

**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série Sciences Biologiques

N°29-2021

Antananarivo - Madagascar

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

ISSN 1025 - 3467



**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série Sciences Biologiques

N°29

2021

**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**
Série
Sciences Biologiques
N° 29
2021

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
Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo
Service de Coopération et d'Aide Culturelle
(Ambassade de France)
et
Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique

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

Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique
BP 6224 – Email : cidst@cidst.mg
Antananarivo - Madagascar
ISSN 1025-3467

NOS PRINCIPALES REALISATIONS

Fonds Documentaire consultable gratuitement sur place

24261 Ouvrages
1584 Titres de périodique

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

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

Base de données bibliographiques : MIREMBY 41537 Références multidisciplinaires

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

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

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



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique



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

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

SOMMAIRE

Tolérance de deux plantes *Lemna aequinoctialis* et *Azolla pinnata* p. aux métaux lourds

RAJOELISON Falihery, ANDRIANAIVORAVELONA Jaconnet Oliva, RAMAROSON Jean de Dieu, RAKOTOSAONA Rijalalaina, ANDRIANARY Philippe

7

Gestion des helminthes digestives bovines par méthode laser dans la région Bongolava

RAZANANORO Erline, RAZAFINARIVO Tsirinirina D., MICHELLE Reine Lucie, RAMAROSON Herilantonirina S., RALINIAINA Modestine, RANDRIANARIVELOSEHENO Arsène J., JANELLE Jérôme, JUANES Xavier, TILLARD Emmanuel

33

Etudes phytochimique et pharmacologique de la plante *Gymnosporia* sp de la Famille de Celastraceae

SOAVINA Silvère A., RAZAFIMAHATRATRA Jean Hugues A., HANITRINIAINA N. Carène, MANJOVELO S. Christian, RASOLONDRATOVO Benoît, FATIANY P. Ruphin, RASOLOHERY Claudine A., RAZAFIMAHEFA Solofoniaina

51

Valorisation des déchets de *Géranium* d'Ambositra par biométhanisation

TOLOJANAHARY Jean Marie, MANJOVELO S. Christian, FATIANY P. Ruphin

67

Propriétés nutraceutiques des fines herbes et leurs intérêts nutritionnels face au Covid-19

RAFALIMANANTSOA Jules, RASOAZANANY Elise O., RANDRIAMANANTENA Andrin'iranto, RATIARIMANANJATOVO Narindra, RAKOTONDRAJAO Mampananirina F., ROBIJAONA R. Baholy

81

Potentialité des biocomposites à renfort fibres végétales à Madagascar

BINGUIRA Djack Kelly, RAHELIARILALAO Bienvenue

99

Traitement par craquage catalytique des déchets d'hydrocarbures

RAKOTO-HARINOSY Manoa H., RASAMIMANANA Faravololona, RANDRIANA Nambinina F., RABIBISOA Daniel, RAKOTOSAONA Rijalalaina, RATSIMBA Marie Hanitriainaina

117

Etude de l'élimination des bactéries de l'eau par filtration sur pouzzolane

RAKOTONDRAZAKA Fenosoa S., RATSIMBA Marie H., RAZANAJAO Jules M., RANAIVOSON Sahondra O., RAKOTOSAONA Rijalalaina

135

Formulation d'une soupe bio-fortifiée destinée aux femmes enceintes de l'Itasy

RATIARIMANANJATOVO Narindra, RAFALIMANANTSOA Jules,
RANDRIAMANANTENA Andrin'iranto, RASOAZANANY Elise, LETSARA
Rokimana, RAKOTONDRAJAO Mampananirina F.,
ROBIJAONA R. Baholy

149

Prédiction du Potentiel Méthanogène de résidus organiques issus de l'île de la Réunion

RABETOKOTANY Rarivoson Nantenaina, THURIES Laurent,
FARINET Jean-Luc

169

Co-digestion des déchets végétaux et de ferme d'élevage

RASOLOARIDIMBY Gisèle, RARIVOSON Nantenaina V.,
MINOARISOA Faratiana H., RAKOTOSAONA Rijalalaina

