Série Médecine : 6

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



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique



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

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

SOMMAIRE

Analyse comparative des deux méthodes d'évaluation de l'érosion en nappe sur les sols ferrallitiques des hautes terres centrales malagasy RAKOTONDRANALY Natanaela, ANDRIAMBOLOLONA Dauphin	7
Breeding failure factors of the Madagascar Grebe <i>Tachybaptus pelzelni</i> (Hartlaub, 1861) in Bemanevika Protected Area, Sofia Region, northern Madagascar RASOLONJATOVO Delphin, RENE DE ROLAND Lily-Arison , RAKOTONDRATSIMA Marius, ANDRIAMALALA Tolojanahary, PRUVOT Yverlin Z.M.	21
Caractérisation physico-chimique du minerai d'apatite par la méthode de spectroscopie de la fluorescence des rayons pour la valorisation industrielle, Commune rurale de Soanala, Région d'Anosy, Madagascar RAVELONA Andry Judicaël	41
Caractérisation par RMN ^{29}Si et ^{27}Al et analyses thermiques des différents types d'argiles de la Région Analamanga ANDRIANAINARIVELO Mahandrimanana, RAJERISON William, MUTIN Hubert, ALAUZUN Johan	55
Analgesic and anti-inflammatory activities of the methanol extract of the fruit of <i>Uapaca bojeri</i> Bail. (Euphorbiaceae) RAKOTONIRINA Finiavana Mihary V., RAZAFINDRAKOTO Zoarilala R., TOMBOZARA Nantenaina, RAFANOMEZANTSOA Roger Marie, RAMANITRAHASIMBOLA David	67
Study of magnetic and thermal fields of induction furnace with quickfield RINDRA HARIVELO Nicole, RAZANAMANAMPISOA Harimalala, ANDRIAMAHITASOA A. Bernard, RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo	77
Artificial neural network-based prediction of fuel consumption in Antananarivo ANDRIAMAHITASOA Bernard A., RABEDONASOA Nandrianina, RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo	87

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



ANALYSE COMPARATIVE DES DEUX METHODES D’EVALUATION DE L’EROSION EN NAPPE SUR LES SOLS FERRALITIQUES DES HAUTES TERRES CENTRALES MALAGASY

par

RAKOTONDRANALY Natanaela⁽¹⁾, ANDRIAMBOLOLONA Dauphin⁽¹⁾

(1) Ecole Doctorale Géochimie et Chimie Médicinale (GEOCHIMED), Université de Fianarantsoa, Madagascar

RESUME

Dans le cadre d’une gestion durable des ressources en sol, la disponibilité des informations qualitatives et quantitatives plus précises sur l’érosion hydrique est essentielle afin de mieux concevoir et bien adapter les mesures antiérosives les plus appropriées. Dans la démarche méthodologique d’analyse quantitative de l’érosion, deux approches peuvent être utilisées : (i) mesures directes, (ii) application des modèles mathématiques. Pour la présente étude, la méthode de mesure directe repose sur l’utilisation d’un simulateur de pluie portatif de marque Eijkelkamp tandis que l’équation universelle « USLE » a été adoptée pour la modélisation de l’érosion en nappe. L’objectif de l’étude est d’analyser le degré de corrélation entre l’érosion estimée selon le modèle USLE et l’érosion mesurée ou observée. Dans les trois secteurs de références choisis, 90 sites ont fait l’objet de prospection pédologique pour recueillir toutes les informations nécessaires à la mise en œuvre du modèle USLE. Pour un épisode pluvial de 6mm/mn d’intensité, les mesures directes de l’érosion en nappe avec le simulateur de pluie ont donné une valeur moyenne de 0,8Tonne/Ha pour les 90 sites d’observation. En revanche, la valeur moyenne simulée selon l’équation USLE est 0,43 Tonne/Ha, soit deux fois sous-estimée que celle des valeurs observées. Pour ajuster l’estimation de l’érosion selon le modèle USLE, une courbe de corrélation a été ainsi établie entre les valeurs observées et les valeurs simulées. Les résultats obtenus par le modèle USLE et par le simulateur de pluie permettent de conclure sur l’efficacité de la couverture végétale contre l’érosion et le ruissellement.

Mots-clés : Hautes terres centrales, Sol ferralitique, Erosion en nappe, Modèle USLE, Simulateur de pluie, Variables, Corrélation linéaire

ABSTRACT

In the context of sustainable management of soil resources, the availability of more precise qualitative and quantitative information on water erosion is essential in order to better design and properly adapt the most appropriate anti-erosion measures. In the methodological approach of quantitative erosion analysis, two approaches can be used : (i) direct measurements, (ii) application of mathematical models. For the present study, the direct measurement method is based on the use of an Eijkelkamp portable rain simulator while the universal equation "USLE" was adopted for the modeling of sheet erosion. The objective of the study is to analyze the degree of correlation between the erosion estimated according to the USLE model and the erosion measured or observed. In the three reference sectors chosen, 90 sites were the subject of soil surveys to collect all the information necessary for the implementation of the USLE model. For a rainfall episode of 6mm/min in intensity, direct measurements of sheet erosion with the rain simulator gave an average value of 0.8Tonne/Ha for the 90 observation sites. On the other hand, the average value simulated according to the USLE equation is 0.43 Tonne/Ha, which is twice underestimated than that of the observed values. To adjust the estimate of erosion according to the USLE model, a correlation curve was thus established between the observed values and the simulated values. The results obtained by the USLE model and by the rain simulator make it possible to conclude on the effectiveness of plant cover against erosion and runoff.

Key-words : Central highlands, Ferralitic soil, Sheet erosion, USLE model, Rain simulator, Variables, Linear correlation

INTRODUCTION

A Madagascar, l'érosion potentielle est énorme en raison des pentes fortes, de la pluviométrie élevée, et de la violence des précipitations. Selon les études et les recherches sur l'érosion effectués à Madagascar, le pays est l'une des régions du monde où l'érosion est la plus violente. En effet, la moyenne pour l'ensemble de Madagascar, serait de l'ordre de 4,05 mm/an soit il suffirait de 250 ans environ pour provoquer l'ablation d'un mètre de sol sur l'ensemble des bassins versant (Rossi, 1979). En revanche, le chiffre moyen fourni par F. Fournier (1962) pour l'Afrique est de 0,5 mm/ an, il est de 0,4 mm/an pour l'ensemble du monde (Rossi, 1979). Dans le cadre d'une gestion durable des ressources en eau et en sol, la disponibilité des informations qualitatives et quantitatives en termes d'érosion hydrique est essentielle afin de mieux concevoir et bien adapter les mesures antiérosives les plus appropriées. Dans la démarche d'analyse quantitative de l'érosion, les méthodes disponibles peuvent être regroupées en deux approches méthodologiques : (i)

méthodes de mesures directes, (ii) méthodes des mesures indirectes. Les méthodes de mesures directes permettent de déterminer avec une grande précision la perte en terre réellement sortie d'une entité spatiale donnée à l'issue d'un épisode pluvial donné. Les mesures directes peuvent se faire à l'échelle des placettes ou parcelles jusqu'à l'échelle de bassin versant. Autrement dit, la taille de l'entité spatiale de mesure peut varier de quelques dizaines de cm² jusqu'à quelques km², selon les objectifs de l'étude. En condition naturelle ou sous pluie simulée, cette approche permet de comparer les effets des différents aménagements agricoles ou sylvicoles sur l'érosion. Quant aux méthodes de mesures indirectes, elles sont basées sur l'utilisation des équations mathématiques. Parmi les modèles empiriques existants, l'équation de prédiction « USLE » est la plus connue et la plus utilisée jusqu'à maintenant. L'USLE est le seul modèle suffisamment calibré pour être appliqué dans un grand nombre de pays où le ruissellement est lié à la dégradation de la surface du sol (Roose, 1994). Malgré les limites ou contraintes du modèle USLE, il reste toujours la référence et se développe encore pour être adapté aux conditions locales de plusieurs pays. C'est pourquoi, la présente étude se propose d'analyser le degré de corrélation entre l'érosion estimée selon le modèle USLE et l'érosion mesurée directement avec un simulateur de pluie.

MATERIELS ET METHODES

Zone d'étude et localisation des sites d'observation pédologique

La zone d'étude comprend trois secteurs de référence dans les paysages ferrallitiques des hautes centrales malagasy. Le premier secteur coïncide au bassin versant de Jabokely qui se situe à une trentaine de kilomètres au Nord d'Antananarivo. Quant au deuxième secteur, il correspond au bassin versant de Tsindra dans le District d'Ambatofinandrahana, Région Amoron'i Mania. Le troisième secteur concerne la cuvette d'Ambalavao, Région Haute Matsiatra. Au total, 90 sites d'observation ont été sélectionnés et ont fait l'objet de prospection pédologique. En moyenne, 30 sites d'observation par secteur ont été prospectés. Les 90 sites étudiés comprennent trois types d'utilisation de sol : (i) parcelles de cultures pluviales (n=38), (ii) espaces herbeux ou savane herbeuse (n=29), (iii) parcelles de reboisement (n=23).

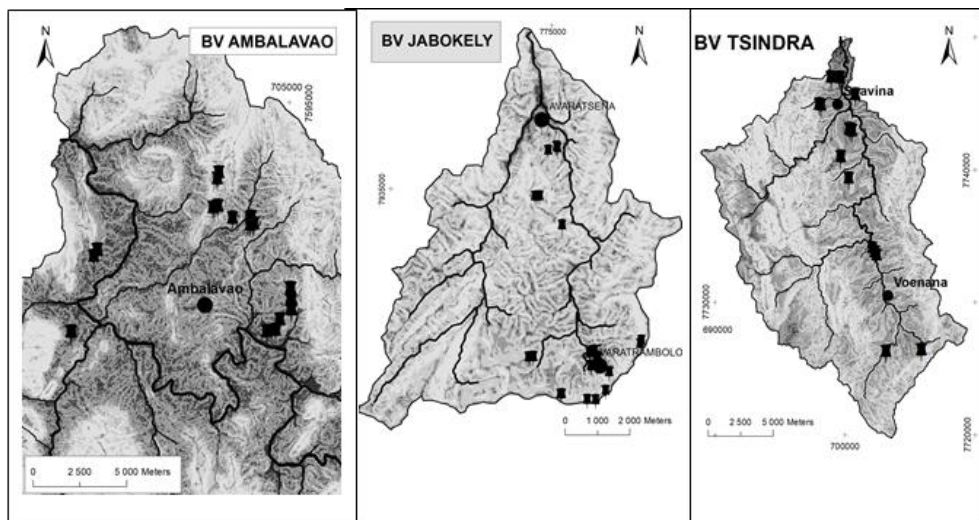


Figure 1 : Localisation géographique des 90 sites d'observation répartis dans les trois secteurs de référence

Base conceptuelle du modèle USLE

Parmi les modèles empiriques existants de prédiction de perte en terre, l'équation conçue et mise au point par Wischmeier et Smith en 1978 est la plus connue et la plus utilisée jusqu'à maintenant. L'USLE est le seul modèle suffisamment calibré pour être appliqué dans un grand nombre de pays où le ruissellement est lié à la dégradation de la surface du sol (Roose, 1994). Ce modèle mesure uniquement l'érosion en nappe et ne permet pas ainsi de prendre en compte de l'érosion linéaire (rigole, ravinement, lavaka) ni de l'érosion en masse comme l'éboulement. En outre, il ne s'applique que pour des données moyennes sur 20 ans et n'est donc valable à l'échelle de l'averse (Roose, 1994). L'équation universelle de pertes en sol est une fonction multiplicative des cinq facteurs qui contrôlent l'érosion hydrique : (i) érodibilité du sol (K), (ii) indice d'érosivité de la pluie (R), (iii) facteur topographique (SL), (iv) facteur couvert végétal (C), (v) facteur des pratiques antiérosives (P). La formulation de l'équation empirique USLE se présente ainsi comme suit :

$$\text{Erosion (E)} = \text{R} * \text{K} * \text{SL} * \text{C} * \text{P} \quad (1)$$

Détermination des cinq facteurs du modèle USLE

Indice d'érosivité de pluie (R)

Cet indice est égal à l'énergie cinétique des pluies, que multiplie I_{30} (Intensité maximale des pluies durant 30 minutes exprimée en cm par heure). L'indice d'érosivité de pluie correspond aux risques érosifs potentiels dans une région donnée

où se manifeste l'érosion en nappe sur une parcelle nue de 9 % de pente (Roose, 1994). Pour la présente étude, l'indice d'érosivité de pluie qu'on a appliqué dans les calculs est celui du simulateur de pluie. Cela permet de mieux comparer les résultats issus des deux méthodes utilisées dans l'étude. Tel que mentionné, le simulateur a été calibré pour générer une pluie dont l'intensité est de 6 mm/mn et l'indice d'érosivité **R** est estimé à 4,32 MJ.mm/ha.mn.

Erodibilité du sol (K)

En tant que matériau plus ou moins cohérent, l'érodibilité d'un sol est sa résistance à deux sources d'énergie : d'une part, la battance des gouttes de pluies à la surface du sol et d'autre part, l'entaille du ruissellement entre les mottes, dans les griffes ou les rigoles (Roose, 1994). D'après le nomographe de Wischmeier, quatre variables interviennent dans la détermination de l'érodibilité du sol : (i) la teneur en matière organique, (ii) la composition granulométrique ou texture, (iii) la structure du sol, et (iv) la perméabilité du sol. Des appréciations visuelles, des mesures et des prélèvements systématiques d'échantillons des sols ont été ainsi faits pour pouvoir calculer l'érodibilité des sites étudiés selon une équation basée sur le nomographe de Wischmeier. La structure du sol a été décrite et déterminée par une simple appréciation visuelle de l'horizon superficielle tandis que la perméabilité du sol a été évaluée à l'aide d'un infiltromètre pour une durée de 45 mn. Les teneurs en matière organique et la granulométrie sont déterminées au laboratoire du sol. Pour faciliter l'évaluation de l'érodibilité des sols, l'équation suivante a été conçue sur la base de nomographe de Wischmeier :

$$100 K = [2,1M1,14 * 10^{-4}(12 - MO) + 3,25(S - 2) + 2,5(P - 3)] * 0,1317 \quad (2)$$

avec M = (% Sable fin + Limon) (100 - % Argile),

MO = % Matière organique,

P = 1 (code de perméabilité pour tous les sites dont le drainage est rapide),

S = 2 (code de la structure pour tous les sites dont les structures de l'horizon de surface sont presque uniformes, granulaires fins à grumeleuse fines)

Facteur topographique (SL)

Ce facteur comprend la longueur de pente et l'inclinaison de la pente. Il varie de 0,1 à 5 dans les situations les plus fréquentes de culture en Afrique de l'Ouest et peut atteindre 20 en montagne (Roose, 1994). Le facteur SL est un facteur unique adimensionnel qui peut être déterminé par l'équation suivante :

$$LS = [0,065 + 0,0456*A + 0,006541*A^2] (B \div \text{constante})^{NN} \quad (3)$$

où A = inclinaison de la pente exprimée en %. Dans la présente étude, les valeurs de la pente des 90 sites d'observation ont été calculées à partir du modèle numérique de

terrain (MNT), de NASADEM dont la résolution est de 1 seconde d'arc soit environ 30 mètres ;

B = Longueur de la pente qui est fixée à 30 mètres pour tous les sites d'observation ; cette valeur correspond à la résolution du modèle numérique de terrain de NASADEM ;

Constante = 22,1 en système métrique rappelle la longueur des parcelles expérimentales de Wischmeier ;

NN = 0,5 puisque les pentes de tous les sites observés sont supérieures à 5%.

Facteur couvert végétal (C)

Pour éviter les approximations qualitatives, son évaluation a été faite à partir de l'indice de végétation appelé NDVI. Dans le cadre de cette étude, l'indice NDVI a été calculé à partir du traitement des images satellitales de Landsat 8 Oli. Une fois déterminé, le NDVI correspondant aux trois secteurs étudiés, le calcul du facteur C du couvert végétal a été fait à l'aide de l'équation proposé par De Jong. Certes, de nombreux modèles sont proposés pour le calcul du C, mais celui de De Jong reste le plus utilisé dans le monde en raison de la forte corrélation du NDVI avec la densité de la couverture végétale. La détermination du facteur relatif à l'état du couvert végétal est effectuée par l'équation suivante :

$$C = 0.431 - 0.805 * NDVI \quad (4)$$

Facteur des pratiques antiérosives (P)

Une approximation sur les valeurs du facteur relatif aux pratiques antiérosive a été adoptée dans la mesure où les 90 sites d'observation ne comportent tous aucun dispositif antiérosif. En effet, la valeur de P est considérée égale à 1 pour tous les sites d'observation.

Mesure directe de l'érosion à l'aide du simulateur « Eijkelkamp »

Le simulateur de pluie utilisé est un modèle conçu et calibré par la société néerlandaise Eijkelkamp. Avec cet appareil, la pluie est simulée sur une surface inclinée, ne dépassant pas le 40%. Les gouttes tombent sur la surface inclinée par des petits capillaires dans la plaque sous un cylindre rempli d'eau. Une fois à la surface du sol, la goutte détache des particules de sol. Ces particules sont projetées et retombent un peu plus bas sur la pente. L'eau et les particules sont récupérées dans un petit récipient en bas de la pente. Les sédiments collectés sont séchés et pesés afin de calculer directement la perte en terre occasionnée par une pluie simulée dont l'indice d'érosivité **R** est calibrée à 4,32 MJ.mm/ha.mn et le volume est 18 mm. En connaissant le volume de pluie simulée ainsi que la quantité de l'eau ruisselée et

récupérée dans le récipient après l'épisode pluviale, le taux de ruissellement et le taux d'infiltration du sol étudié sont facilement déterminés.



Figure 2 : Mesures directes de l'érosion à l'aide d'un simulateur portatif, (marque Eijkelkamp) et de la perméabilité du sol avec un infiltromètre

RESULTATS ET DISCUSSION

Facteur topographique LS des sites d'observation

En moyenne, la valeur de l'inclinaison des sites d'observation est de l'ordre de 14,30%, avec une valeur minimale de 3% et une valeur maximale de 35%. Pour l'ensemble des sites, le facteur topographique est en moyenne de 2,8. Avec une valeur moyenne de 0,36, le risque d'érosion lié à la topographie semble être moindre pour les pentes faibles (moins de 5%), En revanche, le risque d'érosion par l'érosion en nappe, augmente rapidement à partir de la barre d'inclinaison de 5%, En effet, comparé à celui de pentes faibles, le facteur topographique est cinq fois plus grand pour les pentes modérées (5 à 15%) et treize fois plus important pour les pentes fortes (>15%). Sans mesures antiérosives appropriées ou dépourvue de couverture végétale, les sites localisés sur des pentes au-dessus de 5% présentent ainsi un risque élevé de perte en terre par l'érosion en nappe. En appliquant la classification de GEPPA, 1981 (Denis Baize and Jabiol, 1995), sur la relation entre les pentes et les risques d'érosion par ruissellement, 96% des sites d'observation présentent des « risques entre modérés et importants ». En se référant aux travaux de recherches sur « les principaux pédopaysages de Madagascar », ayant analysé la relation étroite entre la topographie et le type de sols, la morphologie des profils de ces sites est moyennement à fortement rajeunie par l'érosion par ruissellement

(Randriamboavonjy, 1996). Le tableau 1 suivant indique quelques valeurs statistiques du facteur topographique en fonction de la pente sur les 90 sites d'observation.

Tableau 1 : Facteur topographique selon la pente sur les sites d'observation

Classe de pentes	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Forte ($\geq 15\%$)	40	2,59	11,28	4,76	2,03
Modérée (5 à 15%)	42	0,67	2,32	1,40	0,49
Faible ($< 5\%$)	8	0,30	0,41	0,36	0,05
Ensemble sites	90	0,30	11,28	2,80	2,26

Erodibilité des sols dans les sites d'observation

Tel qu'il a été mentionné précédemment, les types de sols des sites d'observation appartiennent au sous-groupe de sols ferralitiques moyennement à fortement rajeunis. L'érosion par ruissellement constitue la cause principale de l'évolution de ces sols, en modifiant continuellement les caractéristiques physiques et morphologiques de leurs profils pédologiques. En effet, l'érosion tronque le profil et provoque le dépôt sur la partie restante de matériaux peu évolués (CPCS, 1967). Dans le cadre de cette étude, la texture a été retenue pour différencier les types de sols des sites d'observation. En reportant les analyses granulométriques des échantillons de sols des horizons superficiels, sur le diagramme ternaire proposé par USDA, les sols étudiés peuvent être ainsi catégorisés en trois groupes de texture : (i) Sableux (loamy sandy), (ii) Limono-argilo-sableux (sandy clay loam), et (iii) Limono-sableux (sandy loam). En moyenne, l'érodibilité des sols calculés selon l'équation (1/1) est de l'ordre de 0,06, valeur caractéristique des sols ferralitiques des hautes terres et des falaises de Madagascar considérée comme faible (Andriamampianina, 1997). D'après le tableau 2 suivant, les sols à texture plus grossière (sableux et limono-sableux) sont plus érodables que les sols à texture plus fine (limono-argilo-sableux).

Tableau 2 : Erodibilité des sols des sites observés selon la texture

Texture	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Sableux	8	0,06	0,08	0,07	4,57E-03
Limono-sableux	70	0,04	0,07	0,06	6,38E-03
Limono-argilo-sableux	12	0,04	0,07	0,05	6,61E-03
Ensemble Sites	90	0,04	0,08	0,06	8,11E-03

En revanche, d'après la classification établie par Stone et Hilborn, 2002 pour les sols canadiens, plus la texture est fine, plus l'érodibilité du sol est élevée pour les sols de même teneur en matière organique. En effet, pour les sols dont la teneur en matière organique est plus de 2%, l'érodibilité des sols argileux est évaluée à 0,21 contre 0,06 pour les sols sableux (Stone R.P and Hillborn D., 2002).

Selon le tableau 3 ci-dessous, les valeurs moyennes ne permettent pas de différencier l'effet du type du couvert végétal sur l'érodibilité des sols. L'efficacité d'une meilleure couverture végétale sur le contrôle de l'érodibilité des sols, est mise en évidence par les valeurs minimale et maximale. En effet, les parcelles de reboisement affichent ainsi les valeurs extrêmes les plus faibles par rapport à celles des deux autres types d'utilisation du sol.

Tableau 3 : Erodibilité des sols des sites observés selon l'utilisation des sols

Utilisation du sol	N	Minimum	Maximum	Moyenne	Ecart-type
Parcelle de cultures pluviales	38	0,05	0,08	0,06	7,21E-03
Parcelles de reboisement	23	0,04	0,07	0,06	9,25E-03
Savane herbeuse	29	0,04	0,08	0,06	7,98E-03
Ensemble de sites	90	0,04	0,08	0,06	8,11E-03

Pour les parcelles sous boisement ou savane herbeuse suffisamment dense, les sols sont plus résistants à l'action destructrice des gouttes de pluie. Par ailleurs, selon la figure 3 ci-dessous, une bonne couverture végétale confère une meilleure perméabilité des sols de manière à limiter également l'arrachement des particules par l'eau de ruissellement. Le graphe ci-après illustre l'effet positif des actions de reboisement sur le contrôle de l'érodibilité du sol en augmentant significativement la vitesse d'infiltration d'eau.

Erosion des sols dans les sites d'observation

Malgré la taille assez réduite de la surface utilisée (625 cm²) par le simulateur de pluie, les résultats qu'ils ont générés permettent d'évaluer la validité des résultats obtenus par le modèle USLE sur l'érosion en nappe des sols. Pour un épisode pluvial de 6mm/mn d'intensité, les mesures directes de l'érosion en nappe avec le simulateur de pluie ont donné une valeur moyenne de 0,8Tonne/Ha pour les 90 sites d'observation. En revanche, la valeur moyenne estimée selon l'équation USLE est 0,43Tonne/Ha, soit deux fois sous-estimée que celle des valeurs mesurées à l'aide du simulateur de pluie.

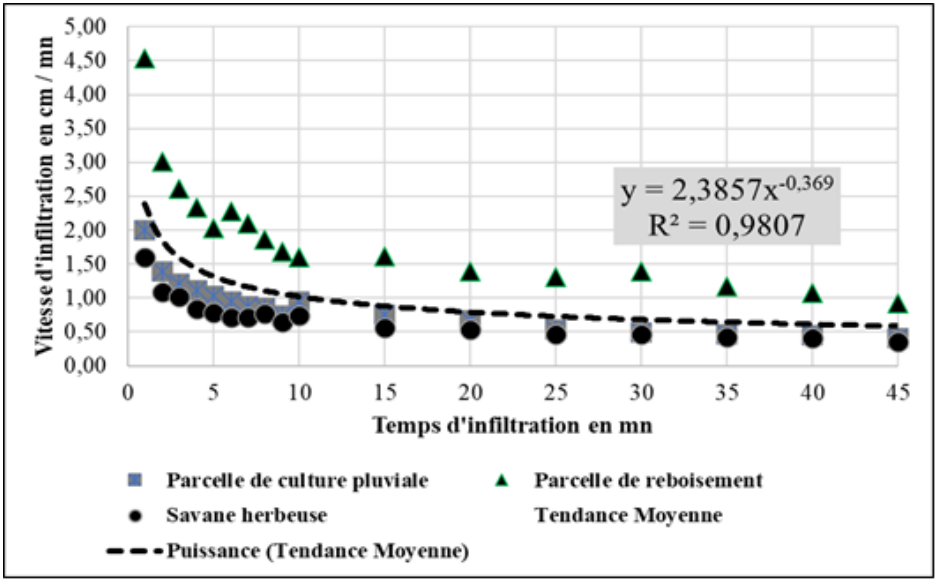


Figure 3 : Evolution de la vitesse d'infiltration selon le type d'utilisation des sols

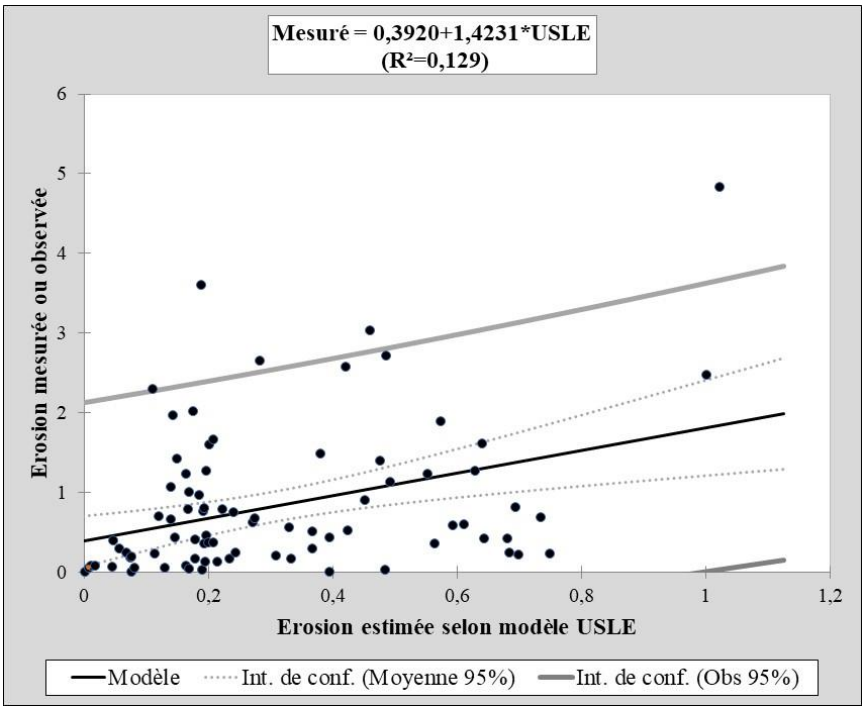


Figure 4 : Régression linéaire entre l'érosion estimée avec USLE et l'érosion mesurée directement avec le simulateur de pluie

La figure 4 synthétise les résultats de la modélisation en régression linéaire entre l'érosion estimée avec le modèle USLE et l'érosion mesurée avec le simulateur de pluie. Le graphique ci-dessous montre l'existence d'une tendance linéaire entre les deux variables étudiées, mais avec une grande variabilité des données (dont cinq se trouvent en dehors de l'intervalle de prédiction) autour de la droite de régression. Etant donné le $R^2 = 0,129$, nettement inférieur à 1, le niveau de corrélation entre l'érosion mesurée par le simulateur de pluie et celle estimée par l'USLE, est faible. En effet, seul 13% de la variabilité des données sur l'érosion mesurée avec le simulateur de pluie est expliquée par la variable «érosion estimée le modèle USLE».