179

Conception de filtre à eau utilisant les balles de riz et pouzzolane

RAKOTONDRAZAKA Fenosoa S., RATSIMBA Marie H., RANDRIANA
Nambinina R., RAKOTOMAMONJY Pierre, ANDRIANARISON Edouard R.,
RAKOTOSAONA Rijalalaina

193

TOLERANCE DE DEUX PLANTES *Lemna aequinoctialis* ET *Azolla pinnata* AUX METAUX LOURDS

par

RAJOELISON Falihery⁽¹⁾, ANDRIANAIVORAVELONA J. Oliva⁽²⁾,
RAMAROSON Jean de Dieu⁽³⁾, RAKOTOSAONA Rijalalaina⁽²⁾,
ANDRIANARY Philippe⁽²⁾

(1) Ecole Doctorale Sciences et Technique de l'Ingénierie et de l'Innovation, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo - Université d'Antananarivo

(2) Département Génie chimique, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo - Université d'Antananarivo

(3) Département Matériaux et Génie Civil, Centre National de Recherches Industrielle et Technologique

RESUME

Il est primordial de connaître les paramètres toxicologiques pour une plante vis-à-vis des polluants avant son application à la technique de la phytoremédiation. Ainsi, cette étude a pour objectif de comparer la capacité de tolérance aux métaux lourds (chrome, cuivre, manganèse et zinc) de deux plantes aquatiques dont *Azolla pinnata* p. (*A. pinnata*) et *Lemna aequinoctialis* Welw. (*L. aequinoctialis*) respectivement de la famille des *Azollaceae* et *Lemnaceae*. Au cours de cette étude, les variations des paramètres biologiques, poids frais et nombre de fronde de chaque plante sont mesurés selon les divers traitements de ces métaux. D'une manière générale, l'analyse de la variance à un facteur confirme que 0,2 mg.L⁻¹ de chaque métal lourd testé a des effets significatifs sur les deux plantes ; ainsi, la concentration sans effet observé du chrome, cuivre, manganèse et zinc est inférieure à 0,2 mg.L⁻¹ ($p < 0,001$). Concernant la concentration entraînant une réduction de 50 % de la biomasse après 7 jours de traitement (CE_{50,7}), nous avons constaté que *L. aequinoctialis* (CE_{50,7} = 1,33 mg Cu.L⁻¹) tolère plus le cuivre que *A. pinnata* (CE_{50,7} = 1,00 mg Cu.L⁻¹). Par contre, *L. aequinoctialis* est moins sensible au chrome, zinc et manganèse que la plante *A. pinnata*. Les concentrations entraînant une réduction de 50 % pour *A. pinnata* sont respectivement de 4,57 mg Cr.L⁻¹ ; 2,88 mg Mn.L⁻¹ et 2,39 mg Zn.L⁻¹, tandis que ceux de *L. aequinoctialis* sont de 2,55 mg Cr.L⁻¹ ; 2,29 mg Mn.L⁻¹ et 1,73 mg Zn.L⁻¹

Mots clés : *Azolla*, CE_{50,7}, Chrome, Cuivre, *Lemna*, Manganèse, Phytoremédiation, Zinc

ABSTRACT

It is essential to know the toxicological parameters of a plant regarding pollutants before its application in the phytoremediation technique. The objective of this study is to compare the

tolerance capacity to heavy metals (chromium, copper, manganese and zinc) of two aquatic plants including *Azolla pinnata* p. (*A. pinnata*) and *Lemna aequinoctialis* Welw. (*L. aequinoctialis*) respectively from the Azollaceae and Lemnaceae family. During the study, variations in the biological parameters of each plant's, fresh weight and number of fronds were measured according to the various treatments of these metals. Generally, the one-factor variance analysis confirms that 0,2 mg.L⁻¹ of each heavy metal tested has significant effects on the two plants; thus, the No-Observed Effect Concentration of chromium, copper, manganese and zinc were all less than 0,2 mg.L⁻¹ ($p < 0,001$). For the Half maximal effective concentration resulting in a 50 % inhibition of biomass after 7 days (EC_{50,7}), *L. aequinoctialis* (EC_{50,7} = 1.33 mg Cu.L⁻¹) tolerates more copper than *A. pinnata* (EC_{50,7} = 1.00 mg Cu.L⁻¹). However, *L. aequinoctialis* is less sensitive to chromium, zinc and manganese than *A. pinnata*. The Half maximal effective concentrations resulting in a 50 % inhibition (EC_{50,7}) of *A. pinnata* are respectively 4.57 mg Cr.L⁻¹; 2.88 mg Mn.L⁻¹ and 2.39 mg Zn.L⁻¹, while those of *L. aequinoctialis* are 2.55 mg Cr.L⁻¹; 2.29 mg Mn.L⁻¹ and 1.73 mg Zn.L⁻¹

Key words: *Azolla*, *Chromium*, *Copper*, *EC50,7*, *Lemna*, *Manganese*, *Phytoremediation*, *Zinc*

INTRODUCTION

La phytoremédiation est une technologie de pointe sur les traitements des sites pollués par des polluants chimiques surtout les métaux lourds (Mc Cutcheon S. et Schnoor J., 2003 ; Matthew J. et Léon V., 2008). Certaines plantes aquatiques sont considérées comme bio-indicateur des métaux lourds et elles sont utilisées dans des essais de toxicité pour évaluer la toxicité des substances polluantes dans l'environnement (Cenci R., 2000). Ces plantes peuvent se reproduire en grande quantité et la concentration des métaux accumulée dans leurs tissus peut atteindre jusqu'à 100 fois plus à la quantité trouvée dans le milieu (Albers P. *et al.*, 1993). Cependant, chaque plante accumulatrice a la performance de traiter des polluants et même si elles se trouvent dans une même famille, elles ont chacune un pouvoir épurateur. Aussi, certaines ne peuvent pas vivre dans des milieux contaminés, même si les polluants sont de faibles concentrations (Brown S., 1995 ; Wang J., 2002). C'est pourquoi, l'objectif de notre étude est de comparer la tolérance des deux plantes aquatiques *L. aequinoctialis* et *A. pinnata* aux métaux lourds chrome (Cr), cuivre (Cu), manganèse (Mn) et zinc (Zn). Afin de pouvoir apercevoir laquelle des deux plantes a la capacité de tolérer ces métaux, nous avons (1) Mesurer la variation du nombre de fronde (DNF) et la variation de la masse fraîche (DMF) de chaque plante après 7 jours de culture ; (2) Calculer la vitesse spécifique "μ" du développement de la biomasse (Centre de Technologie Environnement CANADA, 2007 ; OCDE, 2001 ; OCDE, 2006) ; (3) Déterminer le temps de dédoublement de chaque plante ; (4) Estimer

l'impact du Cr, Cu, Mn et Zn sur la biomasse en établissant la courbe dose-réponse : pourcentage d'inhibition de la plante (% I°) en fonction de la concentration des métaux lourds (ML) dans la solution nutritive; (5) et à partir de cette courbe nous avons déterminé la concentration du Cr, du Cu, du Mn et du Zn, entraînant une réduction de 50 % (CE_{50,7}) de la biomasse de *Lemna aequinoctialis* et *Azolla pinnata* après 7 jours de culture. (6) Les concentrations sans effet observé (CSEO) du Cr, du Cu, du Mn et du Zn de *Lemna aequinoctialis* L. et *Azolla pinnata* (OCDE, 2006) seront déterminées par comparaison des moyennes des groupes traités par une analyse de la variance (ANOVA).