La sous-estimation de l'érosion en nappe par le modèle USLE peut être expliquée par ses limites intrinsèques. Ce modèle s'applique notamment pour des données pluviométriques moyennes sur 20 ans et il n'est pas ainsi valable à l'échelle de l'averse (Roose, 1994). L'équation universelle des pertes en terre USLE prévoit le taux annuel moyen d'érosion à long terme (Rober P. Stone, 2015). Tel qu'il a été déjà mentionné précédemment, on utilise la pluie simulant une averse de 18mm d'une durée de 3mn pour estimer l'érosion avec le modèle USLE. Cette courte durée d'épisode pluvial généré par le simulateur semble être très agressive avec son indice d'érosivité évalué à 260 MJ.mm/ha.heure. A titre comparatif, les valeurs moyennes de l'indice d'érosivité des pluies pour les hautes terres centrales malagasy varient entre 359 et 621 MJ.mm/ha.heure (Andriamampianina, 1997).

Le tableau 4 est un résultat partiel de l'analyse en composante principal de quatre variables qui influent sur l'érosion en nappe. Les valeurs en gras dans cette matrice de corrélation signifient l'existence d'un niveau de corrélation assez élevé entre deux variables (au niveau de signification $\alpha = 0,05$). La matrice de corrélation ci-dessous permet de confirmer l'influence nette des facteurs suivants sur l'érosion en nappe des sites étudiés : (i) la perméabilité du sol, (ii) l'état de couvert végétal (indice C) ; (iii) la pente, et (iv) la teneur en matière organique (MO_%) dans l'horizon superficielle sol. Les deux méthodes utilisées sont ainsi suffisamment sensibles par rapport à ces quatre variables dans l'évaluation de l'érosion.

Tableau 4 : Matrice de corrélation des 04 variables influant sur l'érosion en nappe

Variables	Perméabilité	C	Pente_%	MO_%	E_USLE
Perméabilité	1	-0,446	0,030	0,190	-0,349
C	-0,446	1	-0,256	-0,140	0,435
Pente_%	0,030	-0,256	1	0,179	0,321
MO_%	0,190	-0,140	0,179	1	-0,217
E_USLE	-0,349	0,435	0,321	-0,217	1

Variables	Perméabilité	C	Pente_%	MO_%	E_Observée
Perméabilité	1	-0,446	-0,139	0,190	-0,236
C	-0,446	1	-0,146	-0,140	0,348
Pente_%	-0,139	-0,146	1	-0,010	0,118
MO_%	0,190	-0,140	-0,010	1	-0,298
E_Observée	-0,236	0,348	0,118	-0,298	1

CONCLUSION

L'analyse comparative des résultats issus de l'application des deux méthodes de quantification de l'érosion en nappe permet de d'évaluer leurs points forts et leur limites respectifs. Les deux méthodes utilisées permettent de confirmer le rôle primordial de la couverture végétale dans la protection des sols contre l'érosion en nappe. En effet, l'analyse statistique en composante principale (ACP), indique que parmi les quatre variables étudiées, « l'état du couvert végétal » a la plus grande valeur de coefficient de corrélation avec l'érosion en nappe. L'utilisation du simulateur de pluie permet de mieux évaluer le rôle de la matière organique vis-à-vis de l'érosion. Les sols riches en matière organique sous végétation dense (reboisement ou savane herbeuse), sont nettement moins érodables. Par contre, l'effet de la pente sur l'érosion en nappe est plus évident pour le modèle USLE. En raison de l'échelle très réduite du simulateur de pluie utilisé, l'effet de la pente sur l'érosion mesurée est nettement atténué (coefficient de corrélation faible entre les deux variables). En outre, les coefficients de corrélation de la perméabilité du sol avec l'érosion sont élevés (en valeur absolue) pour les deux méthodes. Malgré l'existence d'une tendance linéaire entre l'érosion mesurée avec le simulateur et l'érosion estimée avec USLE, elle reste faible. L'utilisation de l'équation de ce modèle de corrélation devra être ainsi avec précaution pour d'éventuelle prédiction. Dans le cadre de cette étude, la sous-estimation de l'érosion par le modèle USLE s'explique par ses limites intrinsèques ; il a été conçu pour évaluer l'érosion moyenne annuelle sur la base des moyennes de pluies de longue période (20 à 30 ans). En revanche le simulateur de pluie est destiné à mesurer ponctuellement l'érosion en nappe sur une très petite surface d'ordre centimétrique, avec une pluie préalablement calibrée. Le modèle USLE permet d'estimer l'érosion moyenne annuelle d'une entité spatiale donnée, à partir des informations existantes issues de différentes sources. En appliquant la formule de perte en terre USLE, l'érodibilité du sol, peut être calculée à partir des résultats de l'érosion mesurée directement avec le simulateur de pluie afin d'optimiser l'application du modèle USLE.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Andriamampianina, N. (1997) *Bilan et évaluation des travaux et réalisation en matière de conservation des sols à Madagascar*. N°2. Antananarivo, p. 37.
- 2) CPCS (1967) *Classification Française des sols selon la Commission de Pédologie et de Classification des Sols (CPCS)*, p. 87.
- 3) Denis Baize and Jabiol, B. (1995) *Guide pour la description des sols*. Institut National de la Recherche Agronomique, INRA.
- 4) Randriamboavonjy, J.C. (1996) *Etude des pédopaysages dans quatre zones tests de Madagascar (Côte Est, Hautes Terres Centrales, Moyen Ouest et Côte Ouest)*. Département des Eaux et Forêt. Antananarivo (N°3).
- 5) Roose, E. (1994) *Introduction à la gestion conservatoire de l'eau, de la biomasse et de la fertilité des sols (GCES)*. Rome, Italie: Organisation des Nations Unies pour l'alimentation et l'agriculture.
- 6) Rossi, G. (1979) 'L'érosion à Madagascar: l'importance des facteurs humains', *Les cahiers d'outre-mer*, 32(128), pp. 355–370.
- 7) Stone R.P and Hillborn D. (2002) 'Universal Soil Loss Equation, Ontario, Canada'. Ministry of Agriculture and Food (OMAFRA).

BREEDING FAILURE FACTORS OF THE MADAGASCAR GREBE *TACHYBAPTUS PELZELNII* (HARTLAUB, 1861) IN BEMANEVIKA PROTECTED AREA, SOFIA REGION, NORTHERN MADAGASCAR

par

RASOLONJATOVO Delphin⁽¹⁾, RENE DE ROLAND Lily-Arison⁽²⁾,
RAKOTONDRATSIMA Marius⁽²⁾, ANDRIAMALALA Tolojanahary⁽²⁾,
PRUVOT Yverlin Z. M.⁽¹⁾

(1) Doctoral School of Biodiversity and Tropical Environments, Toliara University, Madagascar

(2) The Peregrine Fund Madagascar Project, Madagascar

ABSTRACT

Analysis of breeding failure factors of the Madagascar grebe *Tachybaptus pelzelinii*, an endemic and endangered waterbird species, was conducted between October 2020 and April 2021 in Bemanevika wetlands Protected Area. Direct observation using a binoculars and spotting scope was adopted to census the nests and breeding individuals, and to monitor the nesting evolution. Camera traps were used to determine the hatching failure factors. The half-covered board method was employed to understand the influence of aquatic vegetation. We also considered weather conditions during the data analyses. A total of 91 nests and 199 breeding individuals were found. Although, aquatic vegetation provided better conditions for nesting, submerged vegetation was not a common characteristic required by *Tachybaptus pelzelinii* during the nesting habitat selection. 55.89 % (N = 11) of nest destruction was due to water level fluctuations and occurred during a daily rainfall of more than 25 mm. Of the 222 eggs laid in 75 monitored nests, only 33.78% (N = 75) hatched, and 21.17% (N = 47) of those hatchings fledged. Predation by *Polyboroides raduatus* (55.78 %; N = 82) and *Rattus rattus* (17.68 %; N = 26) was the main cause of the hatching failure. The breeding success of Madagascar grebe was also limited by nests destruction via congeners, eggs falling, disappearance of newly hatched chicks, predation of adults and young and human disturbance. These results were used to design and test an effective technique for improving the productivity of this threatened species.

Key-words : Breeding failure factors, *Tachybaptus pelzelinii*, Bemanevika Protected Area

RESUME

L'analyse des facteurs d'échec de reproduction du Grèbe malgache *Tachybaptus pelzelinii*; une espèce d'oiseau aquatique endémique et menacée, a été menée entre octobre 2020 et avril 2021 dans les zones humides de l'Air Protégée de Bemanevika. L'observation directe moyennant d'une jumelle et d'un télescope a été adoptée pour localiser les nids, recenser les individus et suivre l'évolution de nidification. Le piège photographique a été utilisé pour déterminer les facteurs d'échec à l'éclosion. La méthode « Half-covered board » a permis de comprendre l'influence de la végétation aquatique. Les conditions météorologiques ont été prises en compte dans les analyses des données. 91 nids et 199 individus reproducteurs ont été trouvés. La présence de végétation aquatique offre des conditions favorables pour la nidification, mais elle ne constitue pas une caractéristique commune exigée chez *Tachybaptus pelzelinii* durant la sélection d'habitat de nidification. 55,89 % (N = 11) de destruction des nids sont dues aux fluctuations de niveau d'eau, après une précipitation journalière plus de 25 mm. Sur 222 œufs pondus dans 75 nids suivis, 33,78 % (N = 75) ont pu éclore et 21,17 % (N = 47) des poussins éclos ont réussi à s'envoler. L'échec à l'éclosion de 147 œufs est dû surtout à la prédation par *Polyboroides raduatus* (55,78 %, N = 82) et *Rattus rattus* (17,68 % ; N = 26). La destruction des nids par les congénères, la chute des œufs, la disparition des poussins, la prédation des adultes et jeunes, et la perturbation humaine constituent également des facteurs limitatifs du succès de reproduction de l'espèce étudiée. Ces résultats nous ont aidés à concevoir puis tester une technique qui s'est avérée efficace pour améliorer la productivité de cette espèce.

Mots-clés : Facteurs, Echec de la reproduction, *Tachybaptus pelzelinii*, Aire Protégée de Bemanevika

INTRODUCTION

The Madagascar Grebe, *Tachybaptus pelzelinii*, is an exclusively aquatic bird, endemic to Madagascar and indicator of aquatic ecosystems quality (Géroudet P., 1946, Fjeldsa J., 2004). During the last forty years, its population has been declining and the species has been classified as globally Endangered (EN) (BirdLife international, 2020; IUCN 2020), due to anthropogenic pressures on wetlands such as the massive loss of wetlands through deforestation of watersheds, invasion of exotic species, hunting, entanglement in fishing nets, conversion of wetlands, and chemical pollution from pesticide use in agriculture (BirdLife international, 2020).

Bemanevika Protected Area (PA) has been designated as the most important area in terms of Madagascar Grebe abundance (BirdLife international, 2018). Due to

their volcanic origin, the Bemanevika wetlands are unsuitable for human use (Woolaver L. et al., 2015). Furthermore, conservation efforts of The Peregrine Fund (TPF) Madagascar Project decrease the importance of anthropogenic pressures in this PA. However, the population of the Madagascar Grebe in the Bemanevika PA did not increase and the breeding success of the species seems to be low (*obs. pers*), probably due to factors other than human activities. Given the importance of data on the breeding biology for the conservation of the endangered Madagascar Grebe, this study was conducted with the aims to determine different factors of breeding failure and to test a technique for improving the species' breeding success.

MATERIALS AND METHODS

Study site

Fieldwork was conducted in the Bemanevika PA (14°10' – 14°35' S, 48°25' – 48°50' E), which is located in the northern highlands of Madagascar, in the District of Bealanana (Figure 1). This PA has an area of 35,605 ha and received definitive status as an IUCN Protected Area Category V (Protected Landscape) in April 2018, according to Decree No 2015-782. The site is comprised of 700 to 1800 m in elevation and includes four ecosystems: marshes, lakes, fragmented rain forest and savanna. The climate is tropical and humid (Donque G., 1998), and there are two distinct seasons in the Bemanevika PA : a dry season from May to October and a rainy season from November to April (Rakotoson M., 2010, unpublished data). Between 2014 and 2018, the average annual precipitation recorded at the TPF research station in Bemanevika was 2362 mm, and the average daily temperature ranged from 11.4 °C to 25.0 °C. The coldest season is between June and August when daily minimum temperatures can dip below 1 °C. The warmest season occurs from November to December with daily maximum temperature reaching up to 30 °C (The Peregrine Fund, unpublished data).

The wetlands of the Bemanevika PA, composed of lakes, marshes, swamps and rivers, comprise an area of 10,000 ha and were designated a Ramsar site (wetlands of international importance) in February 2017 (Ramsar, 2017). These wetland ecosystems provide habitat for several bird species, including seven endemic and threatened species : Madagascar Pochard *Aythya innotata* (CR), Madagascar Grebe *Tachybaptus pelzenii* (EN), Madagascar Pond-Heron *Ardeola idae* (EN), Meller's Duck *Anas melleri* (EN), Slender-billed Flufftail *Sarothrura watersii* (EN), Madagascar Harrier *Circus macrosceltes* (EN), and Madagascar Rail *Rallus madagascariensis* (VU) (IUCN, 2021).

Surveys were made at five sites: Matsaborimena Lake (35 ha), Andrankanala Lake (65 ha), Matsaborimaitso Lake (20 ha), Maramarantsalegy Lake (30) and

Ambatomainty River. All the lakes are of volcanic origin and their depths ranged from 2 – 2.82 m for Matsaborimena, 10.85 – 11.53 m for Matsaborimaitso, 43.25 – 75.58 m for Maramarantsaley and 12.20 – 83.31 m for Andriakanala (The Peregrine Fund 2014). They are permanent lakes of shallow fresh water and are surrounded by rain forest vegetation.

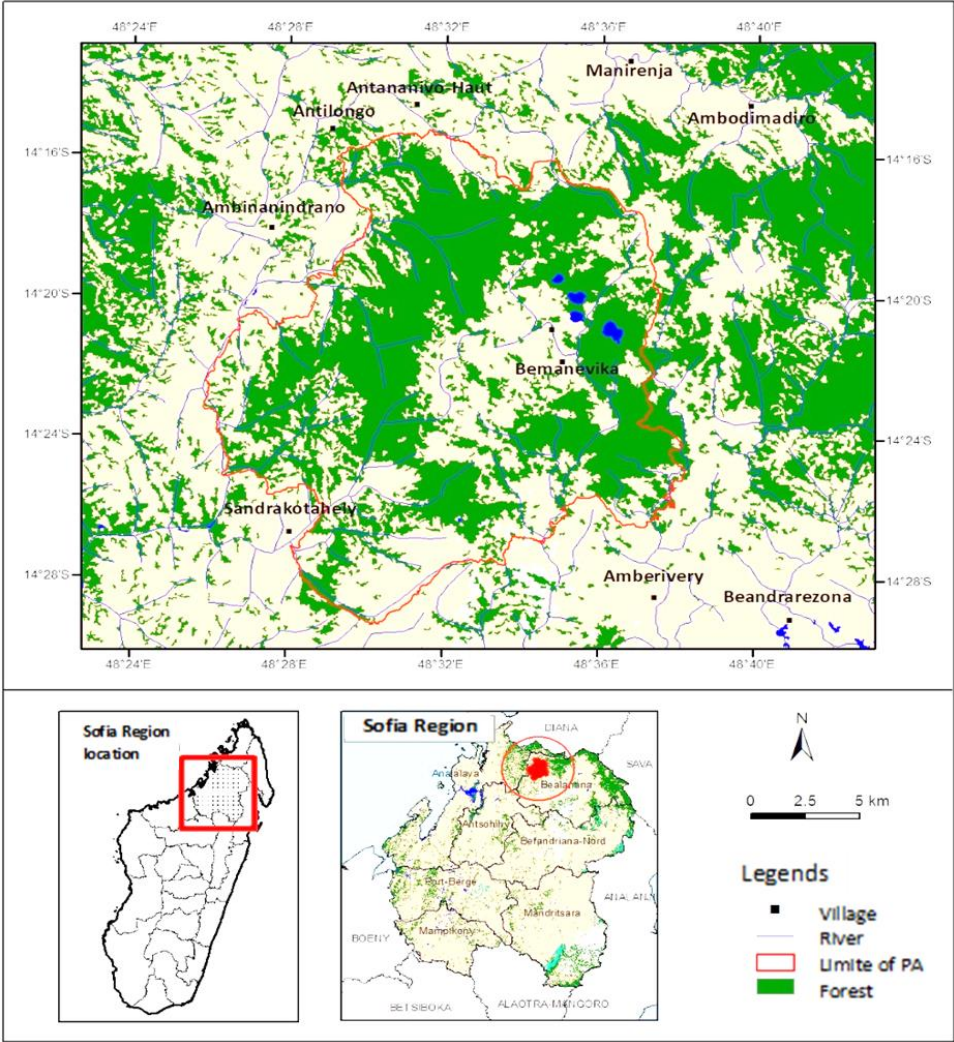


Figure 1 : Location map of Bemanevika PA (TPF, 2020)

Data collection

This study was conducted during one breeding season, from October 2020 to April 2021. Direct observations using binoculars and spotting scope were used to search for nests, to census the breeding individuals as well as to monitor the reproductive parameters. Nest searches were conducted by walking slowly along the

lakeshores or using a small fiberglass canoe, depending on the study sites accessibility. Each site was visited every two days to find and control the nests. The nests found were individually marked with numbered sticky paper attached to vegetation around the nest. Marking was done through alpha-numeric numbering (e.g. « TAPE1 » means nest number one of *Tachybaptus pelzelinii*). Locational fixes of each nest were recorded using a handheld Etrex 10 Garmin GPS. Nesting habitat parameters included plants, water depth, and distances from the lakeshore were also recorded.

As the Madagascar Grebe does not show sexual dimorphism (Lagrang O, 1995), an appropriate protocol was used to count breeding individuals. Grebe species are highly territorial during the breeding season (Bandorf H., 1970, del Hoyo J. et al., 1992, Fjeldsa J., 2004). This situation allows to distinguish three categories of birds: (1) breeding pairs or trios with nests or chicks, (2) pairs or trios without nests (individuals parade but failed to nest), and (3) non-breeding adults. During this study, the identification of these three categories was made in three distinct periods: (1) in early December 2020 to determine the number of early breeding pairs or trios and courtship pairs or trios, (2) in mid-January 2021 to count pairs with nests and existing family groups, courtship pairs or trios, and non-breeding adults, and (3) at the end of February 2021 to determine the number of late breeding pairs or trios and non-breeding adults.

Systematic nest monitoring was necessary to estimate breeding success as well as to determine causes of breeding failure. Nests were regularly checked from their construction to dispersal of young. Any loss of nests, eggs and chicks, and factors affecting the damage of eggs and chicks were also recorded.

We also used camera traps (Figure 2) to obtain information on any changes that occurred in targeted nests (N = 13). The cameras were fixed on a support located at about 1.5 m from the nest and placed at 50 to 90 cm in height. Two Reconyx cameras were used and activated in camera mode. These cameras recorded photos every 30 seconds when detecting movement.



Figure 2 : Camera trap ((left) and nest monitored by Camera trap (right)

During the chicks rearing period, the evolution of family size (number of individuals) was followed from the hatching period to the young fledging period. Adults and young were counted once a week in the early morning or in the late afternoon, when a maximum of individuals emerge from the vegetation of the lakes. Based on the hatching date, size and appearance of young, four age classes were arbitrarily established: 0 to 2 week(s), 2 to 4 weeks, 4 to 6 weeks and over 6 weeks. The number of young successfully reared per family and per pair and the evolution of young number for each age class were determined.

Some detected families (N = 31) were regularly followed with a binocular and spotting scope. The observations were made for 3 to 7 hours, from a platform allowing an overview of the targeted families' habitats. Parameters such as the influence of food given by parents to chicks, the frequency and effects of human disturbances, and potential predators of young were also recorded during the observations.

The success different breeding stages, from nest building to hatching period, can be influence by aquatic vegetation thanks to its protective function against waves. Thus, the protective vegetation screen around each nest was evaluated using the "half covered board method" (Renevey B., 1988) by considering the cover and height of the vegetation in four square meter around the nest. The cover was determined from visual observations and estimated as an average percentage of the observer assessments (two or three observers). The height of the vegetation was taken from the bottom of the water, in the four sections of the quadrat centered at the nest.

When the factors of breeding failure were determined, we designed and tested on 15 nests a technical system to improve the productivity of the studied species. This technique consisted in setting up a protection device for each target nest (Figure 3).



Figure 3 : Nest protected (left) and a predator attacking a protected nest (right)

Data analysis

Data obtained during the nests monitoring were analyzed with the meteorological data that are available at the TPF research station in the Bemanevika PA. Descriptive results were expressed as means and/or percentages. Mean values are given \pm SD (standard deviation). Parametric tests (data confirmed to a normal distribution) were used after checking for normality with the Shapiro-Wilk test (Dytham C., 2011). The null hypotheses for statistical tests are rejected at $p < 0.05$. All statistical analyses were performed with STATISTICA 10.0 (StatSoft, Tulsa, USA). One-way ANOVA test was used to compare the means of water depth of nesting sites among the five sites. Student's t-test was used to compare these depth means in pairs. Pearson's correlation test was used to assess relationships between water depth and the number of nests in the study wetlands. Chi-square (χ^2) test was used to compare the breeding success in the nests with and without a protection device.

RESULTS

Number of breeding individuals and nests

A total of 199 individuals were counted at the five study sites, involving 74 breeding pairs and 17 breeding trios (Table 1). Most of these individuals (46.23 %; $N = 92$: 34 pairs and 08 trios) were recorded at Matsaborimena Lake.

We also located 91 nests, among which 42 nests (46.15 %) were located at Matsaborimena, 15 nests (16.48 %) at Matsaborimaitso, 13 nests (14.29 %) at Ambatomainty River, 12 nests (13.19 %) at Maramarantsalegy and nine (09) nests (9.89 %) at Andriakanala. The distribution of nests in the study sites was negatively correlated with the water depth (Person's correlation test: $r = - 0.57$; $p = 0.32$). The number of nests decreased with the increase of the water depth. Thus, the water depth influenced the nest installation of Madagascar Grebe in a given site.

During the study period, 75 (82.42 %) of 91 located nests were systematically monitored, including 65 nests for pairs and 10 nests for trios, for a total of 160 monitored breeding individuals (Table 1). A total of 222 eggs were laid in the 75 monitored nests. Out of these 222 eggs, 75 (33.78 %) hatched and 147 (66.22 %) failed (predated and destroyed). Of the 75 chicks hatched, 47 (62.67 %) fledged, and the breeding success rate was only 21.17 % (ratio of the number of chicks fledged to the number of eggs laid expressed as a percentage) (Table 1).

Table 1 : Breeding parameters of Madagascar Grebe in five studies wetlands of Bemanevika PA

Parameters	Study sites					Bemanevika PA
	Ambatomainty	Andriakanala	Maramarantsalegy	Matsaborimaitso	Matsaborimena	
Localized nests	13	9	12	15	42	91
Breeding pairs	11	6	11	12	34	74
Breeding trio	2	3	1	3	8	17
Breeding individuals	28	21	25	33	92	199
Monitored pairs	11	5	12	5	32	65
Monitored trios	2	1	1	1	5	10
Monitored nests	13	6	13	6	37	75
Eggs laid	39	10	23	32	118	222
Eggs hatched	33	2	13	10	17	75
Hatching success rate (%)	84.62	20	56.52	31.25	14.41	33.78
Chicks at hatching	33	2	13	10	17	75
Chicks fledged	19	2	8	6	12	47
Fledging success rate (%)	57.58	100	61.54	60	70.59	62.67
Breeding success rate (%)	48.72	20	34.78	18.75	10.17	21.17
Mortality rate (%)	51.28	80	65.22	81.25	89.83	78.83

Distribution of nests in relation to water depth

The nests were built on water with depth varying from 54 cm to 650 cm (Mean = 91.6 cm, SD = 81.2). Out of the 75 monitored nests, 78.7 % (N = 59 nests) were built on the water 50 – 150 cm in depth, 12.5 % (N = 09 nests) were placed on water deeper than 150 cm, and only 9.3 % (N = 07 nests) were placed on water less than 50 cm deep. The means of water depth at the nesting location was not significantly different between the study sites (ANOVA: $F_{3,34} = 2.226$; $P = 0.103 > 0.05$). However, comparative two by two with Student’s t-test showed that the non-significant differences in water depth were observed only between Ambatomainty and Andriakanala, Ambatomainty and Maramarantsalegy, and Andriakanala and Matsaborimaitso (Table 2).

Table 2 : Comparison matrix of means water depths at the nest’s location between the study sites.

Study sites	Andriakanala	Maramarantsalegy	Matsaborimaitso	Matsaborimena
Ambatomainty	t = 1,49; p = 0,18	t = 2,10; p = 0,06	t = 3,65; p = 0,01	t = 4,84; p = 0,3.10 ⁻³
Andriakanala		t = 2,90; p = 0,02	t = 1,91; p = 0,10	t = 3,16; p = 0,02
Maramarantsalegy			t = 4,62; p = 0,004	t = 4,62; p = 0,02
Matsaborimaitso				t = 4,62; p = 0,004

Factors of breeding failure

The breeding success of the Madagascar Grebe in Bemanevika PA was limited by a variety of factors. The impacts of these factors included nest destruction and mortality of eggs, chicks and adults.