MATÉRIELS ET MÉTHODES

Plantes souches

Les plantes utilisées pendant cette étude ont été identifiées par le département Flore, Division Herbarier du Parc Botanique et Zoologique de Tsimbazaza d'Antananarivo. Elles sont récoltées dans la cressonnière du Fokontany d'Ampandrana Est, district d'Antananarivo III de la commune Urbaine d'Antananarivo (Lat. : 18°54'11'' S et Long. : 47°31'58'' E). Les plantes récoltées puis triées sont lavées plusieurs fois à l'eau bi distillée avant d'être ensemencées séparément dans des bacs contenant la solution nutritive (milieu SIS) recommandée par l'OCDE (OCDE, 2006) pour la préculture. La durée de la préculture est 30 jours au minimum. Des plantes souches issues de cette préculture sont utilisées pendant l'étude expérimentale. 7 jours avant l'essai, les plantes sont acclimatées au laboratoire ; un nombre suffisant de colonies est transféré aseptiquement dans le milieu de culture avec les conditions de l'essai et seules les plantes possédant des racines et ont 2 ou 3 frondes, dépourvues de lésions visibles ou de chlorose sont utilisées. 100mg de chaque plante acclimatée sont cultivées pendant 7 jours (OCDE, 2001 ; 2006), durée de l'essai, dans 250ml de solution nutritive avec 2,5 cm de profondeur. La même eau est utilisée pour préparer les solutions témoins et toutes les concentrations d'essai (OCDE, 2006). Le pH du milieu nutritif a été ajusté à $6,5 \pm 0,1$. Les bacs de culture ont la même taille, la même forme dont les dimensions sont 10 cm x 10 cm x 4 cm. Pendant cette étude, les essais sont effectués sans aucun renouvellement des solutions et sont faits au laboratoire.

Les deux plantes sont exposées séparément à des divers traitements : 0 ; 0,2 ; 0,5 ; 1 ; 1,5 ; 2 ; 3 ; 5 ; 10 ; 20 et 50 mg. L-1 de chaque métal lourd : Cuivre, Chrome, Zinc et Manganèse. Chaque concentration se fait à 3 répliques, la concentration 0 mg.L-1 sert de témoin et ce dernier est cultivé sous la même condition que les plantes traitées. Les sources des métaux lourds pendant l'étude sont les cristaux de (MnCl₂, 4H₂O)

pour le manganèse, le ($\text{ZnSO}_4, 7\text{H}_2\text{O}$) pour le zinc, les cristaux de ($\text{CuSO}_4, 5\text{H}_2\text{O}$) pour le cuivre et le ($\text{CrCl}_3, 3\text{H}_2\text{O}$) pour le chrome.

Azolla

Le genre *Azolla* est une plante aquatique qui appartient à l'embranchement des Ptéridophytes, ordre des Salviniales. Il existe 7 espèces d'*Azolla* qui se retrouvent dans une même famille Azollaceae. Elles sont divisées en deux sections : la section *Azolla* et la section *Rhizosperma*. La section *Azolla* regroupe 5 espèces, qui sont : *A. caroliniana* ; *A. mexicana* ; *A. microphylla* ; *A. rubra* et *A. filicouloïde*. La section *Rhizosperma* regroupe 2 espèces : *A. nilotica* et *A. pinnata*

L'*Azolla pinnata* possède 2 variétés : *A. pinnata* var. *pinnata* (*A. pinnata* p.) et *A. pinnata* var. *imbricata* (*A. pinnata* i.) (Tan B. et al., 1986 ; Wagner G., 1997 ; Raelina B., 1995). Et dans notre étude, nous nous focaliserons sur la variété *Azolla pinnata* var. *pinnata*.

C'est un macrophyte possédant une tige principale d'une longueur comprise entre 1 à 4 cm couvertes de petites feuilles alternes étroitement imbriquées. Cette tige principale porte des ramifications secondaires qui à leur tour produisent des troisièmes tiges et peuvent aller jusqu'à la quatrième, ainsi elles se dispersent par la spore ou par fragment des tiges. Les tiges secondaires se détachent de la plante mère par formation d'une assise d'abscission à leur base, pour donner naissance à des nouveaux individus isolés et plus petits et ainsi de suite (Tan B., 1986). Elle est récemment appelée la fougère d'eau, fougère des moustiques ou des velours d'eau et une plante d'*Azolla* est appelée fronde (Wagner G., 1997).

Lemna

Le genre *Lemna* est une plante aquatique, qui appartient à l'embranchement des Angiosperm, classe Liliopsida et ordre des Alismatales. Dans la famille de Lemnaceae, il y a 37 espèces de plante divisées dans 5 sous familles, qui sont : *Spirodela* (2 espèces), *Landoltia* (1 espèce), *Lemna* (13 espèces), *Wolffiella* (10 espèces) et *Wolffia* (11 espèces) (Klaus J. et al., 2013).

La lentille d'eau *Lemna aequinoctialis* Welw ou *Lemna aequinoctialis* (Landolt E., 1986a), est l'une des 13 espèces de la sous famille *Lemna*, dans la famille Lemnaceae. Ses feuilles sont plates, largement obovales et presque ovales ; elles atteignent 2 à 5 mm de longueur ; elles sont vertes et possèdent une radicelle unique qui prend naissance au centre de la face inférieure de la feuille de 2 à 10 cm de longueur. La croissance végétative de la lentille d'eau se fait par bourgeonnement latéral et elles croissent séparément ou en petites grappes de 2 à 4 frondes (Klaus J. et al., 2013).

Analyses physico-chimiques

Les paramètres physico-chimiques dont le pH, la conductivité électrique (CE) et la température de la solution sont faites par méthode électrométrie et sont mesurés à l'aide d'un multimètre CONSORT C 535 numérique, les mesures sont faites tous les jours pendant 7 jours qui est la durée de l'étude expérimentale.

La masse fraîche de la lentille d'eau a été pesée après avoir prélevé la plante dans chaque bac à l'aide d'un tamis puis étalée sur un papier absorbant pendant 5 minutes. La mesure a été faite au début et à la fin de l'expérience. La masse fraîche de départ est déterminée à partir d'un échantillon de thalles prélevé dans le lot qui a servi à ensemercer les récipients d'essai. Les masses sont mesurées à l'aide d'une balance de précision PRECISA XT 220A.

Paramètres toxicologiques

Nous avons établi, d'une part, une courbe de variation du nombre de frondes *L. aequinoctialis* et *A. pinnata* et d'autre part une courbe de variation de la matière fraîche en fonction de la concentration des métaux lourds dans le milieu nutritif. C'est à partir de ces courbes que nous avons tiré la valeur causant une inhibition de 50 % par rapport au témoin pendant 7 jours (CE50,7).

La valeur de la concentration sans effet observé sur la croissance des plantes (CSEO) est déterminée à partir de l'analyse statistique ANOVA.

Paramètres biologiques

Pourcentage d'inhibition du rendement : % I_r

Le pourcentage d'inhibition de la plante dû à l'effet des métaux lourds se calcule avec la relation suivante¹ :

$$\% I_r = (Q_e - Q_t) : Q_t \times 100$$

% I° : pourcentage d'inhibition du rendement

Q_e : Variation de la biomasse de l'échantillon

Q_t : Variation de la biomasse du témoin.