Nest destruction

25.33 % (N = 19) of monitored nests (N = 75) were destroyed, including 10 active nests (i.e. contained at least one egg) and nine (09) inactive nests. 57.89 % (N = 11 nests) of the destroyed nests were caused by water level fluctuations, 36.84 % (N = 07 nests) by waves, and 5.26 % (N = 01 nest) by congeners (attack resulted by competition) (Figure 4).

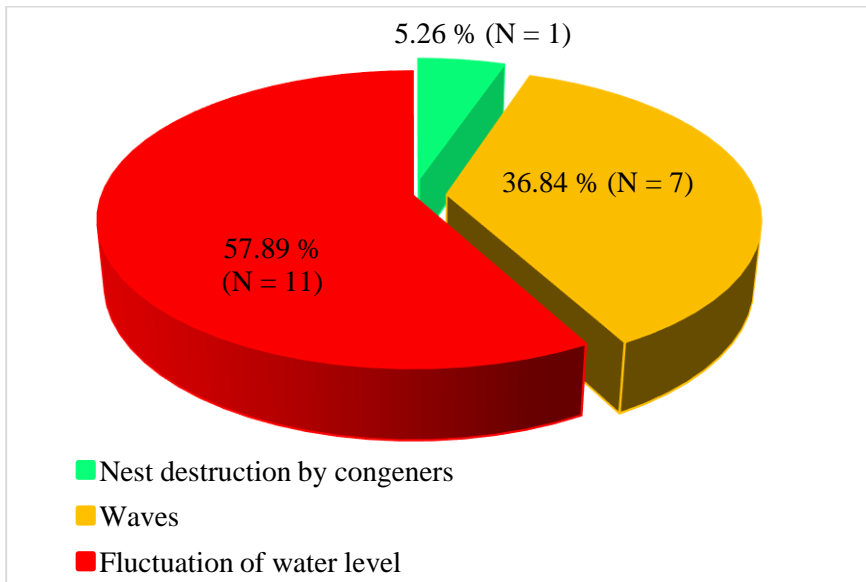


Figure 4 : Proportion of nests destroyed according to destruction factors

During this study, we noted that the importance of wave action is influenced by aquatic vegetation. Habitats with aquatic vegetation were more favorable for nesting than unvegetated habitats. In the habitats with aquatic vegetation, the nests were supported by floating substrates which provide a certain mobility and resistance to the wave action. 54 (72 %) of 75 monitored nests were located in vegetation dominated by *Cyperus madagascariensis* and *Aristida rufescens*, and 37 of them were located in Matsaborimena Lake. The cover of the nest habitats vegetation ranged from 8.75 % to 82.5 %, with an average of 34.31 % (N = 54 nests; SD = 16.59). Vegetation height around nests varied from 0.65 to 4.1 m, with an average of 2.02 m (N = 54 nests; SD = 0.91). On the other hand, all nests (N = 21) located in habitats without aquatic vegetation were attached to tree branches or submerged bushes at the edge of lakes and river. Among these nests, 33.33% (N = 7 nests) were destroyed by waves whose mechanical action was reinforced by dry tree branches emerging on the water surface. The tree species supporting the nests were dominated by *Ilex mitis* “*Nofotrakoho*” (N = 6 nests) and *Molinaea sulcata* “*Hazondinta*” (N = 5 nests).

With regard to water level fluctuations, we noted that a daily rainfall of 63 mm (recorded on February 11th, 2021) had no effect on the 54 nests established in aquatic vegetation. However, a daily rainfall more than 25 mm (recorded on December 08th, 2020) may result in the destruction of nests built in habitats without aquatic vegetation. Indeed, 11 nests were immersed, of which six (06) were active. These nests were attached to dead tree branches or submerged bushes at the edge of the

lake and river. Their destruction was recorded during weeks when the average daily was between 6.93 mm (N = 7 days; SD = 11.85) and 15.66 mm (N = 7 days; SD = 12.04). This was due to nests fixation on immobile substrates which could not float freely the nests. On the other hand, heavy rainfall during the nest building period, followed by a prolonged period without rain, could also cause the nest to be suspended and made the lakeshores (especially Matsaborimena) unsuitable for nesting or made the nests more vulnerable to predation by *Rattus rattus*.

Nest destruction by congeners was mainly due to the competition for the possession of a sexual partner. This situation was observed only once, but the antagonist for this same reason was often, especially between the breeding trio and before the incubation period.

Failure at the egg stage

Out of 222 eggs laid in the monitored nests, 66.22% (N = 147 eggs) were lost because of predation (N = 114 eggs lost), water level fluctuations (N = 20 eggs lost), waves (N = 6 eggs lost), nest destruction by congeners (N = 5 eggs lost) and falling (N = 2 eggs lost) (Figure 5). The main predators observed were the raptors Malagasy Harrier *Circus macroscyles* and Madagascar Harrier-hawk *Polyboroides radiatus*, and the Rodent *Rattus rattus* (Figure 6). *Polyboroides radiatus* was the major predator observed, because it caused the loss of 55.82 % (N = 82 eggs) of the eggs, while *Rattus rattus* and *Circus macroscyles* predated 17.68 % (N = 26 eggs) and 5.26 % (N = 6 eggs) of the eggs, respectively.

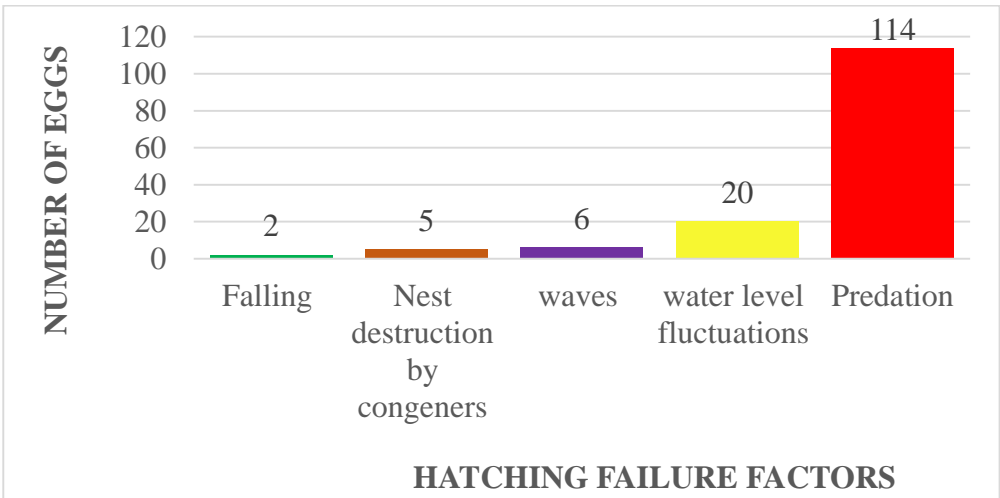


Figure 5 : Number of eggs lost as a function of hatching failure factors



Figure 6 : Egg predators of Madagascar Grebe: *Polyboroides radiatus* (left) and *Rattus rattus* (right)

Mortality of chicks and juveniles

Among the 75 hatchlings, 62.67 % (N = 47) were successfully fledged. The fledgling failure rate was 37.33 % (N = 28 chicks) in relation to the hatching chicks. Among the dead chicks, 39.29 % (N = 11 chicks) disappeared at the age of less than two weeks, 32.14 % (N = 9 chicks) were predicted, and 28.57% (N = 8 chicks) dead at the age more than two weeks. The main causes of the death of chicks were predation and starvation (Figure 7).



Figure 7 : Dead chicks due to predation (left) and starvation (right)

Mortality of breeding individuals

During this study, three dead individuals (1.86 %) of the monitored breeding individuals (N = 236) were recorded. Raptor attack and fight due to competition for sexual partner possession were the main causes of the death of breeding individuals (Figure 8).



Figure 8 : Breeding individuals of the Madagascar Grebe dead due to raptor attack (left) and fight due to competition for possession of a sexual partner (right)

Influence of human disturbance

Human disturbance from recreational activities constituted one of the threats during the breeding season of the Madagascar Grebe in the study sites. The breeding individuals took turns incubating eggs, and the nests were usually never left unattended. However, the presence of humans near the nests may force the Grebes to leave abruptly the nests. This behavior increased the vulnerability of nests to predators.

Productivity improvement test

A total of 15 nests were protected with wire mesh in order to improve the productivity of the Madagascar Grebe. These protected nests contained 46 eggs, of which 44 (95.65 %) successfully hatched, and two (02) fell into the water. Out of 44 hatchlings, 61.36 % (N = 26 chicks) successfully fledged. The breeding success rate was 58.69 %. We noted that the productivity parameters (hatching success, rearing success, breeding success) were statistically higher in the protected nests than in the unprotected ones (Chi-square test: $\chi^2_{\text{calc}} = 137.56 > \chi^2_{\text{crit}} = 111.39$; $df = 4$; $p < 0.001$). The adopted technique was therefore effective in limiting or even eliminating eggs predation.

Table 3 : Breeding parameters of protected nest of the Madagascar Grebe in Bemanevika PA

Parameters	Values
Number of protected nests	15
Total number of eggs laid	46
Number of eggs hatched	44
Hatching success rate (%)	95.65
Number of young fledged	26
Fledging success rate (%)	61.36
Breeding success rate (%)	56.52
Mortality rate (%)	43.48

DISCUSSION

Renevey B. (1987) found that the assessment of breeding pairs of the Great Crested Grebe (*Podiceps cristatus*) from the count of families and solitary adults is not possible because the total number obtained during the incubation period is always lower than the number of breeding individuals obtained during systematic control of nests. In this study, we have the same results, because since the incubation period until the chicks were at the age of two weeks, the breeding individuals largely frequented in the aquatic vegetation.

It is known that the distribution of the nests of grebe is conditioned by microhabitat characteristics such as wetland size, vegetation distribution, and water depth (Burger J., 1974 ; Faaborg J., 1976 ; Nudds T., 1982). For the Madagascar Grebe, we found that the presence of aquatic vegetation was not a common factor required during nesting habitat selection. Indeed, 28 % (N = 21) of the monitored nests were located outside of aquatic vegetation formation. However, despite the depth of the wetlands (up to 83 m), all nests were located at a depth of less than 6.5 m, of which 78.7 % (N = 59 nests) were built on water at a depth of 0.50 to 1.50 m. And then, we found that the number of installed nests decreased with increasing water depth at the study sites.

Some authors have found that nest location and characteristics can influence reproductive performance (Collias N. and Collias E., 1984; Ulfvens J., 1988). In this

study, we found that the nests placed in aquatic vegetation were more productive than those in habitats without submerged vegetation, as it has been found by some authors. In fact, the favorable conditions provided by vegetation could therefore be shelter from predators, abundance of nesting materials, abundance of food and proximity of the feeding place from the nest. This could be explained by the high number of nests located at Matsaborimena (N = 42 nests, 46.15 % of all recorded nests). At this site, Madagascar grebe nested surrounded a patch dominated by *Cyperus madagascariensis* and *Eleocharis plantaginea*. This is associated with shallow water, which makes foraging efficient for waterfowl (Fox A., 1994). Indeed, water depth is not only a limiting factor in the availability of suitable nesting habitat, but it could be a factor of juveniles mortality that must satisfy their feeding needs after their age at two weeks. Our results also showed that aquatic vegetation supported more families than single adults, and the reproductive success rate was higher in the habitats with aquatic vegetation than in the unvegetated habitats. This means that the Malagasy Grebe depends on patch of emergent or submerged aquatic vegetation which protects the nests from waves, and provides better resistance of the nests against water level fluctuations, more food and protection of vulnerable chicks.

The breeding success (21.7% of eggs laid) obtained during this study was slightly low. Predation was the major cause of breeding failure of the Madagascar Grebe in our study sites, as it has happened on several bird species (Martin T., 1993). Breeding success also depends on the quantity and quality of food availability in the habitats around the nesting site (Negro et al., 1993). Although it was not precise, mortality of newly hatched chicks may be related primarily to food supply and the meteorological factors of temperature and precipitation. This assertion is confirmed by the fact that some authors have already stated that grebe nests are particularly prone to failure due to unfavorable weather conditions including strong winds that generate waves and precipitation that is responsible for lake level fluctuations (Glover F., 1953; Burger J., 1974; Lindvall M. and Low J., 1982; Vinicombe K., 1982, Ulfvens J., 1988; Mudge G. and Talbot T., 1993). Furthermore, during observations of feeding sessions, we found no order in the distribution of food. Once captured by the parents, the food always goes to the chick that demands it most strongly. This is compounded by a high rate of food capture failure during the first few week of feeding, as at this time the parents must capture on small prey. Moreover, the presence of benthic invertebrates is very low in the wetlands of Madagascar (Razafindrajao & Bamford unpublished data) and this seems to be one of the breeding failure factors of aquatic birds including the Madagascar Grebe.

Rodriguez & Bustamante (2003) demonstrated an effect of meteorological conditions on different reproduction parameters of Great Crested Grebe. They

confirmed a positive effect of precipitation on reproductive parameters when it occurs, during the nestling, spawning and incubation periods. Still on the same species, Renevey B. (1989) found a negative effect of precipitation during the fledgling period. For this study, we observed for each period there was a certain threshold of favorable precipitation of the Madagascar Grebe reproductive. For example, during the nestling and incubation periods, the daily precipitation to less than 25 mm had a positive impact on the stimulation of breeding individuals to build the nest: the supply of nest construction materials was only initiated and accelerated during the nest building period. However, beyond this value, the precipitation will cause the water level, which causes the immersion or destruction of the newly built nest. This threshold value could differ from one site to another depending on their geomorphological characteristics.

Moreover, prior to this study, available information pointed out that since the 1980s, the Madagascar Grebe population was suspected to be undergoing a rapid decline due to the combined effects of predation by introduced fish, overfishing, hunting, entanglement in gillnets, increasing conversion of wetlands and the use of pesticides in agriculture. In Bemanevika PA, these anthropogenic factors were weak, but predation by raptors and rats was a critical threat to the population of this species.

CONCLUSION

The current study provides new information on the factors of breeding failure of the endangered Madagascar Grebe. The results of this study constitute an essential tool to conservation improvement and reinforcement for this species. They also replenish the basic data on the remaining Grebe species in Madagascar, being the least studied group of birds and highly sensitive to wetlands environment change in Madagascar. We found that the Madagascar Grebe in the Bemanevika PA did not require the presence of aquatic vegetation during the nesting habitat selection, but the presence of this aquatic vegetation affected the breeding success. The breeding success was limited by natural factors rather than anthropogenic factors. Egg predation constituted the most serious threat to the remaining Grebe population in the Bemanevika PA.

Fortunately, the exclusion of predators, through the protection of each nest, could eliminate the impact of this factor. This technique ensures the safety of nests from predators or to limit the breeding failure caused by predators. Its application in other breeding sites is therefore recommended in order to reverse the population trend of this species and possibly save the population of other water birds species nest in the aquatic environment victims of egg predation.

It would also be possible that human disturbance during the breeding season becomes an important factor of the breeding failure. This requires consideration of the breeding season of the Madagascar Grebe during planning of ecotourism development in Bemanevika PA. Moreover, new information on the diets of two raptor species, *Polyboroides radiatus* and *Circus macroscyles*, were also provided by this study. These species are actually known to be the predator of the eggs of the Malagasy Grebe. Finally, this study was only a short-term preliminary study to understand the factors of breeding failure of the Madagascar Grebe. So, we recommend further studies to determine the impacts of external parasite and propinquity disease on the breeding success of this species.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Bandorf H., (1970). Der Zwergtancher (*Tachybatpus ruficollus*) (Pallas). Die Neue Brehm-Bucherei 430, Ziemsen verlag wittenberg-Lutherstadt.
- 2) BirdLife International. 2018. *Tachybaptus pelzelni*. The IUCN Red List of Threatened Species 2018: e.T22696565A131612478. <http://dx.doi.org/10.2305/IUCN.UK.2018-2.RLTS.T22696565A131612478.en>
- 3) Burger, J. (1974). Determinants of colony and nest-site selection in the silver grebe (*Podiceps occipitalis*) and Rolland'Grebe (*Rollandia rolland*). Condor, 76: 301-306.
- 4) Collias, N. E. & Collias, E. C. (1984). *Nest Building and Bird Behavior*. Princeton University press. princeton.
- 5) del Hoyo, J.; Elliot, A.; Sargatal, J. (1992). *Handbook of the Birds of the World, Vol. 1: Ostrich to Ducks*. Lynx Edicions, Barcelona, Spain.
- 6) Donque, G. (1998). *Contribution géographique à l'étude du climat de Madagascar*. Antananarivo: N.I.A.G.
- 7) Dytham C. 2011. *Choosing and using statistics: A biologist's guide*. Oxford: John Wiley and Sons.
- 8) Faaborg, J. (1976). Habitat selection and territorial behavior of the small grebes of North Dakota. *Wilson Bulletin*, 88: 390-399.
- 9) Fjeldsa, J. (2004). *The grebes*. Oxford University Press, Oxford.
- 10) Fox, A. D. (1994). Estuarine winter feeding patterns of little grebes *Tachybaptus ruficollis* in Central Wales. *Bird Study*, 41: 15-24.
- 11) Géroudet, P. (1946). *Les palmipèdes*. Edition: Delachaux & Niestlé, Neuchâtel.
- 12) Glover, F. A. (1953). Nesting ecology of the piedbilled grebe in north-eastern Iowa. *Wilson Bulletin*, 65: 32-39.

- 13) IUCN. 2018. The IUCN Red List of Threatened Species. Version 2018-2. Available at: www.iucnredlist.org. (Accessed: 15 November 2018).
- 14) Langrand O. (1995). *Guide des Oiseaux de Madagascar*. Lausanne: Delachaux et Niestlé.
- 15) Langrand, O. (1995). Recensement des oiseaux d'eau à Madagascar et observation de la Sarcelle de Bernier *Anas bernieri*. *Madagascar Region Newsletter* 5: 13-14.
- 16) Langrand, O.; Goodman, S.M. (1995). Monitoring Madagascar's ecosystems: A look at the past, present, and future of its wetlands. In: Herman, T.B.; Bondrup-Nielsen, S.; Willison, J.H.M.; Munro, N.W.P. (ed.), *Ecosystem monitoring and protected areas*, pp. 204-214. Science and Management of Protected Areas Association, Wolfville, Canada.
- 17) Lindvall, M. L. and Low, J. B. (1982). Nesting ecology and production of western grebes at Bear River Migratory Bird Refuge, Utah. *Condor*, 84: 66-70.
- 18) Martin, T. E. (1993). Nest predation and nest sites. *BioScience*, 43: 523-532.
- 19) Mudge, G. p. and Talbot, T. R. (1993). The breeding biology and causes of nest failure of Scottish black-throated diver *Gavia arctica*. *Ibis*, 135: 113-120.
- 20) Nudds, T. D. (1982). Ecological separation of grebes and coots: interference competition or microhabitat selection? *Wilson Bulletin*, 94: 505-514.
- 21) O'Donnell, C. & Fjeldsa, J. (1997). Grebs – Study survey and conservation action plan. *IUCN/SSC. Grebe's specialist group. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK*.
- 22) Perrin N, (2006). *Biologie des populations*. Hiver 2005-2006.
- 23) Rabearivony, J., Thorstrom, R., René de Roland, L.-A., Rakotonratsima, M., Andriamalala, T. R. A., Sam, T. S., et al. (2010). Protected area surface extension in Madagascar: Do endemism and threatened species remain useful criteria for site selection? *Madagascar conservation and development*, 5 (1): 35-47.
- 24) Ramsar. (2017). Complexe des zones humides de Bemanevika-Madagascar. Fiche descriptive Ramsar. Formulaire FDR créé par le SISR (Service d'information sur les Sites Ramsar) V.1.6 - 01 Février 2017. <https://rsis.ramsar.org/ris/2287>. Téléchargée le 10 Octobre 2021.
- 25) Renevey B. (1987). Effectifs et évolution de la population nicheuse de Grèbes huppés, *Podiceps cristatus*, sur la rive Sud-Est du lac de Neuchâtel. *Nos Oiseaux* 39 : 113-128.
- 26) Renevey B. (1988). Ecologie de la reproduction du Grèbe huppé, *Podiceps cristatus*, sur la rive sud-est du lac de Neuchâtel: 1^{er} partie: la nidification. *Alauda* 56 : 330–349.

- 26) Renevey B. (1989). Ecologie de la reproduction du Grèbe huppé *Podiceps cristatus*, sur la rive sud-est du lac Neuchâtel. 2e partie: l'élevage des jeunes. *Alauda* 57: 92–107.
- 27) Safford, R.J.; Hawkins, A.F.A. 2013. The Birds of Africa. Volume VIII: The Malagasy Region. Christopher Helm, London.
- 28) Sutherland, W.J., Newton, I. and Green, R.E. (2004). Bird ecology and conservation, a handbook of techniques. Oxford University Press, Oxford, 119-302.
- 29) The Peregrine Fund. 2014. Plan d'aménagement et de gestion de la nouvelle aire protégée Bemanevika. The Peregrine Fund, Madagascar. 111p.
- 30) IUCN. 2021. The IUCN Red List of Threatened Species. "www.iucnredlist.org", consultés la 04 octobre 2021.
- 31) Ulfvens, J. (1988). Nest characteristics and nest survival in the horned grebe *Podiceps auritus* and great crested grebe *Podiceps cristatus* in a Finnish archipelago. *Annales Zoologici Fennici*, 25: 293-298.
- 32) Vinicombe, K. (1982). Breeding and population fluctuations of the little grebe *Tachybaptus ruficollis*. *British Birds*, 75: 204-218.
- 33) Woolaver, L.G, Young, H.G.Y, Cranswick, P A, Razafindrajao, F., Bamford, A.J, Mallon, D., et al. (2015). Species Action Plan 2014-2024 for the Conservation of the Madagascar Pochard. 64 p.
- 34) ZICOMA. 1999. Zones d'Importance pour la Conservation des Oiseaux à Madagascar.

CARACTERISATION PHYSICO-CHIMIQUE DU MINERAI D'APATITE PAR LA METHODE DE SPECTROSCOPIE DE LA FLUORESCENCE DES RAYONS X POUR LA VALORISATION INDUSTRIELLE - COMMUNE RURALE DE SOANALA REGION D'ANOSY – MADAGASCAR

par

RAVELONA Andry Judicaël⁽¹⁾

(1) Ecole Doctorale Ingénierie Géoscience (INGE), Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Madagascar dispose de beaucoup de minerais et de minéraux dans son sous-sol. Le minerai d'apatite en fait partie. C'est un minerai phosphaté et les domaines d'utilisation du phosphore sont largement développés allant de l'agriculture, de la médecine jusqu'à la technologie. La population mondiale ne cesse d'augmenter et atteindra jusqu'à 9.1 milliards d'individus à l'horizon de 2050 selon l'estimation des Nations Unies. Cette situation engendrera l'augmentation de la demande des minéraux de phosphore comme l'apatite sur le marché international. Pour l'avenir, l'apatite devrait être classée parmi les minerais stratégiques. C'est dans cette optique que va être valorisé industriellement le minerai d'apatite de la commune rurale de Soanala par caractérisation de ses compositions chimiques par la méthode de spectroscopie de la fluorescence des rayons X, en collaboration avec l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires. En effet, cette méthode spectroscopique de fluorescence des rayons X montre que le minerai d'apatite contient beaucoup de phosphore et de calcium pour lequel leur domaine d'utilisation est très vaste. De ce fait, le minerai d'apatite est un minerai phosphoré qui peut être exploité industriellement et éventuellement peut créer des emplois afin d'augmenter le niveau de vie de la population locale par l'exploitation minière de Soanala et plus largement pour la population malgache par sa transformation industrielle et l'exportation des produits obtenus.

Mots-clés : Phosphore, Apatite, Analyse, Spectroscopie, Valorisation, Industrielle

ABSTRACT

Madagascar contains a lot of ores and of minerals in its basement. The ore of apatite makes part of it. It is an ore phosphate and the domains of use of the phosphor are developed extensively active of agriculture, of medicine until the technology. The world population doesn't stop increasing and it will reach on the horizon until 9.1 billions of individuals of 2050 according to the evaluation of the United Nations. This situation will generate the increase of the demand of the phosphor minerals as the apatite on the international market. For the future, the apatite should be classified among the strategic ores. In this focus, we make valorized industrially the ore of apatite of the rural township of Soanala by characterization of its chemical compositions by the method of fluorescence spectroscopy the X-rays in collaboration with the Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN). Indeed, this spectroscopic method of X-rays watch fluorescence that the ore of apatite contains a lot of phosphor and calcium of which of use of those chemicals compounds are broad field. Of this fact, the ore of apatite is a phosphated ore that we can use industrially and possibly to create some jobs in order to increase the standard of living of the local population for the mining exploitation of Soanala and for the Malagasy population making industrial transformation of this ore and the export of the products gotten.

Key-words : Phosphor, Apatite, Analysis, Spectroscopy, Valorization, Industrial

INTRODUCTION

La richesse du sous-sol de Madagascar est inestimable (Lacroix A., 1922) et le minerai d'apatite en fait partie (Besairie H., 1966). C'est un minerai phosphaté (Vignoles M., 1982), le domaine de l'utilisation du phosphore est très vaste allant de l'agriculture à la médecine et jusqu'à la technologie. En 2050, le nombre de la population mondiale est estimé à 9.1 milliards d'individus illustré par la figure 01 (David O., 2020). L'évolution de la croissance des effectifs de la population mondiale entre 2000 à 2050 est illustrée par la Figure 1.

Face à la croissance démographique mondiale, la demande des produits agricoles augmentera aussi. On estime qu'actuellement la demande du phosphore utilisé comme engrais chimique ou fertilisant agricole s'élève à au moins 2,8% par an [W1]. Cette situation a pour conséquence la hausse du prix de phosphate sur le marché international comme le montre la Figure 02 [W2].