Taux de croissance spécifique : μ

Le développement de la biomasse est mesuré par sa vitesse spécifique. Cette vitesse exprime la croissance de la plante pendant une période donnée et correspond à la pente de la courbe de croissance logarithmique. Elle est exprimée à partir de la relation suivante²:

¹ OCDE, 2003 ; Rashmi V. et Surindra S., 2015

² Landolt E., 1986b ; OCDE, 2001 ; OCDE, 2006 ; Xiaolin C. et al., 2016

$$\mu_{j-i} = \frac{\ln(N_j) - \ln(N_i)}{m_j - m_i}$$

μ_{j-i} : vitesse spécifique

N_j : quantité de la biomasse à la fin de la culture (poids frais ou nombre de fronde)

N_i : quantité de la biomasse au début de la culture (poids frais ou nombre de fronde)

$m_j - m_i$: durée de l'essai (jour)

Pourcentage d'inhibition du taux de croissance : %I

Le pourcentage d'inhibition du taux croissance de la plante dû à l'effet des métaux lourds se calcule avec la relation suivante (OCDE, 2003) (Rashmi V. et Surindra S., 2015) :

$$\% I_t = (\mu_e - \mu_t) : \mu_t \times 100$$

$\% I_t$: pourcentage d'inhibition du taux de croissance

μ_e : taux de croissance de la biomasse de l'échantillon

μ_t : Taux de croissance de la biomasse du témoin.

Traitement des données

Les résultats ont été traités par le logiciel de Microsoft office Excel 2013 et l'analyse des données par l'ANOVA à un facteur de Xlstat 2014.5.03. Toutefois, la moyenne de chaque résultat est comparée avec la moyenne du témoin à l'aide du test de comparaison multiple de Dunnett (bilatéral) d'intervalle de confiance à 95% ($p < 0,05$) (OCDE, 2006).

RESULTATS et DISCUSSION

Effet du Cu

Comportement A. pinnata

Après 7 jours de culture, la variation de la biomasse *A. pinnata* est rapportée dans le Tableau 1. La différence du nombre de fronde (DNF) et la différence de la masse fraiche (DMF) du témoin sont respectivement $72,00 \pm 3,21$ frondes et $591,33 \pm 1,47$ mg. Au cours de chaque traitement fait par le Cu, l'effet du métal est similaire tant sur la variation du nombre de frondes que sur la différence de la masse fraiche (Figure 1).

Tableau 1 : Différence du nombre de fronde (DNF), vitesse spécifique (μ) et différence de la masse fraîche (DMF) *A. pinnata* sous l'effet du Cu. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à $p < 0,05$

<i>A. pinnata</i>					
[Cu] mg.L ⁻¹	DNF	%I ^o _{rn} ³	μ	DMF	%I ^o _{rp} ⁴
Témoin	72 ± 3,21	-	0,28	591,33 ± 1,47	-
0,2	55,33 ± 1,53	23,5	0,25	458,57 ± 3,37	22,41
0,5	42,67 ± 1,15	41,01	0,22	346,17 ± 3,83	41,43
1	36,00 ± 2,00	50,23	0,20	292,90 ± 4,73	50,44
1,5	26,33 ± 1,15	63,59	0,17	211,50 ± 9,36	64,21
2	21,33 ± 2,31	70,51	0,15	178,60 ± 8,70	69,78
3	14,33 ± 1,49	80,18	0,11	118,50 ± 5,62	79,95
5	5,67 ± 1,15	92,17	0,06	41,43 ± 2,67	92,99
10	0	100	0,00	0	100
20	0	100	0,00	0	100
50	0	100	0,00	0	100

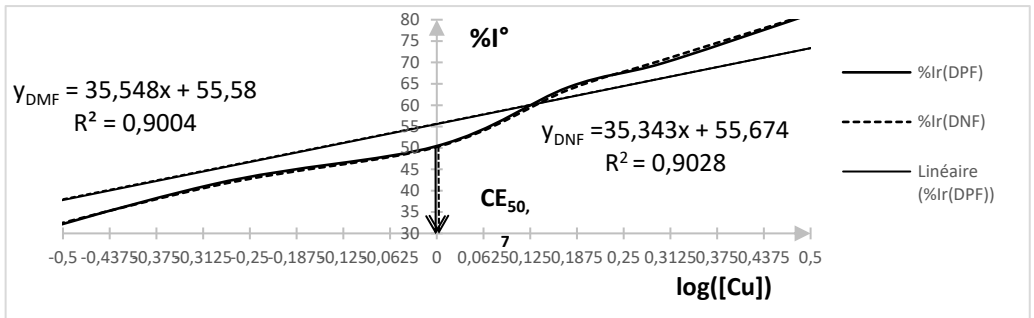


Figure 1 : Variation des paramètres biologiques *A. pinnata* en fonction des gradients de concentration du Cu dans le milieu nutritif