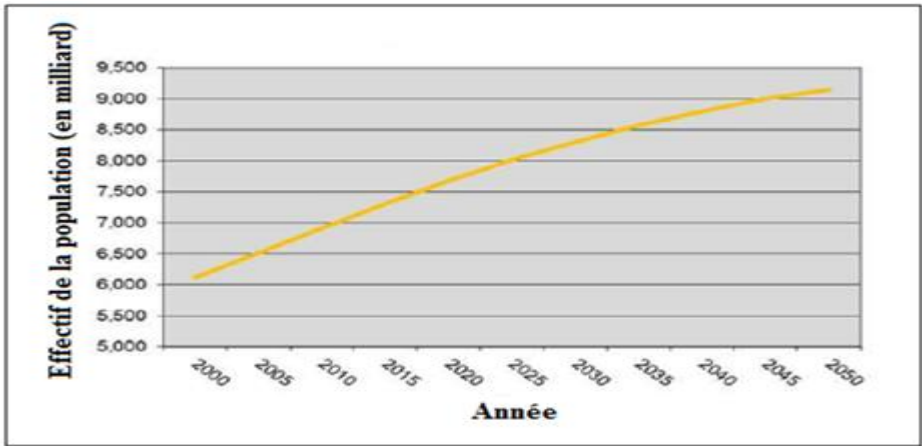


Figure 1 : Evolution de la croissance des effectifs de la population mondiale entre 2000 à 2050 (David O., 2020)

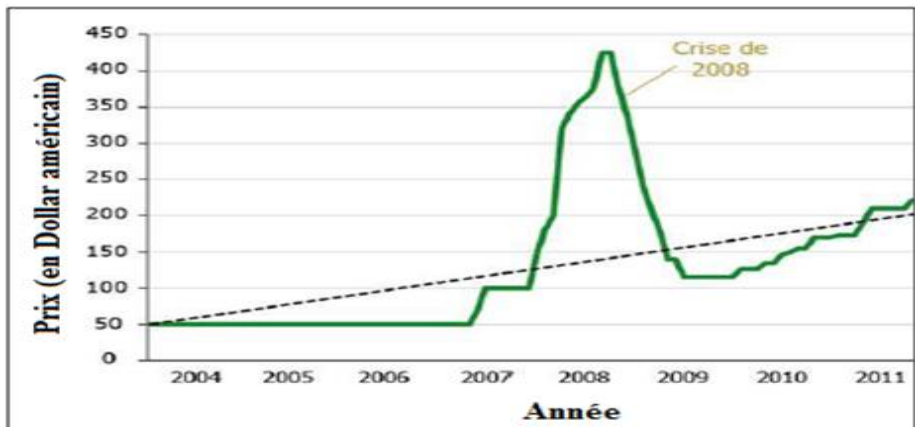


Figure 2 : Historique des prix des minéraux phosphatés [W2]

Du point de vue scientifique et technologique, on peut considérer que le phosphore est classé parmi les éléments chimiques non-substitutionnels mais importants. C'est pourquoi la valorisation industrielle du minerai d'apatite de Soanala est l'objet de cette recherche, par la caractérisation physico-chimique avec la méthode de spectroscopie de la fluorescence des rayons X en collaboration avec l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN) qui permet de voir les raies et les concentrations chimiques du minerai d'apatite. Ce travail se divisera en trois grandes parties, la première partie présentera les matériels et méthodes d'analyse par la spectroscopie de fluorescence des rayons X, ensuite la deuxième partie sera consacrée aux résultats obtenus et enfin la troisième partie traitera des interprétations et des discussions.

MATERIELS ET METHODES

Méthode d'analyse par la spectrométrie des rayons X du minerai d'apatite

La spectrométrie de fluorescence X (XRF) (Thirion-Merle V., 2014) permet la détermination de la composition élémentaire de l'échantillon de manière qualitative et quantitative, c'est-à-dire de déterminer la nature et la quantité des atomes qui y sont présents.

Cette technique est couramment pratiquée dans les industries métallurgiques, minières, pétrolières et dans les cimenteries, car elle présente les avantages tels que pour l'analyse multi-élémentaire, la quasi-totalité des éléments est analysée à l'exception des éléments très légers. C'est aussi une technique adaptée à l'analyse de matrices diverses et complexes (poudres, minéraux, huiles, ciments, polymères, verres, céramiques...) pour déterminer la composition élémentaire.

Principe de la spectroscopie de fluorescence des rayons X [W5]

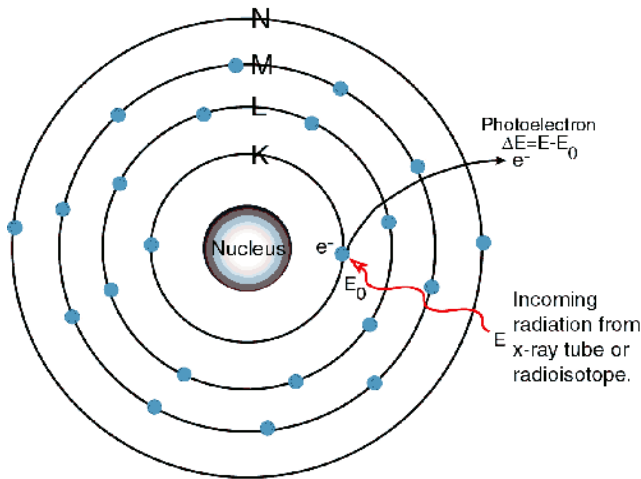


Figure 3 : Ejection d'un électron de la couche électronique K

D'après cette figure, un électron de la couche électronique K est éjecté par une radiation excitatrice primaire et crée une lacune. Ensuite, un électron de la couche L ou M (à un niveau d'énergie plus élevé qu'un électron de la couche K) "descend" à un niveau énergétique plus bas et va occuper la lacune. Au cours de ce processus est émis un rayonnement X caractéristique de cet élément. Cet électron produit à son tour un trou dans la couche électronique L ou M. (Jenkins R., 1999).

Ce phénomène est montré par la Figure 4.

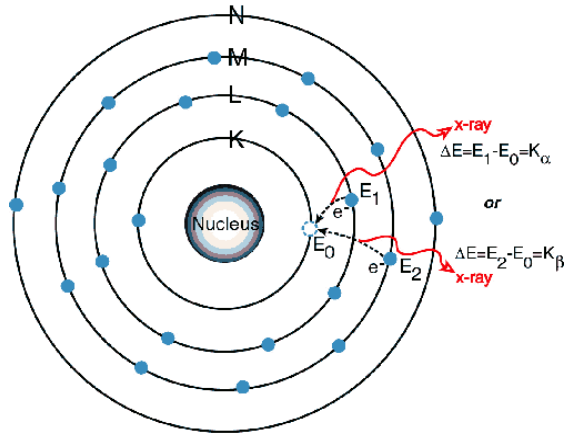


Figure 4 : Emission des rayons X par le comblement de la lacune de la couche k

Si une lacune se forme sur la couche L soit par l'excitation primaire par un rayon-X ou par le processus précédent, un électron de la couche M ou N descend à un niveau énergétique inférieur et va occuper la lacune. Au cours de ce processus un rayonnement X caractéristique de cet élément est émis. Cet électron produit à son tour une lacune sur couche M ou N. L'électron qui part de la couche N et produit une lacune sur cette couche est appelé : « électron Auger » montré par la figure suivante.

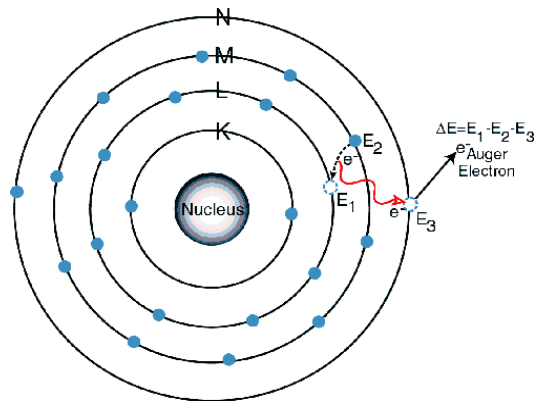


Figure 5 : Électron « Auger »

L'énergie d'excitation de l'atome interne est transmise à un électron périphérique, conduisant à son éjection.

Principe fondamentale (Jenkins R., 1999)

La spectrométrie de fluorescence X est une spectrométrie de l'atome basée sur une forte excitation de l'atome avec formation de lacune sur la couche électronique profonde de l'atome (K, L, ...)

- Si la lacune se forme sur la couche K, on obtient la raie X de la série K : $K\alpha$ et $K\beta$.
- Si la lacune se forme sur la couche L, on obtient la raie X de la série L : $L\alpha$ et $L\beta$.

Il est à remarquer que la raie de fluorescence X peut avoir une structure fine $K\alpha_1, K\alpha_2$ avec $I_{K\alpha_1} \gg I_{K\alpha_2}$. Ces raies de fluorescence X de l'atome sont des raies X très courantes mais si l'atome est soumis à une très forte excitation, il existe des raies de fluorescence X anormales d'atomes multi-ionisés c'est-à-dire plusieurs lacunes dans l'atome multi-ionisé avec des raies de fluorescence X satellite et hyper excité notées $K\alpha_h$ par exemple pour la raie $K\alpha$ hyper satellite.

Ces raies sont utilisées dans le dosage des éléments de trace.

Chaque raie de fluorescence X est caractérisée par deux paramètres (Eberhart J.P., 1976).

- D'une part par **sa fréquence γ** qui est caractéristique de l'atome
- D'autre part, par **son intensité I**.

• La fréquence γ du photon X est donnée par la relation :

$$\gamma^{1/2} = a(Z - b) \quad (1)$$

γ : la fréquence du photon X

a, b : les constantes caractéristiques des raies de fluorescence X (raie de fluorescence X K, L,...)

Z : le numéro atomique de l'élément.

• Son intensité est donnée par la relation :

$$I_i = S_i \cdot A_i \cdot C_i \quad (2)$$

I_i : intensité de la raie

S_i : sensibilité de la chaîne de comptage

A_i : facteur d'absorption du rayonnement

C_i : concentration de l'élément dans l'échantillon.

Matériel utilisé pour l'analyse par spectroscopie de fluorescence des rayons X [W4]

La figure 06 montre le matériel utilisé pour l'analyse par la spectroscopie de fluorescence des rayons X du minerai d'apatite.



Figure 6 : Spectromètre de fluorescence des rayons X – SPECTRO XEPOS by AMETEK [W4]

Description du matériel d'analyse

Un analyseur élémentaire conçu pour les applications exigeantes - le spectromètre à fluorescence X dispersive en énergie (ED-XRF) SPECTRO XEPOS redéfinit l'analyse XRF avec de nouveaux niveaux de performance exceptionnels. [W4].

RESULTATS

Spectre de fluorescence des rayons X du minerai d'apatite (Despujol J., 1952)

Le minerai d'apatite a été analysé par la spectroscopie de fluorescence des rayons X et la figure 6 montre le résultat de cette analyse sous forme de spectrogramme.

Pour le spectrogramme de fluorescence des rayons X du minerai d'apatite dont l'intervalle d'énergie est $\Delta E = 0,165 \text{ KeV}$ montrant les raies X de fluorescence de :

Aluminium [Al Z=13] : avec une raie de fluorescence X $K\alpha$ dont l'énergie est $E = 1,486 \text{ KeV}$.

Silicium [Si Z= 14] : avec une raie de fluorescence X $K\alpha$ dont l'énergie est $E = 1,739 \text{ KeV}$

Phosphore [P Z= 15] : avec une raie de fluorescence X $K\alpha$ dont l'énergie est $E = 2,013 \text{ KeV}$

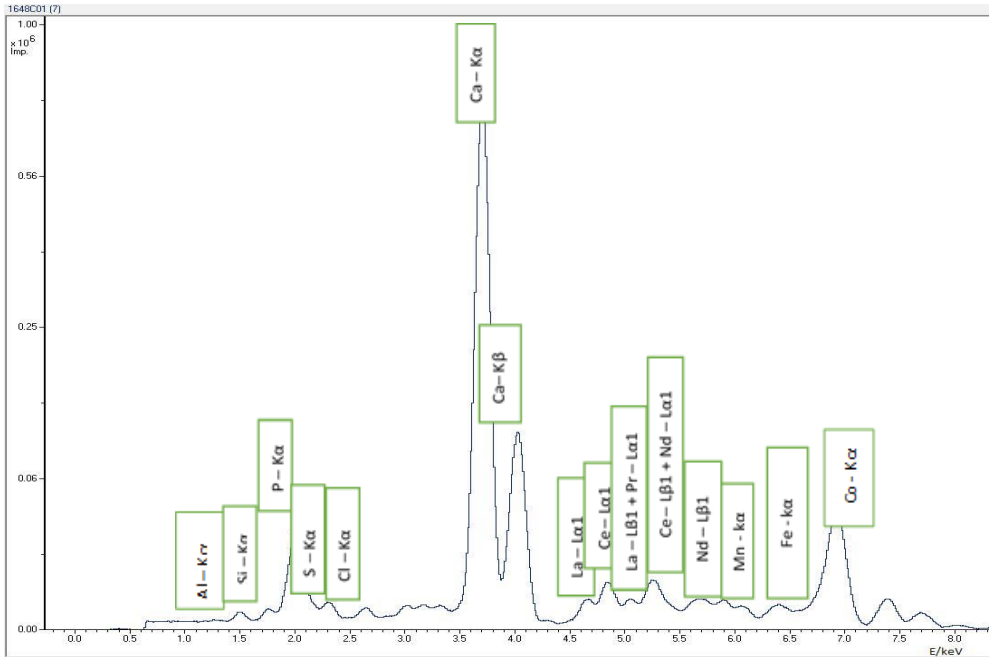


Figure 7 : Spectrogramme de fluorescence des rayons X du minerai d'apatite

Soufre [S Z= 16] : avec une raie de fluorescence X K α dont l'énergie est E= 2,307 KeV

Chlore [Cl Z= 17] : avec une raie de fluorescence X K α dont l'énergie est E= 2,622 KeV

Calcium [Ca Z= 20] : avec deux raies de fluorescence X K α et K β dont les énergies respectives sont pour K α , E= 3,691 KeV et pour K β , E= 4,012 KeV

Lanthane [La Z= 57] : avec deux raies de fluorescence X L α 1 et L β 1 dont les énergies respectives sont pour L α 1, E= 4,647 KeV et pour L β 1, E= 5,038 KeV

Cérium [Ce Z= 58] : avec deux raies de fluorescence X L α 1 et L β 1 dont les énergies respectives sont pour L α 1, E= 4,839 KeV et pour L β 1, E= 5,262 KeV

Praséodyme [Pr Z= 59] : avec une raie de fluorescence X L α 1 dont l'énergie est E= 5,035 KeV

Néodyme [Nd Z= 60] : avec deux raies de fluorescence X L α 1 et L β 1 dont les énergies respectives sont pour L α 1, E= 5,228 KeV et pour L β 1, E= 5,492 KeV

Manganèse [Mn Z= 25] : avec une raie de fluorescence X K α dont l'énergie est E= 5,9 KeV

Fer [Fe Z= 26] : avec une raie de fluorescence X $K\alpha$ dont l'énergie est $E= 6,405 \text{ KeV}$

Cobalt [Z= 27] : avec une raie de fluorescence X $K\alpha$ dont l'énergie est $E= 6,931 \text{ KeV}$.

Dépouillement du spectrogramme

Le dépouillement du spectrogramme du minerai d'apatite a été effectué en utilisant la référence de la littérature à savoir la table de POWERS.

Les résultats de ce dépouillement sont donnés par le tableau suivant.

Tableau 1 : Eléments caractérisés par la fluorescence des rayons X du minerai d'apatite

Eléments		Raie de Fluorescence X		Valeurs théoriques Table de Powers	Concentration
Z	Symbole	Type	Intensité	E en KeV	
13	Al	$K\alpha$	tf	1,486	$896 \pm 92 \text{ mg.kg}^{-1}$
14	Si	$K\alpha$	tf	1,739	$0,7 \pm 0,1 \text{ mg.kg}^{-1}$
15	P	$K\alpha$	m	2,013	$9,3 \pm 0,6 \%$
16	S	$K\alpha$	tf	2,307	$2354 \pm 243 \text{ mg.kg}^{-1}$
17	Cl	$K\alpha$	tf	2,622	$1227 \pm 137 \text{ mg.kg}^{-1}$
20	Ca	$K\alpha$ $K\beta$	TF F	3,691 4,012	$28,9 \pm 2,1 \%$
57	La	$La1$ $L\beta1$	tf tf	4,647 5,038	$3302 \pm 369 \text{ mg.kg}^{-1}$
58	Ce	$La1$ $L\beta1$	f f	4,839 5,262	$4695 \pm 473 \text{ mg.kg}^{-1}$
59	Pr	$La1$	tf	5,035	$549 \pm 58 \text{ mg.kg}^{-1}$
60	Nd	$La1$ $L\beta1$	f f	5,228 5,492	$1625 \pm 174 \text{ mg.kg}^{-1}$
25	Mn	$K\alpha$	tf	5,900	$264 \pm 32 \text{ mg.kg}^{-1}$
26	Fe	$K\alpha$	tf	6,405	$2062 \pm 223 \text{ mg.kg}^{-1}$
27	Fe	$K\alpha$	m	6,931	-

Le dépouillement du spectrogramme de fluorescence des rayons X du minerai d'apatite est donné par le tableau à partir d'une référence de la littérature à savoir le Table de POWERS.

Pour l'intensité, on a utilisé la légende suivante :

TF : Très Forte ; **F** : Forte ; **m** : moyenne ; **f** : faible ; **tf** : très faible

Concentration des éléments constituant le minerai d'apatite de Soanala

Les compositions chimiques et les concentrations des éléments chimiques constituant le minerai d'apatite sont donnés par la spectroscopie de fluorescence des rayons X et le tableau suivant montre ces résultats.

Tableau 2 : Concentration des éléments chimiques dans le minerai d'apatite par spectrométrie de fluorescence des rayons X

Eléments	Unité	Concentration
Calcium (Ca)	%	28,9 ± 2,1
Phosphore (P)	%	9,3 ± 0,6
Silicium (Si)	%	0,7 ± 0,1
Soufre (S)	mg.kg ⁻¹	2354 ± 243
Chlore (Cl)	mg.kg ⁻¹	1227 ± 137
Aluminium (Al)	mg.kg ⁻¹	896 ± 92
Potassium (K)	mg.kg ⁻¹	<10
Fer (Fe)	mg.kg ⁻¹	2062 ± 223
Manganèse (Mg)	mg.kg ⁻¹	264 ± 32
Cérium (Ce)	mg.kg ⁻¹	4695 ± 473
Lanthane (La)	mg.kg ⁻¹	3302 ± 369
Néodyme	mg.kg ⁻¹	1625 ± 174
Praséodyme	mg.kg ⁻¹	549 ± 58

INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS

Interprétations des résultats

Sur le spectrogramme, il est constaté que pour les raies de fluorescence $K\alpha$ de l'aluminium, le silicium, le phosphore, le soufre, le fer, le manganèse et le chlore ; pour les raies de fluorescence $L\alpha_1$ du lanthane et du cérium ; pour la raie de fluorescence $X L\beta_1$ du néodyme, les intensités de leurs pics respectifs sont assez faibles et uniques sauf pour le **phosphore** dont la raie de fluorescence a **une intensité assez élevée**.

Pour les raies de fluorescence X constatées sur le spectrogramme des éléments tels que le **calcium (Ca- $K\alpha$; Ca- $K\beta$)** et le cobalt (Co- $K\alpha$), leurs pics respectifs ont **une intensité très élevée**.

Sur le spectrogramme, **deux chevauchements de pics** pour les raies de fluorescence $X L\beta_1$ du lanthane avec $L\alpha_1$ du praséodyme ainsi que pour les raies de fluorescence $X L\beta_1$ du cérium avec $L\alpha_1$ du néodyme sont aussi constatés.

L'échantillon du minerai d'apatite analysé renferme en majeure partie du calcium (28,9%) et du phosphore (9,3%) ce qui est conforme avec le spectrogramme de fluorescence des rayons X.

Discussions

La spectrométrie de fluorescence des rayons X permet alors de connaître les éléments chimiques constituants essentiels du minerai d'apatite de Soanala tels que le phosphore et le calcium par leurs raies très intenses dans le spectre.

Malgré tous ces avantages, la Spectrométrie de fluorescence des rayons X contrairement à la diffraction des rayons X ne permet pas d'accéder à la structure cristalline des minerais.

La diffraction des rayons X (DRX) permet de contrôler de manière qualitative la composition élémentaire et la structure cristalline des matériaux et aussi de les identifier.

CONCLUSION

La caractérisation physico-chimie du minerai d'apatite est l'objectif de cette étude afin de le valoriser industriellement. Pour cela, la méthode utilisée est l'analyse par la spectrométrie de fluorescence des rayons X (Despujol J., 1952). Les résultats de ces analyses donnent les compositions chimiques dominantes du minerai d'apatite de Soanala dont le phosphore avec une concentration de 9.3% et le calcium avec une concentration de 28.9%. Cette concentration en phosphore permet

d'exploiter industriellement par extraction cet élément phosphore (Vignoles M., 1982) pour la fabrication de fertilisants chimiques et acide phosphorique utilisé dans la tannerie.

Par ailleurs, cette méthode ne permet pas de connaître la structure cristalline de ce minerai d'apatite afin de l'identifier mais un travail est en cours pour l'identification de ce minerai d'apatite par la spectroscopie de diffraction des rayons X.

Du point de vue économique, l'exploitation minière de ce minerai permet de donner du travail à la population locale et l'exportation des produits phosphorés obtenus par la transformation industrielle de ce minerai permet d'avoir des devises pour l'amélioration de l'économie de Madagascar.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES ET WEBOGRAPHIQUES

- 1) Besairie H. (1966). Gîtes minéraux de Madagascar. *Annal. Géologie de Madagasikara*. Fasc.34
- 2) Beckhoff B. et Al (2006), Handbook of Practical X-Ray Fluorescence Analysis, *Springer*, ISBN 3-540-28603-9
- 3) David O. (2020). *La population mondiale : Répartition, dynamique et mobilité*, 4è Edition- Armand colin, 216 pages
- 4) Despujols J. (1952), Application de la spectrométrie des rayons X au dosage des faibles teneurs de métaux dans les minerais, *Le Journal de physique et le radium*. Physique appliquée, vol. 13, février 1952, p. 31A-41A
- 5) Eberhart J.P. (1976), Méthodes physiques d'étude des minéraux et des matériaux solides, Paris, Doin
- 6) Haussonne J.M. et al. (2005), Traité des matériaux, 16. Céramiques et verres, *Presses polytechniques et universitaires Romandes*, ISBN 2-88074-605-1
- 7) Jenkins R. (1999), Fluorescence spectrometry second edition, *Wiley-Interscience*, New York
- 8) Lacroix A. (1922). *Minéralogie de Madagascar*. Challamel. Paris.
- 9) Thirion-Merle V. (2014) Spectrométrie de fluorescence X, Archéométrie et Archéologie, *Maison de l'Orient et de la Méditerranée*
- 10) Vignoles M. (1982) Étude physico-chimique des apatites carbonatées phospho-calciques semblables à la francolite , *Bulletin minéralogiste*, pp 307-311

- [W1] <http://www.patrickvoillot.com/fr/apatite-25.html>, consulté le 21 septembre 2018
- [W2] <https://mern.gouv.qc.ca/mines/industrie/mineraux/mineraux-proprietes-apatite.jsp>, consulté le 04 mai 2018
- [W3] <https://gq.mines.gouv.qc.ca/portail-substances-minerales>, consulté le 03 Octobre 2017
- [W4] <https://www.directindustry.fr/prod/spectro-analytical-instruments/product-32884-1718146.html> , consulté le 09 décembre 2017
- [W5] <https://quantum-rx.com/principe-de-la-xrf/>, consulté le 10 mai 2018

CARACTERISATION PAR RMN ²⁹Si ET ²⁷Al ET ANALYSES THERMIQUES DES DIFFERENTS TYPES D'ARGILES DE LA REGION ANALAMANGA

par

ANDRIANAINARIVELO Mahandrimanana⁽¹⁾, RAJERISON William⁽¹⁾,
MUTIN Hubert⁽²⁾, ALAUZUN Johan⁽²⁾

(1) Laboratoire de Chimie Physique des Macromolécules, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Laboratoire de Chimie Moléculaire et Organisation du Solide, Université de Montpellier, France

RESUME

Les argiles sont des matériaux de couches élémentaires (phyllosilicates) qui s'accumulent, se désagrègent selon les conditions de leur environnement. Cet arrangement induit des interfaces réactives internes, différentes des surfaces externes et des espaces confinés qui sont des véritables nano réacteurs. La petite taille de leurs couches dont l'épaisseur est à l'échelle nanométrique confère à l'argile minérale (couches d'agrégation en particules, puis en agrégats à échelle de plus en plus grande) toutes les propriétés remarquables exploitées dans de nombreuses applications que l'on mélange quotidiennement depuis des millénaires. Les objectifs de cette étude est d'analyser par la Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) du ²⁹Si et ²⁷Al les différents types d'argiles : argile verte, argile blanche et argile grise, argile orange et d'étudier leur comportement thermique par les analyses thermogravimétriques et les analyses thermiques différentielles. Les analyses RMN ont permis de montrer que la structure des argiles blanche, grise et orange est sensiblement identique. Elles ont toutes un environnement de type Q² et Q³. L'argile verte n'a pas la même structure que les trois autres. Le comportement thermique de l'argile blanche et de l'argile verte a été étudié par les analyses thermogravimétriques et les analyses thermiques différentielles. Ces analyses ont permis de mettre en évidence les pertes et la stabilité des argiles durant les traitements thermiques et leur cristallisation. Elles cristallisent toutes sous forme de mullite vers 1000°C, il y a donc séparation de phase ou la cristallisation de la phase amorphe à cette température. Les pertes de masse sont faibles car elles varient entre 1,58% et 10,59%. Il s'agit de la poursuite de condensation et l'évaporation des eaux de surface et des eaux inter feuilletts.

ABSTRACT

Clays are materials of elementary layers (phyllosilicates) that accumulate, disintegrate according to the conditions of their environment. This arrangement induces internal reactive interfaces, different from external surfaces and confined spaces that are true nanoreactors. The small size of their layers that gives the thickness at the nanoscale confers the mineral clay (layers of aggregation in particles, then in aggregates on an increasingly large scale) all the remarkable properties exploited in many applications that have been mixed daily for millennia. The objectives of this study are to analyze by the Nuclear Magnetic Resonance (NMR) of ^{29}Si and ^{27}Al the different types of clays: green clay, white clay and gray clay, orange clay and to study their thermal behavior by thermogravimetric analyses and differential thermal analyses. NMR analyses showed that the structure of white, gray and orange clays is substantially identical. They all have a Q^2 and Q^3 environment. Green clay does not have the same structure as the other three. The thermal behaviour of white clay and green clay was studied by thermogravimetric analyses and differential thermal analyses. These analyses made it possible to highlight the losses and stability of the clays during heat treatments and their crystallization. They all crystallize in the form of mullite around 1000°C , there is separation phase or the crystallization of the amorphous phase at this temperature. Mass losses are low as they vary between 1.58% and 10.59%. This is the continuation of condensation and evaporation of surface water and inter-sheet water.

Key-words : Malagasy clay, NMR ^{29}Si , NMR ^{27}Al , Thermal behaviour

INTRODUCTION

Il semblerait qu'à l'origine, la terre était une masse de matières en fusion, dont la surface en refroidissant s'est solidifiée en couche mince, comme la peau se forme à la surface du lait qui vient de bouillir. Lorsque la surface était encore liquide, les matières lourdes comme les métaux avaient tendance à s'enfoncer vers le centre, ce qui laissait en surface des matériaux d'une composition assez uniforme, qui se sont refroidis et durcis en formant ce que l'on appelle les roches ignées et les minéraux.

- Le NOYAU de notre terre, épais d'environ 3.500 km, serait composé de fer et de nickel liquides ;

- Puis vient une couche de nickel et de magnésium visqueux d'environ 2 800 km d'épaisseur, appelée le MANTEAU ;

- Enfin, la croûte ou ECORCE, mince peau d'une épaisseur variant entre 10 et 70 km, se compose de trois couches solides :

- la couche inférieure basaltique, qui forme le fond des océans, essentiellement constituée de magnésium et de silicium,
- la couche supérieure granitique ou croûte continentale, à 75% de silicium et d'aluminium, ces deux oxydes étant les principaux éléments de l'argile,
- la zone superficielle sédimentaire.

"Argile" vient du latin *argilla* (prononc. g dur), emprunt probable au grec *argillos*, de même racine que *argentum* (*arguus* : éclat, blancheur). *Argillos* est probablement apparenté à *argos* " d'une blancheur éclatante " et au latin *argentum* (argent). De *arguus* vient le verbe *arguere*, archaïquement " faire briller, éclairer ", puis au figuré " démontrer " et " convaincre ". Les argiles sont des matériaux de couches élémentaires (phyllosilicates) qui s'accumulent, se désagrègent selon les conditions de leur environnement (Skawinska V., 1985). Cet arrangement induit des interfaces réactives internes, différentes des surfaces externes et des espaces confinés qui sont des véritables nano réacteurs.

Cette étude porte sur 04 différents types d'argiles notamment l'argile blanche, l'argile grise, l'argile verte et l'argile orange. Elle est focalisée sur la comparaison des comportements thermiques de ces argiles et leurs caractérisations par Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) du ^{29}Si et ^{27}Al .

MATERIELS ET METHODES

Préparation des argiles

Les argiles blanches (AC), les argiles vertes (AV), les argiles grises (AG) et les argiles oranges (AO) brutes ont été attaquées à l'acide sulfurique (11M) pendant 3h à reflux et sous agitation et à une température de 80°C. On laisse le mélange pendant 24h à température ambiante. On lave le produit pour enlever le reste d'acide qui n'a pas réagi et on traite ensuite l'argile activée à 150°C pendant 2h.

ATG-ATD

Les Analyses Thermiques Gravimétriques (ATG) et les Analyses Thermiques Différentielles (ATD) ont été les techniques utilisées pour mettre en évidence le comportement thermique des argiles ainsi que l'évolution de leur structure. La thermogravimétrie est une technique mesurant la variation de masse d'un échantillon lorsqu'il est soumis à une programmation de température, sous atmosphère contrôlée. Cette variation peut être une perte de masse (émission de vapeur) ou un

gain de masse (fixation de gaz, oxydation, ...). L'échantillon est pesé et la ligne de base est établie. L'échantillon est soumis à la montée en température. À différentes températures, des réactions chimiques peuvent libérer des espèces gazeuses ou former des oxydes entraînant une variation de masse de l'échantillon. Ce changement de masse est enregistré en fonction de la température. L'analyse thermique différentielle est une technique mesurant la différence de température entre un échantillon et une référence (matériau inerte thermiquement) en fonction du temps ou de la température, lorsqu'ils sont soumis à une programmation de température, sous atmosphère contrôlée. Avec la méthode ATD, toute transformation est détectable pour toutes les catégories de matériaux. L'échantillon et la référence sont soumis à la montée en température. Quand l'échantillon subit un changement de phase, sa réponse en température va varier par rapport à la référence.

RMN ^{29}Si et RMN ^{27}Al

La Résonance Magnétique Nucléaire (RMN) du solide permet d'étudier l'environnement des atomes dans les solides amorphes ou cristallins. En effet, lors d'une spectroscopie RMN, la perturbation due au champ magnétique engendre deux types d'interactions auxquelles sont soumis les spins : interaction avec le champ statique et le champ radio-fréquence et interactions internes au système de spin. Ces dernières correspondent aux interactions quadripolaires, dipolaires, de couplage indirect et de déplacement chimique suivant la nature des spins présents, la totalité ou une partie des interactions sont à considérer. Les interactions dipolaires ainsi que celles de déplacements chimiques conduisent à une raie d'absorption très large. L'objectif de la RMN haute résolution dans les solides a été de concevoir des méthodes qui permettent d'atténuer considérablement l'effet de ces deux interactions.

Pour les noyaux peu abondants de spin $\frac{1}{2}$ comme le silicium 29 (4.7%), les causes essentielles d'élargissement des raies dans le solide sont l'interaction dipolaire et les effets d'anisotropie de déplacements chimiques. Une opération physique réalisée par la technique de rotation à l'angle magique 54.7° (Magic Angle Spinning : MAS) permet de moyenniser ces interactions et de rétrécir les signaux. L'étude RMN de spins rares ajoute le problème de la sensibilité. Le signal de résonance dépend en effet de l'aimantation prise par le système statique. Cette aimantation est proportionnelle au nombre de spins dans l'échantillon (lié à l'abondance isotopique), au rapport gyromagnétique de l'espèce considérée et inversement proportionnelle à la température absolue de l'échantillon. La RMN-MAS en polarisation croisée permet d'améliorer la sensibilité des noyaux peu abondants ou de faible rapport gyromagnétique plusieurs fois supérieur à celui du

^{29}Si et une abondance isotopique voisine de 100%. Par contre, cette technique n'est donc pas quantitative si tous les noyaux du ^{29}Si n'ont pas le même environnement protoné.

Les spectres RMN ^{29}Si des poudres ont été enregistrés sur un appareil VNMRS-400 (59.6 MHz). L'abondance isotopique du noyau de silicium est faible. Plusieurs accumulations sont nécessaires pour l'enregistrement d'un spectre. Des pulses de 6 μs sont appliquées, le temps entre chaque pulse est de 0.04 s. La durée d'acquisition est environ de 43 mn.

Les spectres RMN ^{27}Al ont été enregistrés sur un appareil VNMRS-600 (156.29 MHz). Bien que l' ^{27}Al soit un noyau quadripolaire (spin 5/2), des temps de pulse suffisamment courts, à savoir 6 μs , ont été appliqués pour avoir une réponse quantitative. Les pulses sont séparés de 0.005s. La durée d'acquisition est environ 1h 8mn. Du fait de la forte abondance isotopique du noyau étudié, environ 1019 accumulations suffisent pour l'acquisition d'un spectre.

RESULTATS

Les courbes ATG-ATD des échantillons

Les ATG-ATD des 03 échantillons sont représentées dans les figures suivantes. Les poudres sont analysées de l'ambiante à 1000°C avec une vitesse de chauffage de 5°C par minute. Dans la Figure 1 (échantillon 1), les pertes de masses sont respectivement de 1,58%, de 5,2% et de 10,959%. Elles correspondent à la poursuite des condensations, à la perte des eaux de surface et à la perte des eaux inter feuillet.

Dans la Figure 2, on observe 3 pics endothermiques qui montrent que les phénomènes absorbent de l'énergie et un pic exothermique qui correspond à la cristallisation de l'Alumine.

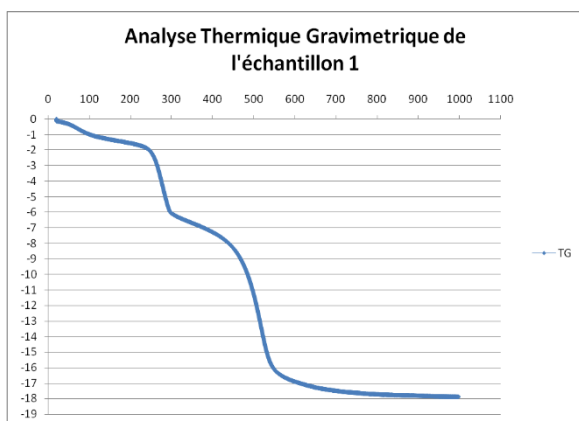


Figure 1 : Courbe ATG détaillée de l'argile blanche

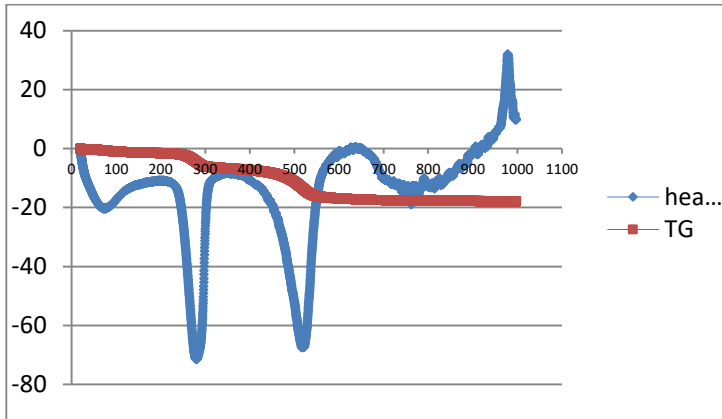


Figure 2 : Courbes ATG-ATD de l'argile blanche

Les ATG de la Figure 3 montrent les pertes de masse durant le chauffage de l'argile grise. Elles sont respectivement de 4,162%, de 2,560% et 8,85% et correspondent à la poursuite de la condensation, à la perte des eaux de surface et à la perte des eaux inter feuillet. Les ATD les 03 pics endothermiques des ATD correspondent aux pertes des eaux. On constate que le premier pic est beaucoup plus intense que le second, ceci montre que les eaux perdues par condensation sont importantes en volume par rapport aux eaux perdues en surface.

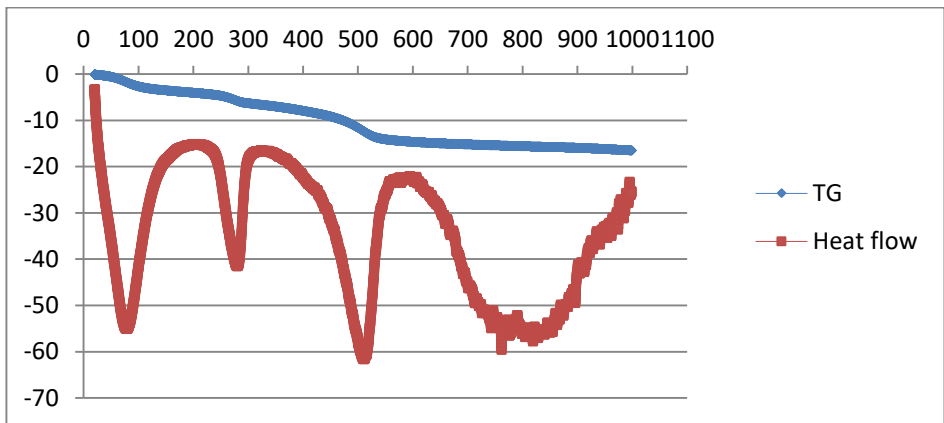


Figure 3 : Courbes ATG-ATD de l'argile grise

Les pertes de masse observées dans l'argile verte sont respectivement de 3,312%, de 1,102% et de 9,371%. Elles correspondent aux pertes des eaux de condensation, des eaux de surface et des eaux inter feuillet (Figure 4).

La Figure 4 montre, comme dans les autres échantillons, 3 pics endothermiques qui correspondent aux pertes des eaux et un pic exothermique large qui traduit un début de cristallisation de l'échantillon.

Spectres RMN ^{29}Si et ^{27}Al des échantillons

Le spectromètre RMN Bruker 400 MHz est doté d'un aimant de 9 teslas. Il est équipé d'une sonde BBI permettant de faire des analyses mono ou bidimensionnelles rapidement. Il permet de faire des analyses des noyaux tels que le ^{31}P et le ^{29}Si . Les conditions opératoires sont : ^{29}Si CPMAS, délai 5s, 2000scans, spinning rate 10KHz.

Le spectromètre RMN Bruker 600 Mhz est doté d'un aimant de 14,1 teslas et d'une cryosonde lui permettant de travailler de -40°C à 80°C . Il est utilisé pour les analyses des noyaux de ^{27}Al . Les conditions opératoires sont : ^{27}Al MAS $\pi/6$ délai 5s, 500 scans spinning rate 15KHz. Les spectres RMN ^{29}Si et ^{27}Al sont donnés ci-dessous.

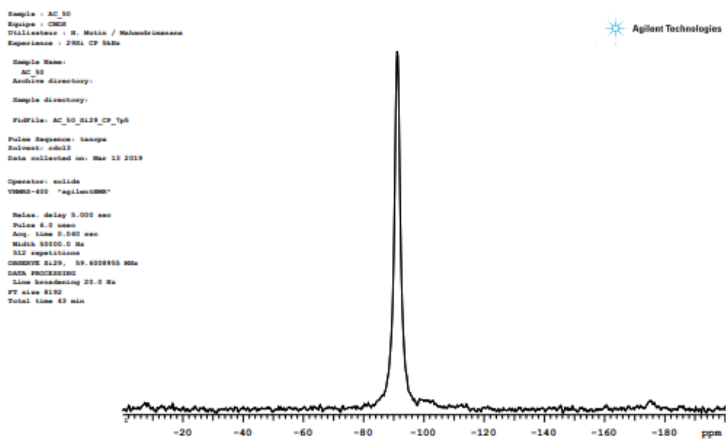


Figure 5 : Spectre RMN ^{29}Si de l'argile blanche

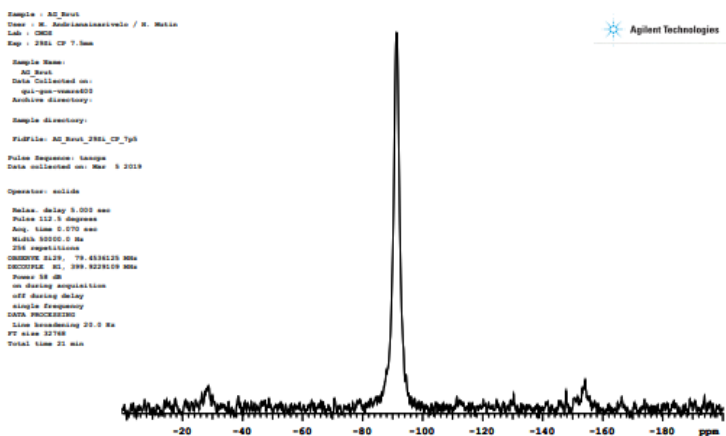


Figure 1 : Spectre RMN ^{29}Si de l'argile grise

Sample : AT_Brut
Expans : CMC8
Utilisateur : H. Mutin / Mahandriamana
Experiment : 2361_CP 34m

Sample Name:
AT_Brut
Archive directory:
Sample directory:
FidFile: AT_Brut_8129_CP_Tp5

Pulse Sequence: omegal
Solvent: mdd3
Date collected on: Mar 12 2019
Operator: sclide
VMS8-600 "agilentVMS8"

Relax. delay 40.000 sec
Pulse 6.0 usec
Acq. time 0.540 sec
Width 80000.0 Hz
846 repetitions
CROSSPO 8129_19.4008950 MHz
DATA PROCESSING
Line broadening 100.0 Hz
FT size 8192
Total time 14 hr, 40 min

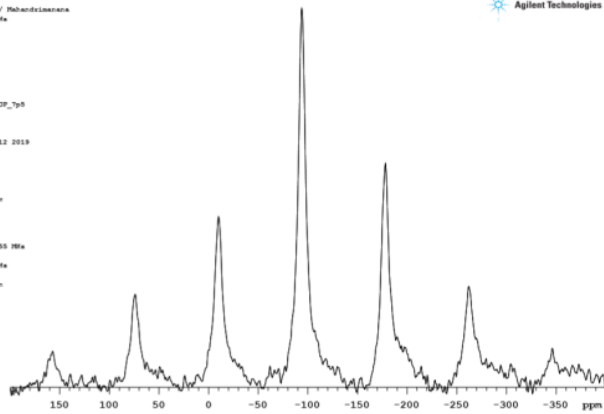


Figure 7 : Spectre RMN ²⁹Si de l'argile verte

Sample : AO_Brut
Expans : CMC8
Utilisateur : H. Mutin / Mahandriamana
Experiment : 2361_CP 34m

Sample Name:
AO_Brut
Archive directory:
Sample directory:
FidFile: AO_Brut_8129_CP_Tp5

Pulse Sequence: tmsqpa
Solvent: mdd3
Date collected on: Mar 12 2019
Operator: sclide
VMS8-600 "agilentVMS8"

Relax. delay 5.000 sec
Pulse 6.2 usec
Acq. time 0.540 sec
Width 80000.0 Hz
512 repetitions
CROSSPO 8129_19.4008950 MHz
DATA PROCESSING
Line broadening 20.0 Hz
FT size 8192
Total time 43 min

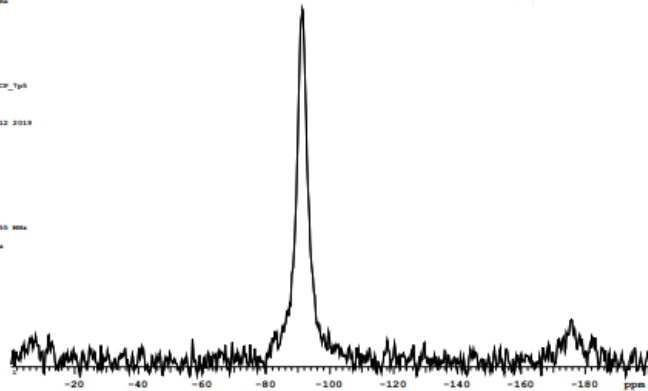


Figure 2 : Spectre RMN ²⁹Si de l'argile orange

Sample : AD_Brut
User : H. Mutin
Lab : CMC8
Exp : A127_3.2mz low Res60d 20Mz

Sample Name:
AD_Brut
Date Collected on:
SNN600MB-vmcu600
Archive directory:
Sample directory:
FidFile: AD_Brut_FTAL_CP

Pulse Sequence: omegal
Date collected on: Mar 8 2019
Operator: sclide
Relax. delay 1.000 sec
Pulse 6.0 usec
Acq. time 0.005 sec
Width 500.0 kHz
127 repetitions
CROSSPO A127_154.2005201 MHz
DATA PROCESSING
Line broadening 10.0 Hz
FT size 14384
Total time 2 min 8 sec

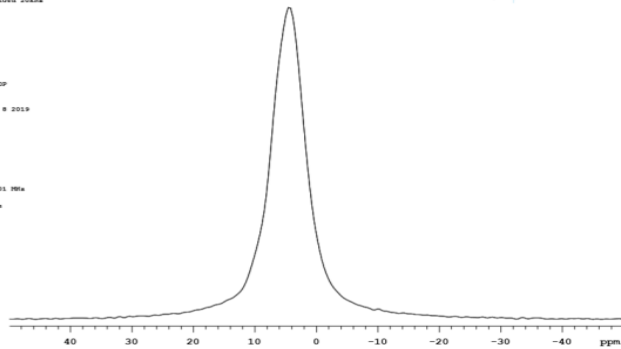


Figure 3 : Spectre RMN ²⁷Al de l'argile blanche

Sample : AG_hvst
 User : F. Mullis
 Lab : CNRS
 Exp : A127 3.2mm Low Res60d 20Hz

 Sample Name:
 AG_hvst
 Date Collected on:
 20190508-09:45:00
 Archive directory:

 Sample directory:
 FidFile: AG_hvst_27Al_DP
 Pulse Sequence: onepul
 Data collected on: Mar 8 2019

 Operator: solide

 Relax. delay: 1.000 sec
 Pulse: 4.0 usec
 Acq. time: 0.005 sec
 Width: 500.0 kHz
 128 repetitions
 OBSERVE A127, 154.293201 MHz
 DATA PROCESSING
 Line broadening: 10.0 Hz
 FT size: 16384
 Total time: 2 min 8 sec

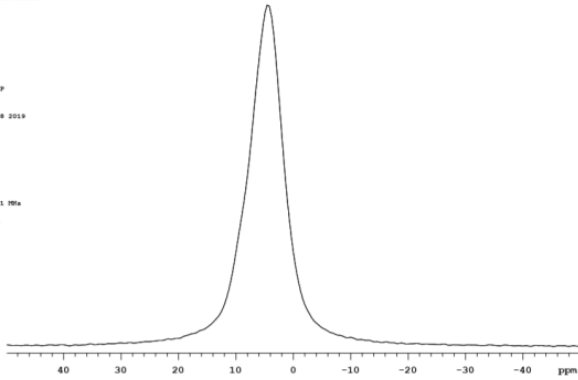


Figure 4 : Spectre RMN ²⁷Al de l'argile grise

Sample : AV_hvst
 User : F. Mullis
 Lab : CNRS
 Exp : A127 3.2mm Low Res60d 20Hz

 Sample Name:
 AV_hvst
 Date Collected on:
 20190508-09:45:00
 Archive directory:

 Sample directory:
 FidFile: AV_hvst_27Al_DP
 Pulse Sequence: onepul
 Data collected on: Mar 8 2019

 Operator: solide

 Relax. delay: 1.000 sec
 Pulse: 4.0 usec
 Acq. time: 0.005 sec
 Width: 500.0 kHz
 512 repetitions
 OBSERVE A127, 154.2931978 MHz
 DATA PROCESSING
 Line broadening: 10.0 Hz
 FT size: 16384
 Total time: 2 min 38 sec

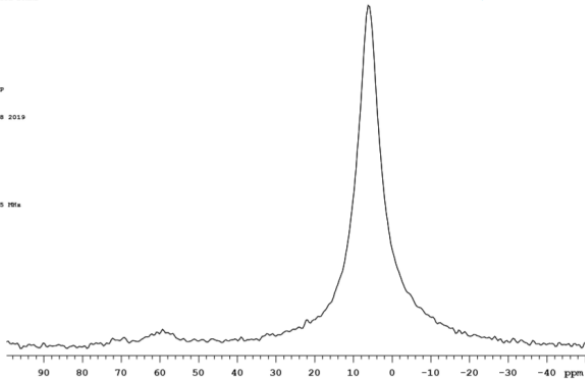


Figure 5 : Spectre RMN ²⁷Al de l'argile verte

Sample : AO_hvst
 User : F. Mullis
 Lab : CNRS
 Exp : A127 3.2mm Low Res60d 20Hz

 Sample Name:
 AO_hvst
 Date Collected on:
 20190508-09:45:00
 Archive directory:

 Sample directory:
 FidFile: AO_hvst_27Al_DP
 Pulse Sequence: onepul
 Data collected on: Mar 8 2019

 Operator: solide

 Relax. delay: 1.000 sec
 Pulse: 4.0 usec
 Acq. time: 0.005 sec
 Width: 500.0 kHz
 128 repetitions
 OBSERVE A127, 154.2932001 MHz
 DATA PROCESSING
 Line broadening: 10.0 Hz
 FT size: 16384
 Total time: 2 min 8 sec

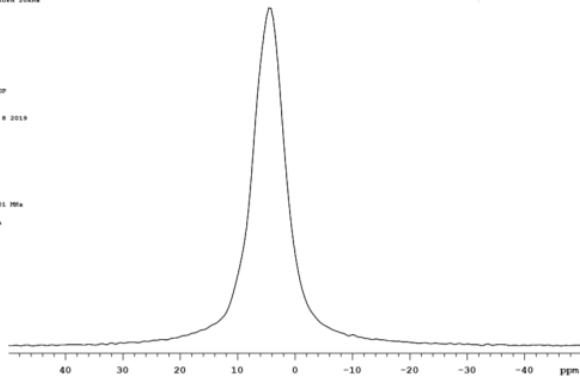


Figure 6 : Spectre RMN ²⁷Al de l'argile orange

DISCUSSION

Les analyses thermiques gravimétriques et les analyses thermiques différentielles ont permis de mettre en évidence le comportement thermique des différentes argiles ainsi que leur domaine d'utilisation. En effet, les propriétés des argiles et leurs structures changent au-delà de 1000°C car elles subissent toutes un changement de phase. On voit apparaître aux alentours de cette température la cristallisation de l'alumine γ^1 lorsque le rapport Si/Al est faible. Dans nos échantillons, le rapport Si/Al est entre 0,85 et 2,94, la cristallisation de la mullite est plus que probable. Il s'agit de la cristallisation de la phase amorphe et non pas un réarrangement atomique de l'aluminium hexacoordonné en aluminium pentacoordonné et tetracoordonné. Les pertes de masse observées correspondent toutes à la poursuite de condensation et à la déshydratation des argiles qui est de deux types, la déshydratation superficielle et la déshydratation inter feuillet.

D'après les spectres RMN ^{29}Si , il y a quatre types d'environnements de ^{29}Si résumés dans la figure ci-dessous :

Compte tenu de cette figure la majorité des environnements du ^{29}Si dans les argiles sont situés entre -80 et -100 ppm. Ils correspondent donc aux types de Si : Q² et Q³. Le maximum des pics situé vers -90 ppm traduit une bonne répartition des atomes de silicium dans les échantillons et l'existence de nombreuses liaisons Si-O-Al². Cette résonance confirme la cristallisation de la mullite obtenue en ATD^{34,56}. Dans le cas de l'argile verte, l'argile est mal cristallisée, il y a donc une interférence entre les différents sites de Si⁷. On distingue trois types de coordination de l'aluminium : l'aluminium hexacoordonné (AlO₆) dont le déplacement chimique est situé entre -10 ppm et 20 ppm, l'aluminium pentacoordonné (AlO₅) a un déplacement chimique compris entre +30 ppm et + 40ppm et enfin l'aluminium tetracoordonné apparaît entre +50 ppm à +80 ppm. Les spectres ^{27}Al (Figures 9 à 12) montrent un seul pic à 4,2 ppm qui correspond à l'environnement octaédrique de l'Al⁸.