³ Pourcentage d'inhibition du rendement calculé à partir de la différence du nombre de fronde

⁴ Pourcentage d'inhibition du rendement calculé à partir de la différence de la masse fraîche de la plante

Tableau 2 : Analyse de la variance à un facteur : différence du nombre de fronde *A. pinnata* en fonction des gradients de concentration du Cu (n= 3)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	10	17 914,06	1 791,41	720,93	< 0,0001
Erreur	22	54,67	2,45		
Total corrigé	32	17 968,73			

Lorsque la concentration du Cu est 0,2 mg.L⁻¹, la DNF devient 55,33 ± 1,53 frondes et la DMF 458,57 ± 3,37 mg soit un taux d'inhibition du rendement du nombre de fronde 23,50 % et de la masse fraîche de 22,41 %. Nous trouvons que lorsque la concentration du Cu dans le milieu augmente, le développement de la plante diminue. Ainsi la concentration du polluant est inversement proportionnelle à la croissance de la plante.

Toutes les concentrations du Cu testées sont phytotoxiques pour *A. pinnata* et l'analyse de la variance nous confirme cela p<0,0001 (Tableau 2). La concentration du Cu sans effets sur le développement *A. pinnata* est alors inférieure à 0,2 mg.L⁻¹.

A 10 mg Cu.L⁻¹, il ne reste plus que 5,67 nouvelles frondes et 41,43 mg de la masse fraîche, l'inhibition est à 92,17 % en nombre de fronde et à 92,99 % en poids frais. Le pourcentage d'inhibition *A. pinnata* en fonction du taux du Cu dans le milieu nutritif est donné par la Figure 1 et nous pouvons en-déduire la valeur CE50,7, elle est égale à 1,00 mg.L⁻¹.

Comportement *L. aequinoctialis*

Le tableau 3 nous montre la variation du nombre de frondes et la variation de la masse fraîche *L. aequinoctialis*. La différence du nombre de fronde (DNF) et la différence de la masse fraîche (DMF) du témoin sont respectivement 359,33 ± 9,5 frondes et 594,07 ± 4,59 mg.

La Figure 2 nous montre la variation de la biomasse *L. aequinoctialis* après 7 jours de traitement en fonction du taux de Cu dans le milieu nutritif. Nous trouvons que les rendements de la biomasse calculés à partir des 2 paramètres biologiques utilisés sont semblables. La valeur de la CE50, 7 tirée de cette courbe est égale à 1,33 mg.L⁻¹. De ce fait, l'effet du Cu sur la variation du nombre de frondes et la variation de la masse fraîche sont donc similaires. Le nombre de frondes de *L. aequinoctialis* diminue au fur et à mesure où la concentration du Cu augmente, cette variation est constatée dès la plus petite concentration testée.

Tableau 3 : Différence du nombre de fronde (DNF), vitesse spécifique (μ) et différence de la masse fraîche (DMF) *L. aequinoctialis* sous l'effet du Cu. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à $p < 0,05$

[Cu] mg.L ⁻¹	<i>L. aequinoctialis</i>				
	DNF	%I ^o _{rn}	μ	DMF	%I ^o _{rp}
Témoin	359,33 ± 9,50	-	0,28	594,07 ± 4,59	-
0,2	318,00 ± 8,19	11,5	0,26	542,23 ± 20,14	8,73
0,5	267,67 ± 6,11	25,51	0,24	444,37 ± 6,69	25,2
1	204,67 ± 4,93	43,04	0,21	343,33 ± 15,84	42,21
1,5	169,00 ± 3,61	52,97	0,19	279,33 ± 6,64	52,98
2	122,33 ± 4,51	65,96	0,16	206,07 ± 12,44	65,31
3	89,00 ± 4,58	75,23	0,13	145,17 ± 9,12	75,56
5	43,33 ± 3,21	87,94	0,08	81,93 ± 8,41	86,21
10	3,67 ± 1,53	98,98	0,01	0	100
20	0	100	0,00	0	100
50	0	100	0,00	0	100