¹ Jaymes et al., 1995

² Inoue et al., 1996

³ Engelhardt G. et Michel D., 1987

⁴ Sanz J., 1988

⁵ Nando N. et Marra R., 1989

⁶ Fahrenholtz et al., 1991

⁷ Mantovani et al., 2009

⁸ Thomas et al., 1983

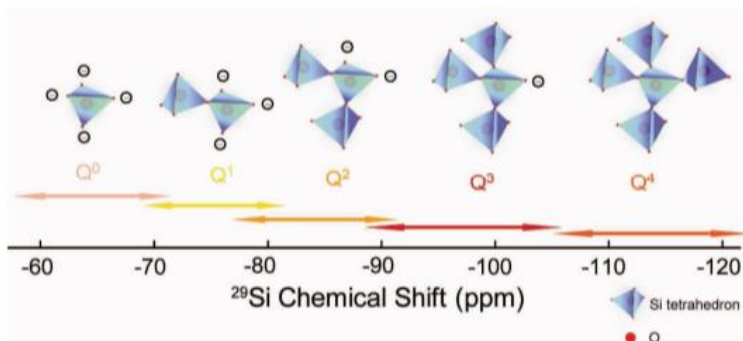


Figure 7 : Le déplacement chimique du ^{29}Si en fonction de son environnement

CONCLUSION

Cette étude a permis de mettre en évidence le comportement thermique des différents types d'argiles de Madagascar ainsi que la modification des structures lors du traitement. En effet, le domaine d'utilisation des argiles devraient être en dessous de 1000 °C, puisque au delà de cette température il y a une cristallisation de la structure naturelle. Elle a également montré les environnements et la position des atomes de Si et Al vis-à-vis de leur voisin. Les argiles indépendamment de leurs couleurs ont un environnement de types Q^2 et Q^3 par rapport à l'Al c'est-à-dire un atome de Si est toujours entouré soit de 2 Al soit de 3 Al. La cristallisation de la mullite est observée.

Je tiens à remercier l'Institut Charles Gerhardt et le laboratoire de Chimie Moléculaire et Organisation du Solide de l'Université de Montpellier de m'avoir invité pour réaliser ces travaux de recherche.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Engelhardt G., Michel D., 1987, "High Resolution Solid-Stat NMR of Silicates and Zeolites"; *Wiley and Sons Eds, Chichester*, p 145
- 2) Fahrenholtz W. G., Hietala S. L., Nexcomer P., Dando N. R., Douglas M. S., Brinker C. J., 1991, *J. Am. Ceram.Soc*;74, 2393-2397
- 3) Inoue, Masashi, Otsu Hiroyuki, Hiroshi Kominami, and Inui Tomoyuki, 1996, *Ind. Eng. Chem. Res*, 35, 295-306
- 4) Jaymes I., Douy A., Massiot D., 1995, *J. Am. Ceram. Soc*, 78, 2648-2654
- 5) Mantovani M., Escudero A. and Becerro A. I., 2009. "Application of ^{29}Si and ^{27}Al MAS NMR spectroscopy to the study of the reaction mechanism of kaolinite to illite/muscovite," *Clays Miner.*, vol. 57, no. 3, pp. 302–310

- 6) Nando N. and Marra R., 1989, *Proceedings of Symposium on High Temperature Composites*, Technomic. Lancaster, PA, 158-165
- 7) Sanz J., Madani A., Serratos J. M., Moya J. S., Aza S., 1988, *J. Am. Ceram. Soc.*, 71, 10
- 8) Skawinska V., 1985, *Le livre de l'argile, des origines à la nouvelle médecine*, Edition Lafon Michel;
- 9) Thomas M., Klinowski J., Wright P. A., Roy R., 1983, *Angew. Chem. Int. Ed. Engl.*, 22, 614

ANALGESIC AND ANTI-INFLAMMATORY ACTIVITIES OF THE METHANOL EXTRACT OF THE FRUIT OF *UAPACA BOJERI BAIL.* (EUPHORBIACEAE)

par

RAKOTONIRINA F. Mihary V.⁽¹⁾, RAZAFINDRAKOTO Zoarilala R.⁽²⁾,
TOMBOZARA Nantenaina⁽²⁾, RAFANOMEZANTSOA Roger Marie⁽¹⁾,
RAMANITRAHASIMBOLA David^(2, 3)

(1) Ecole doctorale Géochimie et Chimie médicinale, Université de Fianarantsoa, Madagascar

(2) Institut Malgache de Recherches Appliquées, Madagascar

(3) Mention Pharmacie, Faculté de Médecine, Université d'Antananarivo, Madagascar

ABSTRACT

This work aims to demonstrate the analgesic and anti-inflammatory properties of the methanol fruit extract of *Uapaca bojeri* (MEUB). Standard phytochemical screening has been led on the grinded rape fruit of this species. The writhing test was used to determine the analgesic effects of the MEUB and the carrageenan-induced paw oedema was used for the anti-inflammatory activity of the MEUB in mice. Flavonoids, anthocyanins, leucoanthocyanins, steroids, phenolic compounds and tannins were detected in the fruit. The MEUB showed dose-dependent analgesic and anti-inflammatory activities in mice. Isolation of the active compounds should be undertaken to confirm the pharmacological properties of the fruit of this species to develop this fruit as health promotor.

Key-words : *Uapaca bojeri* Fruit, Phytochemical screening, Anti-inflammatory, Analgesic, Madagascar flora

RESUME

Ce travail vise à démontrer les propriétés analgésiques et anti-inflammatoires de l'extrait méthanolique du fruit d'*Uapaca bojeri* (MEUB). Un criblage phytochimique standard a été mené sur les fruits mûrs broyés de cette espèce. Le test de contorsion a été utilisé pour déterminer les effets analgésiques du MEUB et l'œdème de la patte induit par la carraghénine a été utilisé pour l'activité anti-inflammatoire du MEUB chez la souris. Des flavonoïdes, des anthocyanes, des leucoanthocyanes, des stéroïdes, des composés phénoliques et des tanins ont été détectés dans le fruit. Le

MEUB a montré des activités analgésiques et anti-inflammatoires dose-dépendantes chez la souris. L'isolement des composés actifs devraient être entrepris pour confirmer les propriétés pharmacologiques du fruit de cette espèce afin de développer ce fruit en tant que promoteur de santé.

Mots-clés : Fruit d'*Uapaca bojeri*, Criblage phytochimique, Anti-inflammatoire, Antalgique, Flore de Madagascar

INTRODUCTION

Tapia, also known by its botanical name *Uapaca bojeri* Bail. (Euphorbiaceae), is an endemic tree from the tapia forests of Madagascar. These forests are located in four zones in the Madagascar highlands (Figure 1) including the Imamo massif, near of Arivonimamo and Miarinarivo, the Hill of Tapia in the region of Manandona between Antsirabe and Ambositra, the Itremo massif in the west of Ambatofinandrahana, and the Isalo massif near Ranohira (Tombozara et al., 2020). The tapia tree measures between 3 and 5 meters in height but sometimes it can reach up to 10 or 12 meters in height. It has dense, ball-like foliage. Its trunk is quickly divided into short and numerous branches. Its bark is woody and cracked, with suckers. Its flowers include 1 hollow disc-shaped calyx with 5 lobes. Its fruits have a drupe shape with a fleshy, sweet, sticky mesocarp; woody endocarp protecting the 3 seeds at maturity. The Tapia produces large quantities of small, juicy, oval and edible fruits, called in Malagasy Voapaka or Voatapia. Its flowering period is between March and September while its fruiting period begin from mid-September to early December (DEF, 1996). This species is known as a medicinal plant and possesses several virtues. The local population use this plant in the treatment of diabetes, infectious diseases and hypertension (Pernet et Meyer, 1975) and the rape fruit is used as a complementary food and as a source of income for the riverain population during the fructification period. Recently, several compounds have been quantified from the leaves and the stem of this species including carotenoids, organic acids and phenolics which contribute to the antioxidant, antidiabetic and anti-inflammatory properties of this species (Razafindrakoto et al., 2020). Leaf, stem and fruit are the principal storage of secondary metabolites in plants. Nowadays, the trend on research of natural anti-inflammatory drugs is growing due to the side effects caused by long-term treatment with synthetic anti-inflammatory drugs (Atkinson et Fudin, 2020; Gupta et al., 2021). In the study of Razafindrakoto et al., (2020), the secondary metabolites in the methanol extracts of the leaf and stem of this plant contributed enormously in the antalgic and anti-inflammatory activities of this species. The objective of this study is to determine the analgesic and anti-

inflammatory activities of the methanol extract of the fruits of this plant in order to contribute to the enhancement of its therapeutic potential uses.

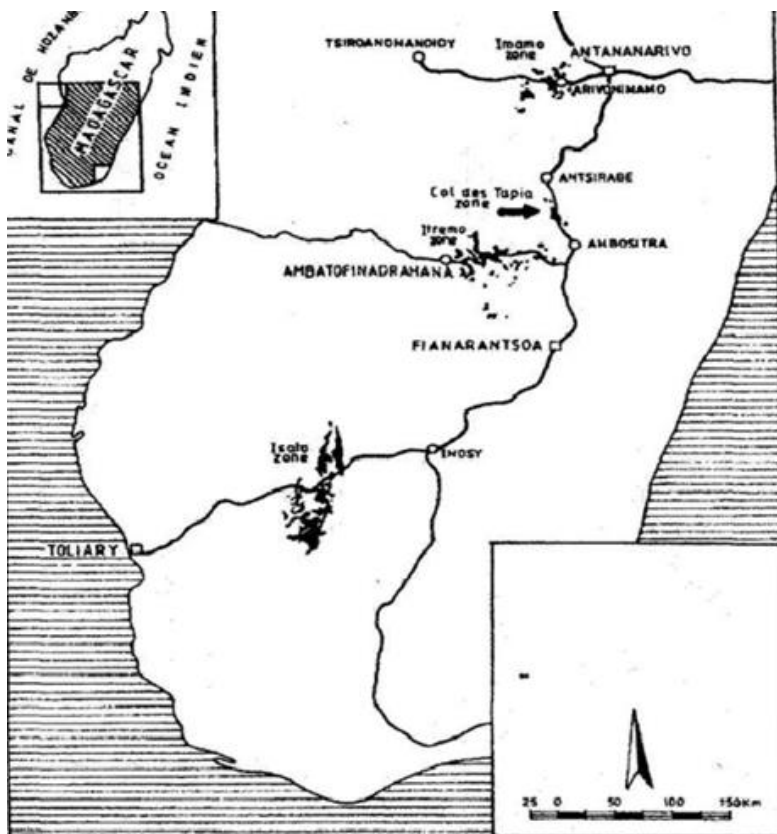


Figure 1 : Tapia forests distribution in Madagascar (Kull *et al.*, 2005)

METHODS

Plant materials

The ripe fruits of *U. bojeri* were collected in November 2019 in the Imamo forests in the district of Miarinarivo at about 70 km of Antananarivo. A specimen was identified by Mr. Benja Rakotonirina the botanist of the *Institut Malgache de Recherches Appliquées* (IMRA) and the voucher specimen was compared to the previous reference TN-021/LPA at the IMRA Botanical Department. The ripe fruits were stored at a cool and airy place away of sunlight before to be ground.

Animals

Swiss albino male and female mice (weight: 25 ± 5 g; age: 4 - 5 months), kept under controlled conditions (12 h dark and 12 h light cycle, $25 \pm 2^\circ\text{C}$ temperature,

and $50 \pm 10\%$ humidity) at the IMRA animal house, were used. The animals received a standard food pellet (1420, Livestock Feed Ltd.) and they remained fasting for one night before the experiment. All experiments were carried out in accordance with the DIRECTIVE 2010/63/EU and approved by the local ethic committee (number: 06/CEA-IMRA/2020).

Phytochemical screening

The classes of secondary metabolites were detected by the classical methods for this purpose described in work of Tombozara *et al.* (2017). Their principle is based on the formation of coloured soluble or precipitated compounds by the specific reactive reagent used.

Preparation of the methanol extract of *U. bojeri* (MEUB)

Fresh grinded plants (100 g) were macerated with 300 mL in a mixture of methanol-water (95-05, v-v) for 24 hours before filtration. The plant material was again extracted with the same solvent for twice to get an efficient extraction following the same process. The filtrates were gathered and evaporated under reduced pressure at 40°C to obtain the methanol extract which was stored at 4 °C until analysis.

Acetic acid-induced writhing test

The protocol of Olajide *et al.*, (2000), slightly modified by Razafindrakoto *et al.* (2020) was used to determine the analgesic property of MEUB. Five groups of 5 fasted mice were used during the assays. Distilled water was orally administered to group I which was used as negative control, while paracetamol at a dose of 100 mg/kg *b.w.* was administered, by gavage, to the positive control group (group II); MEUB at a dose of 100, 200 and 400 mg/kg *b.w.* were administered to group III – V respectively one hour before the injection of 100 µL of acetic acid solution (1%) in 0.9% saline solution by *i.p.* route in order to induce characteristic writhing. The number of writhing occurring between 5 and 30 min after acetic acid-injection was counted.

Carrageenan-induced in paw oedema test

In vivo anti-inflammatory activity was evaluated on the basis of inhibition of carrageenan-induced mouse hind paw oedema using a plethysmometer as previously described by Buisseret *et al.* (2019), slightly modified by Razafindrakoto *et al.* (2021). Briefly, fasted mice were divided into 5 groups of 5 mice. Group I orally received distilled water and served as negative control. Group II, orally indomethacin administered (10 mg/kg *per os*), was the positive control group and Groups III - V were fed by MEUB, respectively, at dose of 100, 200 and 400 mg/kg

(*b.w.*) one hour before the induction of 100 µl of carrageenan solution (2%) in normal saline solution (9%) into the right hind paw of each mouse. Paw volume was measured using water plethysmometer (Ugo Basile 7140, Italy) before and 30, 60, 120, 180 and 240 min after the carrageenan injection.

Statistical analysis

The results were expressed as mean ± standard error means (S.E.M.) and the data were statistically analysed using Student's *t*-test and one-way analysis of variance (ANOVA) followed by HSD Tukey multiple range test using SPSS 20.0 software. All the differences showing a $p < 0.05$ were accepted as statistically significant.

RESULTS AND DISCUSSION

Phytochemical screening

The methanol maceration allowed to the methanol extract of *U. bojeri* (MEUB) with a yield value of 12.45%. Phytochemicals present in the fruit of *U. bojeri* were reported in the table 1. Most of the phytochemicals present in the fruit were qualitatively similar with those in the leaf and the stem of this species regarding flavonoids, phenolics and tannins (Razafindrakoto *et al.*, 2020).

Table 1 : Secondary metabolites in the fruit of *U. bojeri*

Class of secondary metabolites	<i>U. bojeri</i>
	Fruit
Alkaloids	-
Flavonoids	+
Anthocyanins	+
Leucoanthocyanins	+
Terpenoids	-
Steroids	+
Lactonic steroids	-
Unsaturated sterols	+
Cardiac glycosides	-
Phenolic compounds	+
Tannins	+
Quinones	-
Polysaccharides	-
Saponins	+

+ : presence of phytochemicals

- : absence of phytochemicals

Analgesic effect of MEUB

The MEUB was evaluated using the writhing method which is one of the most common peripheral analgesic animal models for screening of analgesic drugs (Negus *et al.*, 2006). The number of writhing and the percentage of inhibition exerted by the animals after the treatment with MEUB were reported in Table 2. The intraperitoneal injection of 1% acetic acid solution into the control group caused 24.60 ± 4.30 writhing between the intervals of 25 min after the 5th min of acetic acid induction. The treatment with MEUB at each dose decreased significantly the number of writhing ($p < 0.01$) and in dose dependent manner ($p < 0.001$ with ANOVA). The paracetamol at the dose of 100 mg/kg inhibited the pain provoked by the acetic acid induction at 82.11% showing the effectiveness of the protocol. The peripheral analgesic effect may be mediated by the inhibition of cyclo-oxygenases and/or lipoxygenases (and other inflammatory mediators), while the central analgesic action may be mediated by the inhibition of central pain receptors. Several classes of phytochemicals identified in this plant exerted these properties including steroids, flavonoids and tannins (Viana *et al.*, 1998; Afzal *et al.*, 2012; Al-Sayed et Abdel-Daim, 2018; Lichota *et al.*, 2019) showing their contribution to the pain reduction effect of the MEUB. The pain inhibition effect of the rape fruit is better than that of the leaf (49.40% vs 70.73% at the dose of 400 mg/kg) and the stem (57.43 vs 70.73% at the dose of 400 mg/kg) of this species showing the importance of the other compounds detected in the fruit including steroids (Razafindrakoto *et al.*, 2020).

Table 2 : Effects of MEUB on acetic acid-induced mice by *i.p.* route (n=5)

Sample	Dose (mg/kg)	Writhing number	Inhibition (%)
Vehicle	-	24.60 ± 4.30	-
Paracetamol	100	4.40 ± 0.68^a	82.11
MEUB	100	8.60 ± 1.29^a	65.04
	200	7.60 ± 1.21^a	69.11
	400	7.20 ± 0.92^a	70.73

a : $p < 0.01$ vs vehicle

Anti-inflammatory effect of MEUB

The anti-inflammatory effect of the MEUB have been evaluated using carrageenan-induced mice paw oedema, one of the most used *in vivo* protocol for the evaluation of the anti-inflammatory activity of natural products (Razafin-drabazo *et al.*, 2020). The injection of carrageenan (2%) provoked an inflammation at the mice

paw level that was reduced progressively after the treatment. The inflammatory response is in two phases where the first phase occurs between the 0 to 120th min post carrageenan injection due to the release of histamine, serotonin and bradykinin. These mediators increased vascular permeability in the surrounding damaged tissues (Zhu et al., 2011). The second phase occurs after the 120th min and happens in association of the biosynthesis of prostaglandins and infiltration of neutrophils (Tamrat et al., 2017). The treatment with MEUB at the dose of 100, 200 and 400 mg/kg reduced significantly the inflammation at 60, 120, 180 and 240 min ($p < 0.05$, $p < 0.01$ and $p < 0.001$; table 3) compared with the negative control. The effect of MEUB was in dose-dependent manner after 60 ($p < 0.05$), 120, 180 and 240 min ($p < 0.001$ respectively). The effect of the MEUB was comparable to that of the indomethacin at the dose of 10 mg/kg at the 120th, the 180th and 240th min post carrageenan injection ($p > 0.05$) showing that the MEUB is more effective during the second phase during the release of prostaglandins however the inhibition of the first phase should not be unnoticed. These observations mean that the secondary metabolites in the MEUB could antagonize the release and/or the activity of the chemical mediators during both phases. Compared to the leaf and the stem extracts during the study of Razafindrakoto et al. (2020), the MEUB is more potent at the higher doses (200 and 400 mg/kg) after the 60th, 120th and the 180th min carrageenan-injection.

Table 3 : Effects of MEUB on carrageenan-induced mice hind paw oedema (n=5)

Sample	Dose (mg/Kg)	Inhibition of inflammation (%)				
		30 min	60 min	120 min	180 min	240 min
Vehicle	-	4.17 ± 2.04	11.50 ± 2.05	15.39 ± 2.88	20.32 ± 3.96	27.77 ± 4.35
		34.78 ± 6.00 ^b	59.98 ± 6.00 ^a	74.63 ± 5.83 ^a	88.69 ± 5.02 ^a	91.80 ± 2.02 ^a
MEUB	100	15.90 ± 6.89	36.83 ± 4.54 ^b	44.33 ± 6.01 ^b	51.60 ± 5.41 ^b	72.81 ± 8.13 ^b
	200	10.87 ± 5.11	30.31 ± 9.09	67.00 ± 7.55 ^a	81.77 ± 3.25 ^a	91.08 ± 2.98 ^a
	400	15.88 ± 5.81	36.04 ± 6.96 ^c	62.85 ± 11.02 ^b	91.40 ± 8.05 ^a	93.99 ± 5.46 ^a

a : $p < 0.001$; b : $p < 0.01$; c : $p < 0.05$ vs vehicle

CONCLUSION

This work was led to demonstrate the analgesic and anti-inflammatory activity of the fruit of the species *U. bojeri*. The MEUB showed good *in vivo* antalgic and anti-inflammatory properties due to the presence of secondary metabolites detected during the phytochemical screening including flavonoids, tannins and steroids. This work contributes in the enhancement of this species as health promotor mostly as a complementary medicine in the treatment of inflammatory diseases but further studies including the isolation of the active compounds should be undertaken to confirm the properties of this plants.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Afzal, M., Gupta, G., Kazmi, I., Rahman, M., Afzal, O., Alam, J. et al. (2012). Anti-inflammatory and analgesic potential of a novel steroidal derivative from *Bryophyllum pinnatum*. *Fitoterapia*, 83(5) : 853–858. DOI : 10.1016/j.fitote.2012.03.013
- 2) Al-Sayed, E., Abdel-Daim, M.M. (2018). Analgesic and anti-inflammatory activities of epicatechin gallate from *Bauhinia hookeri*. *Drug Development Research*, 79(4) : 157–164. DOI : 10.1002/ddr.21430.
- 3) Atkinson, T.J., Fudin, J. (2020). Nonsteroidal Anti-inflammatory Drugs for Acute and Chronic Pain. *Physical Medicine and Rehabilitation Clinics*, 31(2): 219-231. DOI : 10.1016/j.pmr.2020.01.002
- 4) Direction des Eaux et Forêts (DEF). (1996). Recueil botanique de 200 espèces forestières-Ministère des Eaux et Forêts. 503 p.
- 5) Gupta, M., Singh, N., Gulati, M., Gupta, R., Sudhakar, K., Kapoor, B. (2021). Herbal bioactives in treatment of inflammation: An overview. *South African Journal of Botany*, 143: 205–225. DOI : 10.1016/j.sajb.2021.07.027
- 6) Kull, C.A., Ratsirarson, J., Randriamboavonjy, G. (2005). Les forêts de tapia des Hautes Terres malgaches. *Terre Malgache/Tany Malagasy*, 24 : 37 - 58.
- 7) Lichota, A., Gwozdziński, L., Gwozdziński, K. (2019). Therapeutic potential of natural compounds in inflammation and chronic venous insufficiency. *European Journal of Medicinal Chemistry*, 176: 68–91. DOI : 10.1016/j.ejmech.2019.04.075.
- 8) Negus, S.S., Vanderah, T.W., Brandt, M.R., Bilsky, E.J., Becerra, L., Borsook, D. (2006). Preclinical assessment of candidate analgesic drugs: recent advances and future challenges. *Journal of Pharmacology Experimental Therapy*, 319(2): 507–514. DOI: 10.1124/jpet.106.106377

- 9) Olajide, O.A., Awe, S.O., Makinde, J.M., Ekhelar, A.I., Olusola, A., Morebise, O. et al. (2000). Studies on the anti-inflammatory, antipyretic and analgesic properties of *Alstonia boonei* stem bark. *Journal of Ethnopharmacology*, 71: 179–186. DOI : 10.1016/S0378-8741(99)00200-7
- 10) Pernet R., Meyer G., 1957. Pharmacopée de Madagascar. *Office des Recherches Scientifiques*.
- 11) Razafin-drabazo, F., Donno, D., Tombozara, N., Razafindrakoto, Z.R., Rajaonarison, J.F., Andrianjara, C. et al. (2020). Phyto-compounds and pharmacological activities of *Lygodium lanceolatum* Desv. (Schizaeaceae). *South African Journal of Botany*, 135: 225–232. DOI: 10.1016/j.sajb.2020.09.010.
- 12) Razafindrakoto, Z.R., Donno, D., Tombozara, N., Andriamaniraka, H., Andrianjara, C., Ramanitrahasimbola, D. et al. (2020). Activities of Leaves and Stems of *Uapaca bojeri* Bail. (EUPHORBIACEAE), an Endemic Plant of Madagascar. *Pharmaceuticals* 13(71): 1–16. DOI : 10.3390/ph13040071
- 13) Razafindrakoto, Z.R., Tombozara, N., Donno, D., Gamba, G., Nalimanana, N.R., Rakotondramanana, A.D. et al. (2021). Antioxidant, analgesic, anti-inflammatory and antipyretic properties, and toxicity studies of the aerial parts of *Imperata cylindrica* (L.) Beauv. *South African Journal of Botany*, 142: 222-229. DOI : 10.1016/j.sajb.2021.07.004
- 14) Tamrat, Y., Nedi, T., Assefa, S., Teklehaymanot, T., Shibeshi, W. (2017). Anti-inflammatory and analgesic activities of solvent fractions of the leaves of *Moringa stenopetala* Bak. (Moringaceae) in mice models. *BMC Complementary and Alternative Medicine*, 17(1): 473. DOI : 10.1186/s12906-017-1982-y.
- 15) Tombozara, N., Donno, D., Razafindrakoto, Z.R., Randriamampionona, D., Ramanitrahasimbola, D., Andrianjara, C. et al. (2020). The first assessment on antioxidant and antidiabetic activities of leaves and stems of *Vaccinium secundiflorum* Hook. (Ericaceae), an endemic plant of Madagascar. *South African Journal of Botany*, 130: 422-429. DOI : 10.1016/j.sajb.2020.01.035.
- 16) Tombozara, N., Razafindrakoto, Z.R., Ramanitrahasimbola, D., Razafimahefa-Ramilison, R.D., Marchioni, E., Rakotondramanana, A.D. (2017). Isolation of the gallic acid in the butanolic fraction of *crassula ovata* (Mill.) Druce (CRASSULACEAE) leaves and its vaso-relaxing effect. *American Journal of Innovative Research and Applied Sciences*, 4(5) : 200–207.
- 17) Viana, G.S.B., Bandeira, M.A.M., Moura, L.C., Souza-Filho, M.V.P., Matos, F.J.A., Ribeiro, R.A. (1997). Analgesic and Antiinflammatory Effects of the Tannin Fraction from *Myracrodruon urundeuva* Fr. All. *Phytotherapy Research*, 11(2) : 118-122. DOI : 10.1002/(SICI)1099-1573(199703)11:2<118:AID-PTR38>3.0.CO;2-J

- 18) Zhu, Z., Ma, K., Ran, X., Zhang, H., Zheng, C., Han, T. (2011). Analgesic, anti-inflammatory and antipyretic activities of the petroleum ether fraction from the ethanol extract of *Desmodium podocarpum*. *Journal of Ethnopharmacology*, 133(3) : 1126–1131. DOI : 10.1016/j.jep.2010.11.042

STUDY OF MAGNETIC AND THERMAL FIELDS OF INDUCTION FURNACE WITH QUICKFIELD

par

RINDRA HARIVÉLO Nicole⁽¹⁾, RAZANAMANAMPISOA Harimalala⁽¹⁾,
ANDRIAMAHITASOA A. Bernard⁽¹⁾, RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo⁽¹⁾

(1) Laboratoire de Thermodynamique, Thermique et Combustion, Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, Madagascar

ABSTRACT

The induction furnace is one of the applications of induction heating. It is a complex multidisciplinary system combining electromagnetism and heat transfer. In this study, the induction furnace has a cylindrical shape and is powered by the JIRAMA voltage (220V-50Hz). The primary is a coil with six turns and the secondary is the metal. This work studies the fundamental parameters of the operation of the furnace, including the magnetic field and the temperature, using the QuickField software in order to optimize its energy gains. QuickField is designed for the treatment of electromagnetic or thermal or electrothermal problems. The variation of the magnetic flux density and the thermal flux density inside and outside the furnace depend on the physical properties of the different elements of which it is composed. A zone of the metal crossed by the magnetic field is the seat of the induced currents. The density of the heat flux generated by these currents is determined by the resolution of the magnetic problem. A significant proportion of this heat is diffused into the part to be heated, another part is lost in the surrounding environment. However, the metal-to-coil distance has an influence on the heating time of the metal. In addition, control and refinement decisions for furnace components are driven by the spatial and temporal distributions of the magnetic field and Temperature in and around the furnace. Studies of the furnace parameters allow to determine the performance of the furnace and thus to optimize its operation.

Key-words : Induction furnace, Magnetic flux, Thermal flux, Induced current, Warm-up time, Performance, Optimization

RESUME

Le four à induction est l'une des applications du chauffage par induction. Il s'agit d'un système complexe pluridisciplinaire associant l'électromagnétisme et le transfert thermique. Dans cette étude, le four à induction a une forme cylindrique et est alimenté par la tension de la JIRAMA (220V-50Hz). Le primaire est une bobine comportant six spires et le secondaire est constitué par le métal. Ce travail étudie les paramètres fondamentaux de fonctionnement du four dont le champ magnétique et la température grâce au logiciel QuickField afin d'optimiser ses gains en énergie. QuickField est conçu pour les traitements des problèmes électromagnétiques ou thermiques ou électrothermiques. La variation de la densité du flux magnétique et celle du flux thermique à l'intérieur et à l'extérieur du four dépendent des propriétés physiques des différents éléments qui le composent. Une zone du métal traversé par le champ magnétique est le siège des courants induits. La densité du flux thermique généré par ces courants est déterminée par la résolution du problème magnétique. Une proportion importante de cette chaleur est diffusée dans la pièce à chauffer, une autre partie est perdue dans le milieu environnant. Cependant, la distance métal-bobine a une influence sur le temps d'échauffement du métal. En outre, les décisions de contrôle et de perfectionnement des composants du four sont dirigées par les distributions spatiales et temporelles du champ magnétique et celles de la température à l'intérieur et aux alentours du four. Les études des paramètres du four permettent de déterminer sa performance et d'optimiser ainsi son fonctionnement.

Mots-clés : Four à induction, Flux magnétique, Flux thermique, Courant induit, Temps d'échauffement, Performance, Optimisation

INTRODUCTION

In Madagascar, the manufacture of aluminum pots and objects is developed by the artisanal foundry of Ambatolampy. Fueled by charcoal embers, its brick furnace melts metal at a temperature exceeding 660°C. Since the beginning of the twentieth century, iron casting and induction furnaces have been developed in several countries. The discovery of electromagnetic induction by Michael Faraday was the basis for studies and research in the field of electromagnetism, (Gandhewar V. R., 2011). Subsequently, studies have shown a guide for heating a metal part by induction (Meelab D., 1993). The study of a furnace remains complex due to the different parameters to be considered during its design. When an induction furnace is in operation, the distribution of electric and magnetic fields is involved. The present work, among other things, relates to the study of the fundamental parameters of the operation of the induction furnace, including the magnetic field and the temperature, thanks to the QuickField software in order to optimize its energy gains. Thus the

general approach on the induction furnace and the presentation of the QuickField software are carried out. At the end of our work, the simulations with QuickField determine the optimal parameters of the "furnace" model, thus giving its performance.

MATERIALS AND METHODS

Induction heating is an electrothermal technique which allows to heat electrically conductive materials, (Dhiman B., 2015) without physical contact with an electrical source, (Bisserieux Ch., 2012). Its physical principles, as shown in Figure 1, are based on the phenomenon of electromagnetic induction and on the Joule effect (Dhiman B., 2015 ; Lucia O., 2013). A winding traversed by an instantaneous alternating current $i(t)$ creates a magnetic field $B(t)$ that varies with time. For a metal part introduced in the variable magnetic field, parts of the part crossed by this field are seats of induced currents. And by Joule effect, these parts traversed by the induced currents cause heat releases (Bisserieux Ch., 2012 ; Patel P., 2019)

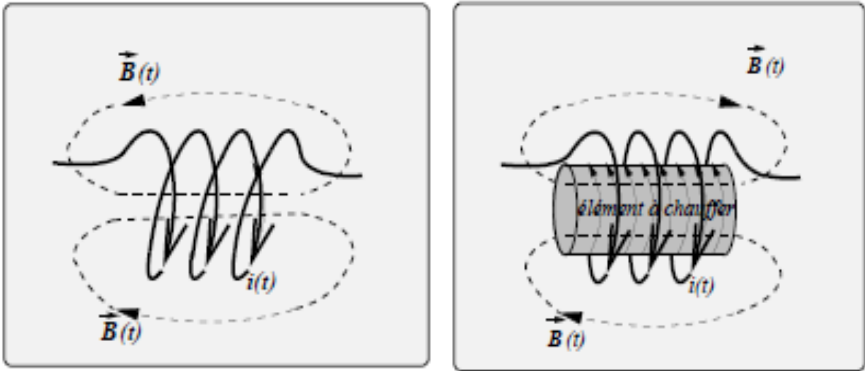


Figure 1 : Principle of induction heating

The induction furnace, shown in Figure 2, is a device with an induction heating system, (Patel P., 2019), transforming the solid state of metal objects into a liquid state, by heat, (Bisserieux Ch., 2012). It consists mainly of two parts which are the feed and the crucible. The refractory crucible is surrounded by an induction coil.

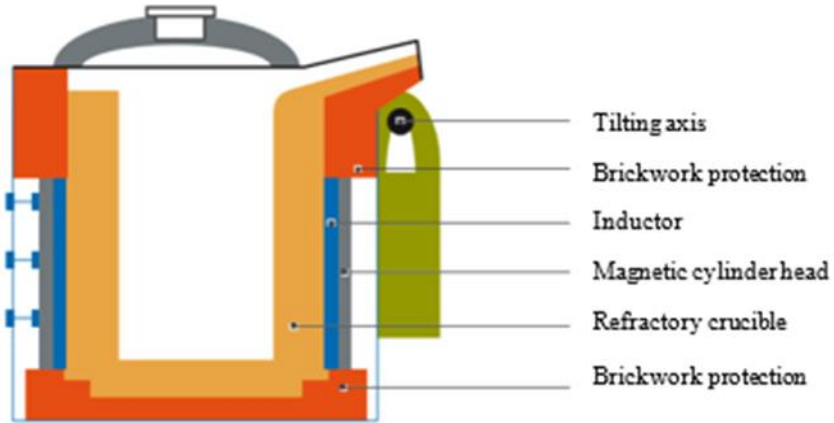


Figure 2 : Induction furnace, (Bisserieux Ch., 2012)

In our study, we considered that the electromagnetic properties and thermal properties of the metal depend mainly on the frequency. At the frequency f of 50Hz, the resistivity ρ and magnetic permeability μ_r of common metals are reported in Table 1.

Table 1 : Characteristics of some conductors

Body	Silver	Copper	Aluminum	Iron	Platinum	Steel
$\rho [10^{-8} \Omega.m]$	1.6	1.7	2.8	9.9	10.6	16
μ_r	0.999981	0.999900	1.000022	10,000	1,000360	40

The consolidation of the furnace with a complex structure requires an adequate and special device. The QuickField calculation software is based on the finite element method and allows the resolution of electromagnetic, thermal and mechanical stress problems. Its operation starts with the description of the problem. The solutions are presented by figures and/or curves with a good accuracy. The organization of the software follows well defined steps to analyze and simulate a given problem and Figure 3 presents the corresponding flowchart.

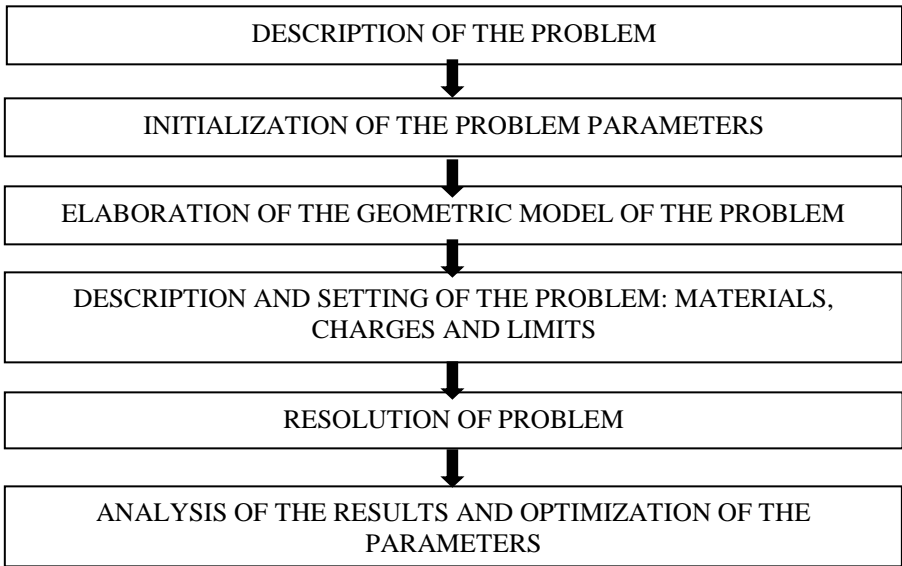


Figure 3 : Flowchart for solving a problem in QuickField

RESULTS

For the simulations with QuickField, we developed the geometry of the two-dimensional (2D) model as shown in Figure 4. We assumed that the metal and the furnace have the shape of a hollow cylinder. It is powered by the single-phase sector of the Jiro sy Rano Malagasy Company (JIRAMA) (voltage 220V, frequency 50Hz). The furnace consists essentially of a steel coil, of which is made up of six turns as shown in Figure 4. We have assumed that all material characteristics are linear.

To see the film effect on the metal, we vary the distance between the metal and the coil. In this study, we took three different positions inside the furnace. According to Figure 5, each case shows the current density distribution by the color variation, the magnetic field distribution by the field lines and the coupling effect by the metal-coil distance.

The magnetic field diffused in the furnace is modified by the presence of the metal. In the vicinity of the coil, the heating occurs on a part of the part to be melted according to the distance between this part and the inductor. The flux density at the surface of the part is proportional to the value of the coupling. It is thus possible to modify the temperature rise by modifying the coupling. Thus, the eddy currents are more important in the outer layer than in the core of the object. As a result, the heat is mainly generated on the outside. Figure 6 shows the current distribution curve in the metal.

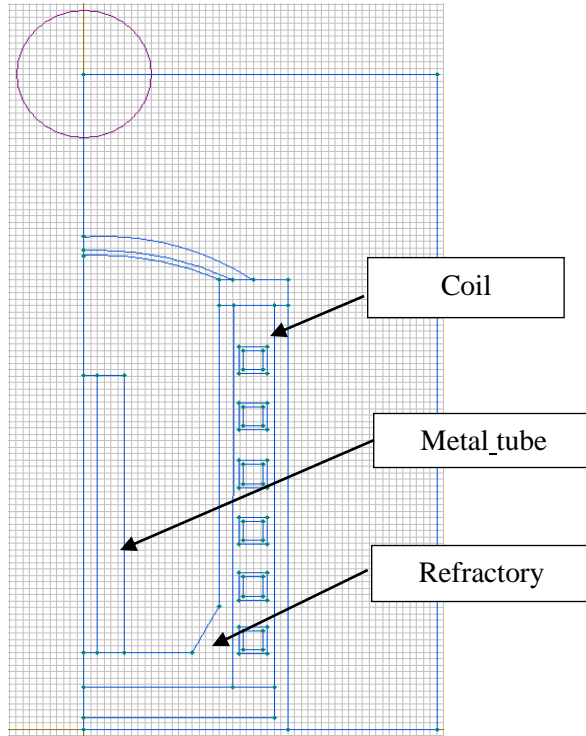


Figure 4 : Geometry of the 2D model.

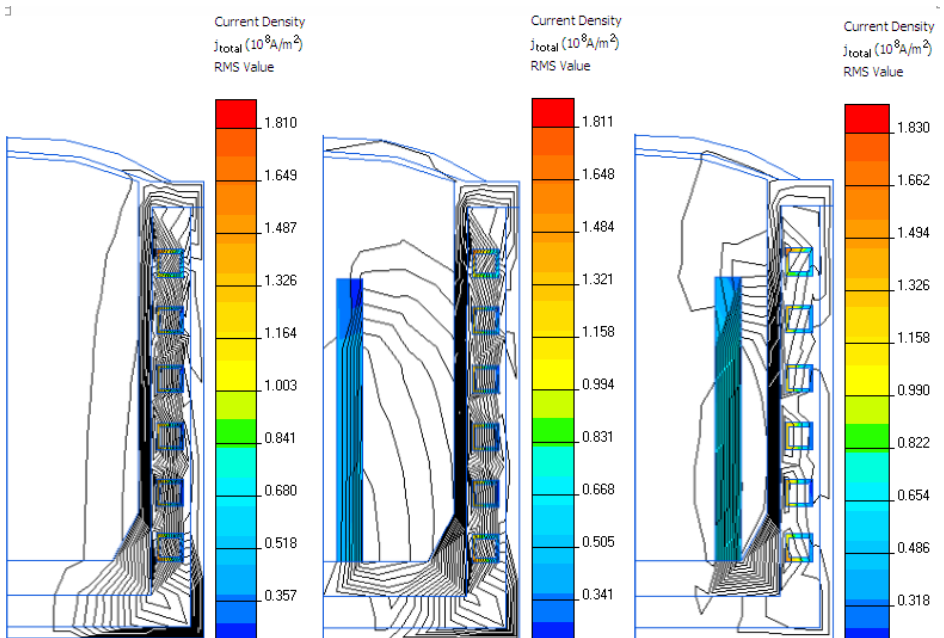


Figure 5 : Coupling effect and current density and magnetic field distributions

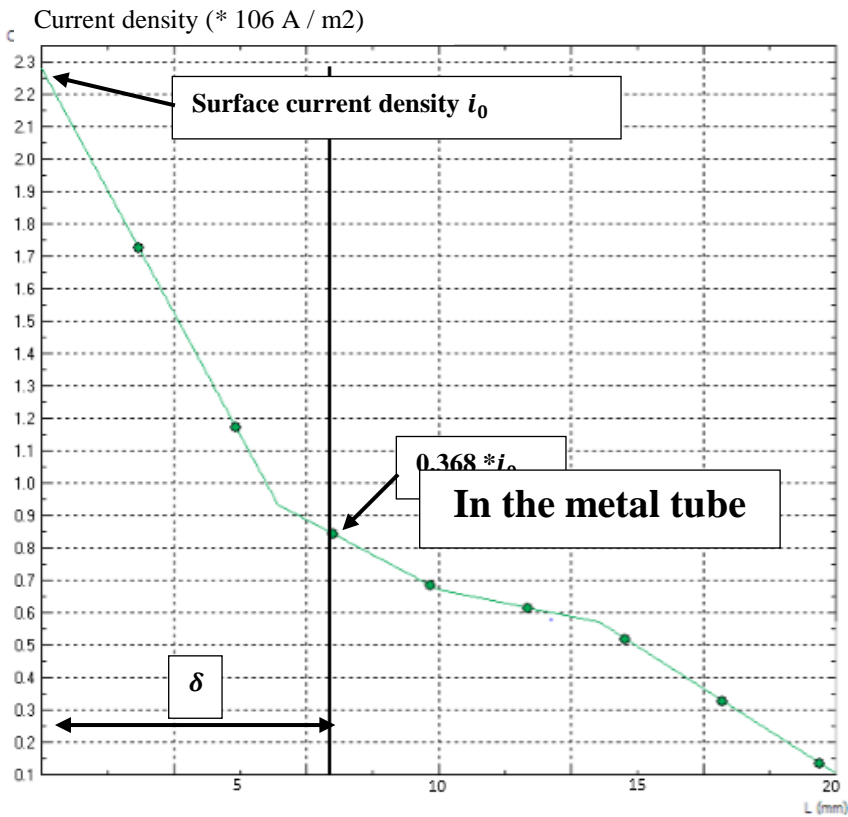


Figure 6 : Current distribution curve in the metal

In metal, the current density is maximum at the surface. It decreases and tends to become zero towards the depth of the part. The currents flowing in the metal are irregularly distributed and concentrated on the surface. This phenomenon is characterized by the penetration depth δ .

Table 2 shows the average values of the current densities at the metal surface and those at a distance δ from the surface.

Table 2 : Current density at the metal surface and current density at a distance δ from the surface

	Distance to the external surface of the load x (m)	Current density (A / m ²)
On the surface	0	2,270,000
At the distance δ	0.0072	835 360

The value of the current density at the penetration depth is $I(\delta) = 835360 \text{ A/m}^2$. At the surface, it is maximum with a value of $2,270,000 \text{ A/m}^2$.

Distribution of the magnetic field in the furnace

We see on Figures 7, 8 and 9 the variations of the magnetic flux density created respectively in the metal, in the refractory, in the screen and around the furnace.

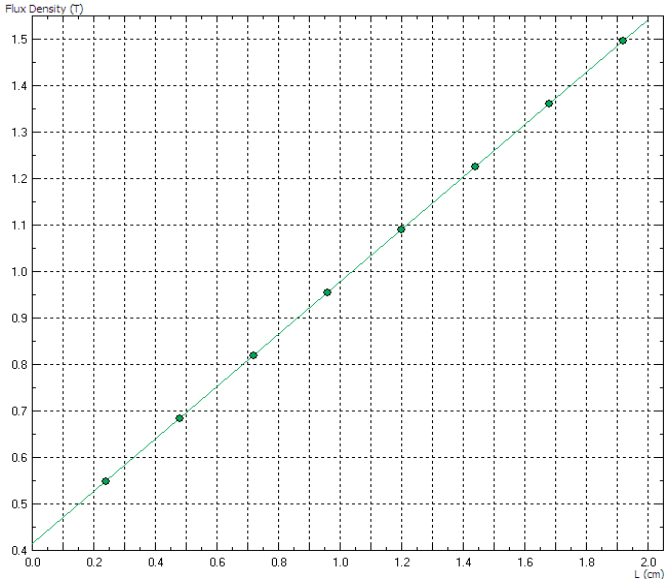


Figure 7 : Variation of the magnetic flux in the metal tube

The magnetic flux increases from the inside of the metal to the surface with the respective values of 0.4 to 1.5T.

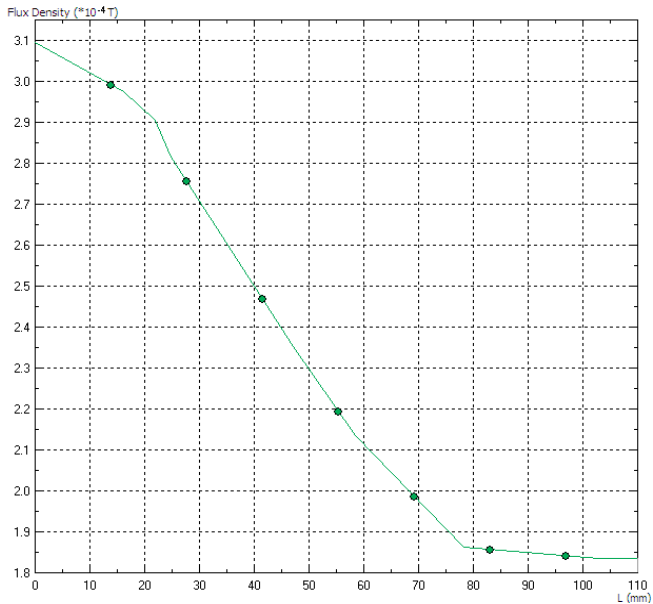


Figure 8 : Variation of the magnetic flux in the screen.

The magnetic flux density varies from 0.657 to 0.71T, from the inner surface to the outer surface of the screen. 7

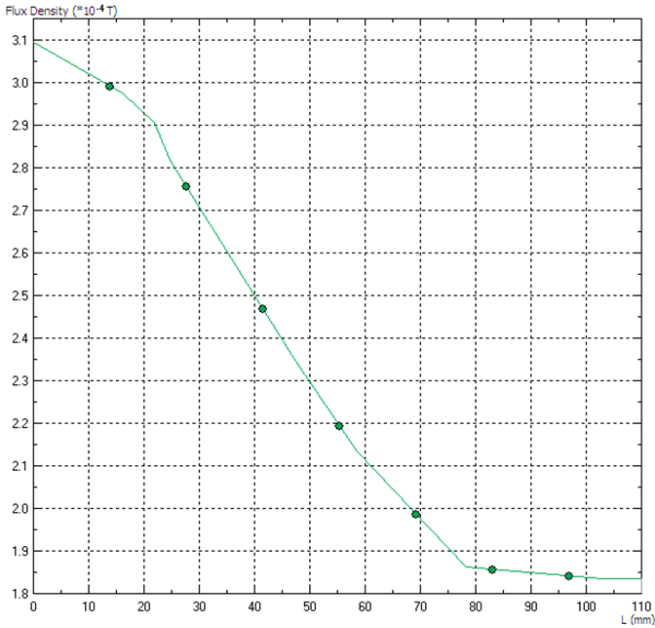


Figure 9 : Variation of the magnetic flux from the outer surface of the furnace to the outside

We observe that the further away from the furnace, the more the flux decreases. Outside the furnace, we observe a maximum flux of density $3.1 \times 10^{-4} T$ at its surface. In the air, the density of the magnetic flux decreases abruptly. The magnetic flux is less dense compared to other materials.

Temperature distribution in the oven

This part determines the temperature distribution at a given time. With the QuickField software, we solve the heat transfer problem in the oven and its surroundings.

After 36 seconds of heating, the temperature distribution is shown in Figure 10.

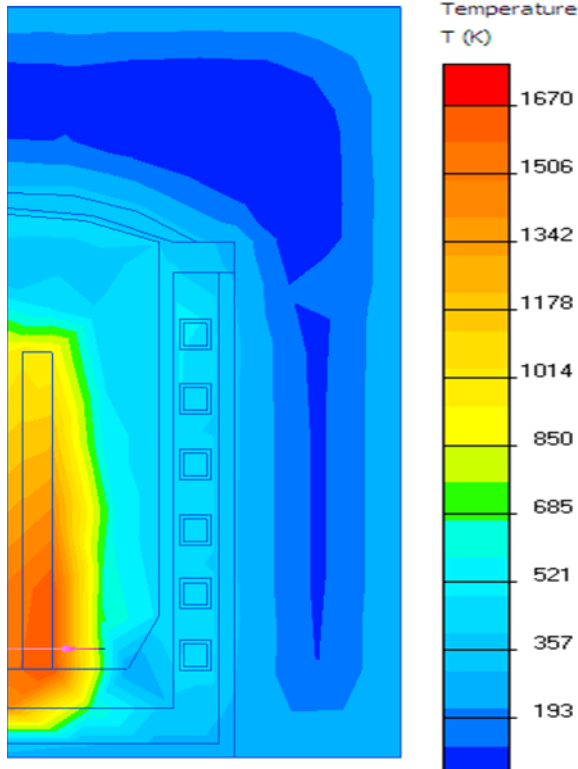


Figure 10 : Temperature distribution on the external surface of the metal after 36 seconds of heating

We observe the maximum temperature that occurred on the surface of the metal tube with a value near 1,673K. The temperature of the coil is equal to 552.4K. Figure 11 shows us the curve of temperature variation that corresponds to this distribution.

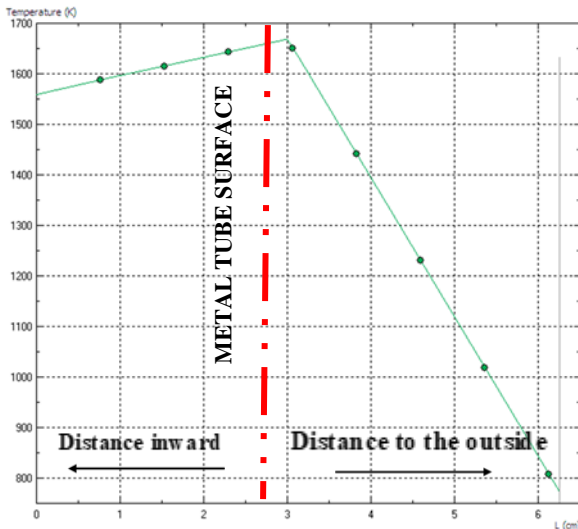


Figure 11 : Temperature variation curve from the inside to the outside of the metal

The maximum temperature is observed on the surface of the tube with a value of 1673K. The heat transmitted to the interior of the metal is greater compared to the heat transmitted to its surroundings.

DISCUSSIONS

QuickField is a very powerful tool that can couple magnetic and thermal problem solving in a complex electrical device such as an induction furnace. Control and refinement decisions of the furnace components to be made are dictated by the magnetic field distribution, the temperature distribution inside and around the furnace.

When designing a furnace, it is important to study the properties and dimensions of each component in order to avoid unnecessary expenses and dangerous damages. In the vicinity of the furnace, we observe a low density of magnetic flux, especially when moving away. During its operation, there is no risk for the users.

Parts of the metal crossed by the magnetic field are the seat of induced currents. The heat density generated by these currents is determined by the resolution of the magnetic problem. Heat transmissions are generated inside the furnace, from the hot sources to the cold sources. Over time, the temperature of each component of the furnace increases progressively until the metal is molten. A significant proportion of this heat is diffused into the part to be heated by conduction, but some of this energy is lost to the surrounding environment. Heat losses are observed towards the furnace components. The distance between the metal and the coil has an influence on the heating time of the metal. The greater the distance, the longer the melting time.

CONCLUSION

The magnetic fluxes are mainly concentrated at the surface of the metal where the current density and the temperature are maximum. This implies that melting begins at the outer surface of the metal in the lower part near the bottom of the furnace. The outer surface of the metal acts as a heat producing source. With QuickField, we were able to determine the temperature variation from one point to another in the furnace and its surroundings at a given time. The simplified model of the furnace developed with this software shows the contribution of the material properties on the heat transfers during the operation of the furnace. The penetration depth and the maximum value of the surface current density influence the temperature distribution.

The most active part of the furnace is the coil creating magnetic fields. These fields contribute to the heating of an electrically conductive substance placed inside

the furnace to its melting point. The properties of the materials used in an induction furnace have an important influence on the melting process. A fast melting depends on the conductivity of the metal and the distance between the inductor and the metal. The principle of melting in an induction furnace is perfectly adaptable to the quality control process.

The temperature is a very significant parameter in an induction furnace and therefore for a heat source. Moreover, the induction furnace uses electricity as an energy source in order to melt the metal to be recycled without using the fossil fuels previously used.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Bissériex Ch., Laurent P., Cabaret Ph., Marteau E. Ganem Y., Becker A., et al. (2012). *Champs magnétiques*. Olivier-Noyer : INRS.
- 2) Dhiman B., Bhatia O.S. (2015). Oil Fired Furnace and Induction Furnace : A Review. In *International Journal of Scientific & Engineering Research* Volume 6, Issue 8: 602-613.
- 3) Gandhewar V. R., Bansod S. V. et Borade A. B. (2011). Induction Furnace - A Review. In *International Journal of Engineering and Technology* Vol.3 (4): 277-284. ResearchGate
- 4) Lucia O., Maussion P., Dede E. and Burdio J. (2013). Induction Heating Technology and Its Applications: Past Developments, Current Technology, and Future Challenges. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics* vol. 61 (n°5): 2509-2520. HAL.
- 5) Meelab D., Longeot O., Krähenbühl L., Nicolas L. et Wendling P. (1993). Control of an induction heat treatment by the measure of power. In *IEEE Transactions on Magnetics, Institute of Electrical and Electronics Engineers* 29(2) : 1558-1561. HAL.
- 6) Patel P., Agarwal R., Patel T., Suraj R. et Mehta N. (2019). Thermal Analysis of Induction Furnace Wall. In *International Journal of Technical Innovation in Modern Engineering & Science IJTIMES* Volume 5, Issue 05 : 1114-1120. ResearchGate.

ARTIFICIAL NEURAL NETWORK-BASED PREDICTION OF FUEL CONSUMPTION IN ANTANANARIVO

par

ANDRIAMAHITASOA Bernard Andriamparany⁽¹⁾, RABEDONASOA
NANDRIANINA⁽¹⁾, RANDRIAMANANTANY Zely Arivelo⁽¹⁾

(1) Physics and Applications, Department of Physics, Faculty of Sciences, University of Antananarivo, Madagascar

ABSTRACT

The ability to model and forecast fuel consumption is essential to improve fuel economy by users (individuals, companies, etc.) and to prevent shortages. Therefore, we propose fuel consumption forecasting models (diesel, gasoline, kerosene) based on artificial neural network (ANN) in the Antananarivo region. Due to the availability of advanced machine learning techniques that have become increasingly common in predictive studies in recent years, neural machine learning is suitable for such an analysis, as the model can be developed by learning the data patterns. In this paper, we present the predictive ability of three time series forecasting neural network models in fuel consumption.

Key-words : Artificial neural network, Fuel consumption, Prediction, Artificial intelligence

RESUME

La capacité de modéliser et de prévoir la consommation de carburant est essentielle pour améliorer l'économie des carburants par les usagers (particuliers, entreprises, etc.) et de prévenir, en conséquence, les pénuries. Aussi, nous proposons des modèles de prévision des consommations de carburants (gasoil, essence, pétrole lampant) basés sur les apprentissages neuronales (ANN) dans la région d'Antananarivo. En raison de la place exceptionnelle des techniques avancées d'apprentissage automatique qui sont devenues de plus en plus courantes dans les études prédictives ces dernières années, l'apprentissage automatique neuronal convient à une telle analyse, car le modèle peut être développé en apprenant les modèles de données. Dans cet article, nous proposons la capacité prédictive de trois modèles neuronaux concernant la consommation des carburants sous forme de séries chronologiques.

Mots-clés : Réseau de neurones artificiels, Consommation de carburant, Prédiction, Intelligence artificielle

INTRODUCTION

Fossil energy is still among the types of energy most consumed by humans and, according to many researchers, the Earth's reserves of fossil energy resources are not unlimited and will eventually be exhausted before the end of the next century if we continue our fossil energy consumption.

In Madagascar, the consumption of petroleum products continues to grow. In fact, it has increased annually by more than 3% since 2012, [1].

For all these reasons, it is necessary to develop predictive models of fuel consumption. The ability to model and predict fuel consumption is another alternative to improve fuel economy, prevent shortages, and avoid consumption peaks or overconsumption.

In the past, several fuel consumptions models have already been developed, [2], [3], [4], [5], [6], [7], [8], [9], [10], [11]. In view of these works, we have opted to develop various models for the monthly forecast of the consumption of each type of fuel in Antananarivo. These models are developed using neural networks by backpropagation. In fact, such models are able to learn non-linear mappings between inputs and outputs. Performance measurements of each of the models are undertaken in order to first evaluate its efficiency, and then to proceed to comparative study to determine its validity. Thus, three models are built to forecast consumption in Antananarivo using the ANN. The models developed are fully connected univariate models, based on past consumption values and built with multilayer perceptrons (MLP).

The first model (MODPLI) is a model for the prediction of kerosene consumption. The second model (MODSCII) is for the consumption of premium fuel and the third model MODGOIII is for the consumption of diesel fuel.

DATA

We have at our disposal three fuel consumption databases for the city of Antananarivo. Each database consists of a monthly data set from January 1995 to June 2021, i.e. 318 measurements. The time series of fuel consumption for Antananarivo, according to Figure 1, shows certain regularities and a periodic behaviour with similar consumption for the 3 types of fuel.

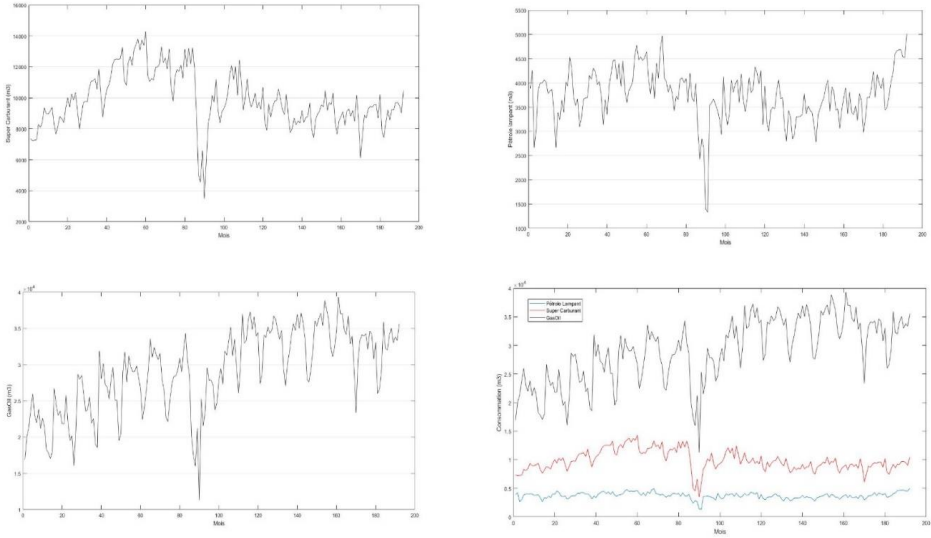


Figure 1 : Fuel consumption in Antananarivo between 1995 and 2021

METHOD

ANNs were developed as a generalization of mathematical models. As shown in Figure 2, ANNs have a parallel and distributed processing structures. In general, they are composed of three layers: the input layer, the hidden layer and the output layer. Each layer has a number of neurons. Signals are transmitted between the neurons via connection links. Each connection link has an associated weight, which multiplies the transmitted signal in a typical neural network. Each neuron uses an activation function (usually non-linear) to its net input (sum of weighted input signals) to determine its output signal. The input layer of the backpropagation network consists of m units ($X_1, \dots, X_i, \dots, X_m$) and one bias unit (X_0). The hidden layer consists of n units ($NN_1, \dots, NN_j, \dots, NN_n$) and a polarization unit (NN_0), while the output layer has a Y unit, which is the value to be predicted. The polarization units have the value "1" as input signals. To build a prediction model, the network is processed in three steps. Step (1) is called training, after which the network is trained to predict future data based on past and present data. Step (2) is called a test, where the network is tested to stop or continue the training. Step (3) is called evaluation, where the network stops training and is used to predict future data and to calculate different error measures. The number of neurons in the hidden layer is chosen according to the complexity of the function to be approximated, and the performance of each model is evaluated by the RMSE and MAPE errors.

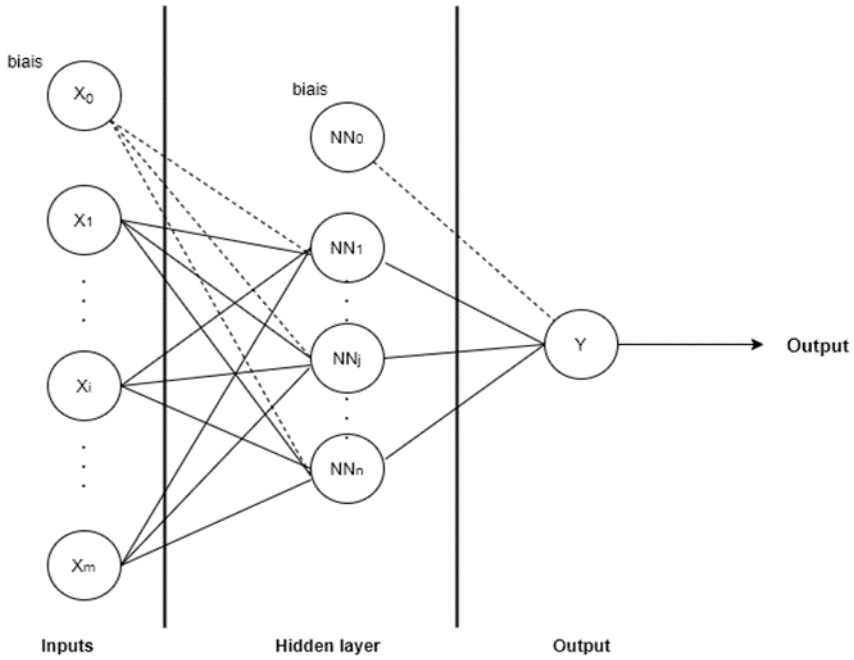


Figure 2 : Presentation of the models used with variable numbers of hidden neurons

Learning

Backpropagation network learning consists of three steps:

- Enables propagation or feedforward of the training model from the inputs to the output,
- Computes and backpropagates the associated error,
- Adjusts the weights.

During the feedforward phase, each input unit X_i receives an input signal x_i and propagates this signal to each of the hidden units $NN_1 ; \dots ; NN_n$. Firstly, the input signal nn_in_j for each hidden unit is the sum of each input signal x_i multiplied by the corresponding weight w_{ji} according to the relation :

$$nn_in_j = w_{0j} + \sum_{i=1}^n x_i w_{ij} \quad (1)$$

Then each hidden unit calculates its activation to obtain the signal nn_j .

$$nn_j = f(nn_in_j) \quad (2)$$

The same procedure is applied to the hidden layer and the output layer. Thus, each hidden unit NN_j broadcasts its signal n_j to the output unit Y_1 . Therefore, the

input signal y_in_l is the sum of each signal nn_j multiplied by the corresponding weight w_{lj}

$$y_in_1 = w_{10} + \sum_{j=1}^p nn_j w_{1j} \quad (3)$$

After that, the output unit calculates its activation to obtain the signal y_1

$$y_1 = f(y_in_1) \quad (4)$$

Thus, in this step, the input layer diffuses the input signals to the output layer. The second stage of the backpropagation algorithm is error backpropagation. During this phase, the output unit Y_l calculates its error $(t_l - y_l)$. Based on this error, the error information term δ_1 is calculated. Then, δ_1 is used to redistribute the error to the output unit Y_l to all units of the previous layer.

$$\delta_1 = (t_1 - y_1) f'(y_in_1) = \sigma \cdot (t_1 - y_1) y_1 (1 - y_1), \quad (5)$$

Where t_l is the output target, and σ is the slope parameter.

First of all, the factor δ_1 is distributed to the hidden units in the following steps. Thus, the output unit Y_l calculates its weight correction term, which is used to update w_{lj} later in the third phase. The term weight correction Δw_{1j} is calculated by multiplying the learning rate α , the error information term δ_1 and the signal nn_j of the hidden unit NN_j :

$$\Delta w_{1j} = \alpha \delta_1 nn_j \quad (6)$$

Then the output unit Y_l calculates its bias correction term, which is used to update its bias w_{l0} later in the third phase. The bias correction term is calculated by multiplying the learning rate α by the error correction term δ_1 .

$$\Delta w_{10} = \alpha \delta_1 \quad (7)$$

The following procedure consists in propagating the factor δ_1 to all input units (x_0, \dots, x_m) by going through the following steps :

Each hidden unit $(NN_j, j=1, \dots, n)$ calculates its error δ_in_j by multiplying the output error information term δ_1 by its corresponding weight w_{lj} .

$$\delta_in_j = \delta_1 w_{lj} \quad (8)$$

Then, it calculates its error information term δ_j using the following formula :

$$\delta_j = \delta_in_j f'(nn_in_j) \quad (9)$$

Each hidden unit NN_j calculates its weight correction term, which is used to update its weight w_{ji} later in the third phase. The weight correction term is calculated by multiplying the learning rate α , the error information term δ_j and the input signal x_i .

$$\Delta w_{ji} = \alpha \delta_j x_i \quad (10)$$

Then, each hidden unit NN_j calculates its bias weight correction term, which is used to update its bias w_{j0} later in the third phase. The bias weight correction term is calculated by multiplying the learning rate α and the error correction term δ_j .

$$\Delta w_{j0} = \alpha \delta_j \quad (11)$$

Therefore, errors are back propagated from the output layer to the input layer to adjust the weights between the layers.

The third phase of the learning algorithm consists of updating the weights using the weight correction terms calculated in the second phase. This is a two-step procedure.

Thus, the output unit Y1 updates its weights w_{1j} ($j=0, \dots, n$) using the following formula :

$$w_{1j}(t + 1) = w_{1j}(t) + \alpha \delta_1 n_j + \gamma (w_{1j}(t) - w_{1j}(t - 1)) \quad (12)$$

Where γ is the motion parameter.

Then each hidden unit NN_j ($j=1, \dots, n$) updates its weights w_{ji} ($i=0, \dots, m$) using the following formula :

$$w_{ji}(t + 1) = w_{ji}(t) + \alpha \delta_j x_i + \gamma [w_{ji}(t) - w_{ji}(t - 1)] \quad (13)$$

Therefore, by adjusting the weights, the network learns and improves its performance.

Implementations

The study covers the period from 1995 to 2021. This period is used to train, test and evaluate the ANN models. The training of the models is based on a fifteen-year training set, from January 1995 to December 2009, while the testing phase covers the period from January 2010 to December 2019. In addition, the evaluation phase covers the period between June 2019 and June 2021. The purpose of this study is to predict future data using the backpropagation algorithm. This method has proven to be very effective in training multi-layer neural networks. However, it is necessary to normalize the data to have values between -1 and 1 using the following algorithm :

$$y = (ymax - ymin) * (x - xmin)/(xmax - xmin) + ymin \quad (14)$$

It is assumed that X has only finite real values and that the elements in each row are not all equal. If xmax=xmin or if xmax or xmin are non-finite, then y=x and no change occurs.

The input parameters are retrieved from the configuration file. The parameters include learning rate, momentum, slope of the Sigmoid function, number of hidden layers and the corresponding number of hidden units.

The ANN models are implemented via a Netlab programming toolkit using the scientific software matrix laboratory (MATLAB). This program is used to train the model, test it and evaluate it. The program has several steps :

- The weights are chosen randomly,
- The training dataset is fed to the network several times,
- Backpropagation is performed using the mean square error as a stopping criterion for training, never exceeding the maximum number of cycles,
- The network is tested using the test dataset and the final performance metrics of the training and test set are calculated.
- The test set is evaluated.

Finally, the network evaluation consists of calculating the root mean square error (RMSE) and the mean absolute percentage error (MAPE).

RESULTS AND DISCUSSIONS

MODPLI

Since the current and future consumption values depend on the previous energy consumption, a univariate ANN model is implemented. The MODPLI model requires previous values as input data models. This model is fully connected, as each input unit broadcasts its signal to each hidden unit. All models are tested for a different number of network inputs and hidden units. The parameters are selected after extensive testing by varying the values of the learning rate and the number of input units. The parameter values producing the lowest error values are shown in Table 1. In addition, we find that a network with too few hidden nodes is not able to learn complicated functional models, whereas a network with too many nodes is not able to generalize well. The prediction results are shown in Figure 3.

Table 1 : Values of the parameters producing the lowest error values (MODPLI parameters and errors).

ANN – MODPLI – (PL)
Learning epoch: 5000
Optimization algorithm: SCG
CPU Time Training: 31 seconds
No. inputs (PL) 12
No. hidden units 8
Error function Sum of squares
RMSE 216.9325
MAPE 6.5860
R 0.945538703547271 (95%)

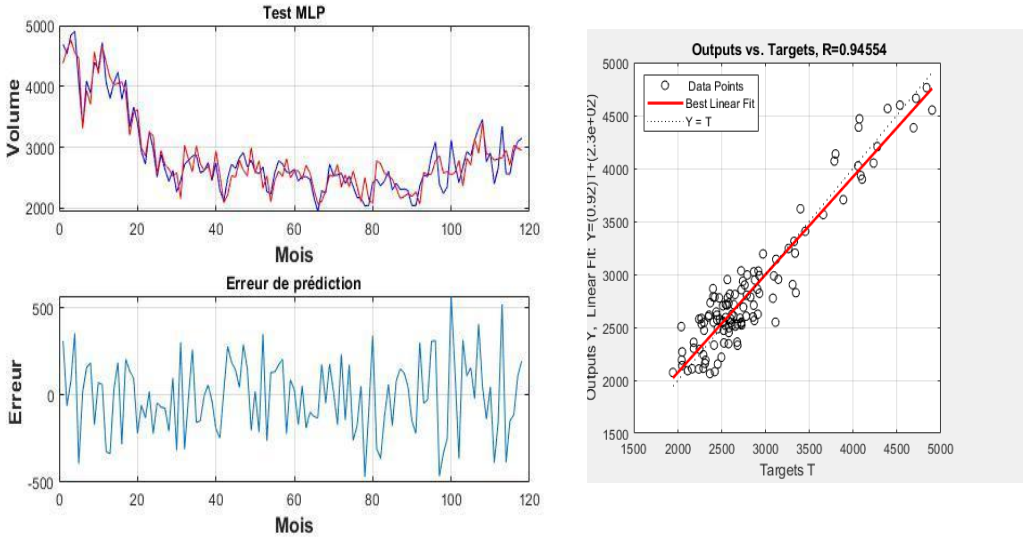


Figure 3 : Observed and predicted data using the MODPLI model

MODSCII

For the second model, we used a database of super fuel (SC) consumption in Antananarivo as input. The prediction results are shown in Figure 4, and the parameter values producing the lowest error values are shown in Table 2.

Table 2 : Values of the parameters producing the lowest error values (MODSCII parameters and errors)

ANN – MODSCII – (SC)
Learning epoch: 5000
Optimization algorithm: SCG
CPU Time Training: 47 seconds
No. inputs (SC) 12
No. hidden units 10
Error function Sum of squares
RMSE 412.0136
MAPE 2.8587
R 0.972144922528029 (97%)

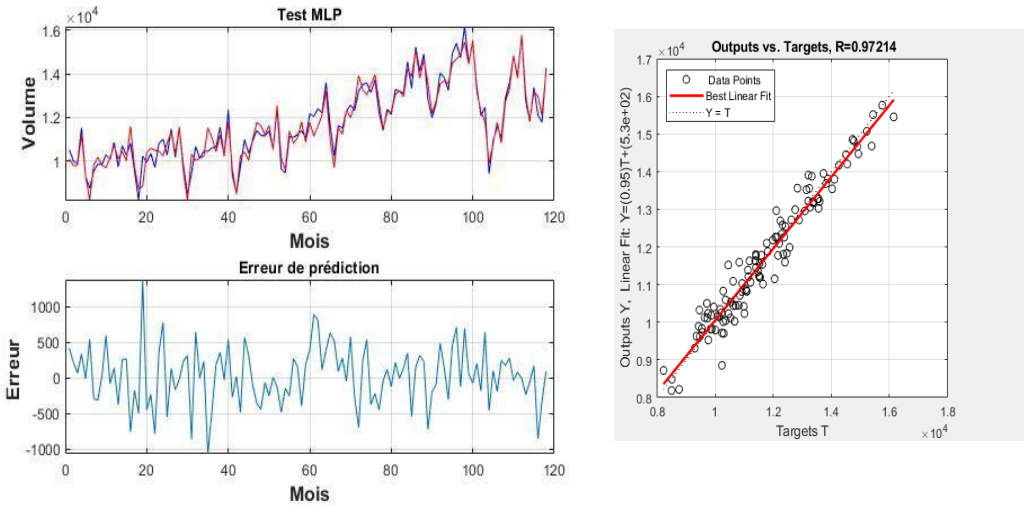


Figure 4 : Observed and predicted data using the MODSCII model

MODGOIII

For the third model, we used a diesel consumption database in Antananarivo. After performing several simulations, we obtained the results of the performance of the criteria, which are illustrated in Table 3. The two types of errors, which are RMSE and MAPE are also shown. The results of the prediction are presented in Figure 5.

Table 3 : Values of the parameters producing the lowest error values (MODGOIII parameters and errors)

ANN – MODGOIII – (GO)
Learning epoch: 5000
Optimization algorithm: SCG
CPU Time Training: 56 seconds
No. inputs (GO) 12
No. hidden units 15
Error function Sum of squares
RMSE 1062.2700
MAPE 1.7881
R 0.981267067972050 (98%)

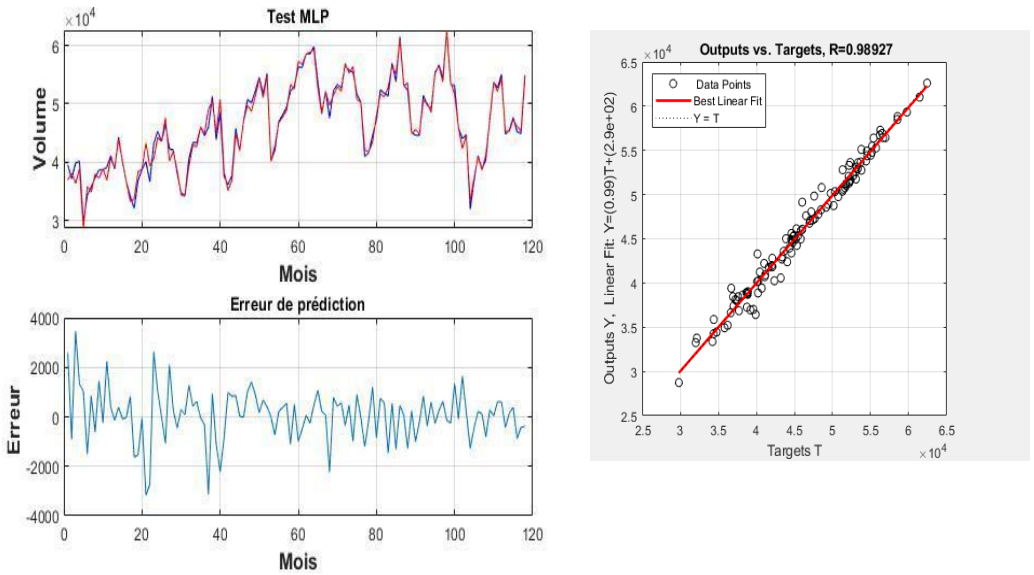


Figure 5 : Observed and predicted data using the MODSCIII model

Evaluation of the model

We have finished the constructions of our models using simulations. We wanted to test the performance of each model for the new output values with the model that we put directly as input. The results are satisfactory with a confidence level of 95% and a prediction performance of up to 18 months in advance. The prediction results are presented in Figure 6 from June 2019 to May 2021.

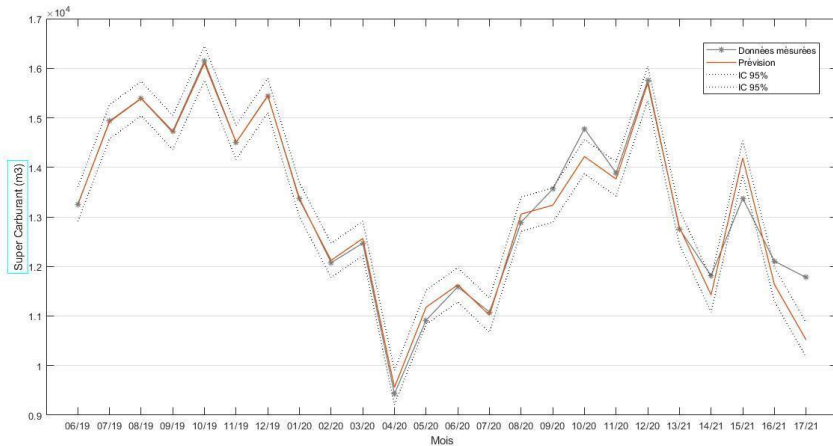


Figure 6 : Observed and predicted data using the MODSCIII

CONCLUSION

This study uses univariate neural network models to estimate fuel consumption in the Antananarivo region. Three models were built using the MODPLI, MODSCII and MODGOIII time series. The values of the neural network parameters and the number of hidden nodes are chosen with respect to the minimum MSE. To build the models, the network is processed in three stages: the training stage, the testing stage and the evaluation stage. The training algorithm used in this study is the backpropagation algorithm. This algorithm allows the input signal to be broadcasted to the output layers, then the error is calculated at the output layer and propagated to the input layer to adjust the weights so that the network learns. The models are trained, tested and evaluated using data from the Office Malgache des Hydrocarbures (OMH) over the period from January 1995 to June 2021. Thus, the obtained results are satisfactory after comparison with the observed values.

REFERENCES

- [1] INSTAT. (2020). Tableau de bord économique. Madagascar.
- [2] Zhihui, H. et al., (2017). Prediction of fuel consumption for enroute ship based on machine learning. IEEE Access. 9 pages
- [3] Miyeon, J. et al., (2018). Prediction of ship fuel consumption by using an artificial neural network. Journal of Mechanical Science and Technology. 1-12
- [4] ALMÉR, H. (2015). Machine learning and statistical analysis in fuel consumption prediction for heavy vehicles. stockholm : Sweden. School of computer science and communication (csc).

- [5] Cheung, W. (1997). Neural Network Aided Aviation Fuel Consumption Modeling, The Master Thesis, the faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University.
- [6] Nasr, G.E., Badr, E.A., Joun, C. (2002). Backpropagation neural networks for modeling gasoline consumption. *Energy Conversion and Management*. 13 pages.
- [7] Uyanik, T., Kalenderli, Ö., Yasin, A. (2019). Ship Fuel Consumption Prediction with Machine Learning. Turkey.
- [8] Perrotta, F., Parry, T., Neves, L.C. (2017). Application of Machine Learning for Fuel Consumption Modelling of Trucks. *IEEE International Conference on Big Data (BIGDATA)*.
- [9] Ertuna, L. (2016). Prediction of Vehicle Fuel Consumption Using Feed-Forward Artificial Neural Network Model. Repéré à <https://www.researchgate.net/publication/311582476> (Consulté le 16 août 2021).
- [10] Elnaz, S., Saeid, R.D. (2015). Prediction of fuel consumption of mining dump trucks: A neural networks approach. *ScienceDirect*.
- [11] Wu, J. et Liu, J. (2011). Development of a predictive system for car fuel consumption using an artificial neural network. *ScienceDirect*.