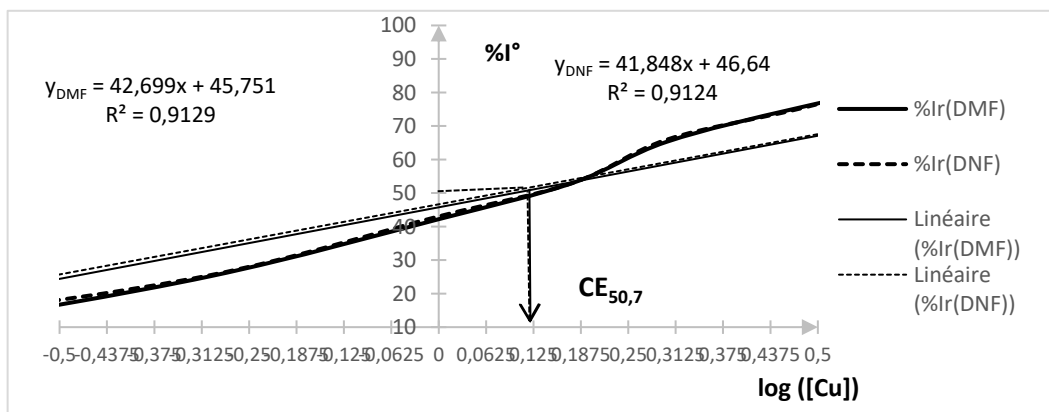


Figure 2 : Pourcentage d'inhibition *L. aequinoctialis* en fonction du logarithme de la concentration du Cu dans le milieu nutritif

Tableau 4 : Analyse de la variance à un facteur : différence du nombre de fronde *L. aequinoctialis* en fonction des gradients de concentration du Cu (n=3)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	10	513 097,64	51 309,76	2030,24	< 0,0001
Erreur	22	556,00	25,27		
Total corrigé	32	513 653,64			

Lorsque la plante est traitée avec 0,2 mg Cu.L⁻¹, le pourcentage d'inhibition du rendement en poids par rapport au témoin est environ 8,73 % et celui du rendement en différence du nombre de frondes est 11,50 %, la vitesse spécifique du développement de la biomasse devient 0,26 et le temps de dédoublement 2,6 jours. L'analyse de la variance à un facteur nous affirme que toutes les concentrations du Cu testées ont des effets toxiques pour *L. aequinoctialis* (p<0,05) (Tableau 4). Sa concentration sans effets sur le développement de *L. aequinoctialis* est alors inférieure à 0,2 mg.L⁻¹. Quand la plante est traitée avec 10 mg Cu.L⁻¹, nous ne trouvons que 3,67 nouvelles frondes, soit une inhibition de 98,98 %. Avec cette concentration la variation de masse de la plante est négligeable. La concentration supérieure ou égale à 10 mg Cu.L⁻¹ arrête le développement de *L. aequinoctialis*.

Discussion

Les deux plantes sont sensibles au Cu. Dans tous les gradients de concentration testés, l'inhibition sur le nombre de frondes et sur la masse fraîche de la plante est hautement significative, vu l'augmentation du taux du métal dans le milieu de culture. Toutefois, l'effet toxique du Cu est nettement supérieur pour *A. pinnata* que pour *L. aequinoctialis*. La vitesse spécifique des deux plantes et les résultats des paramètres toxicologiques reflètent cette observation.

D'une part, lorsque le taux du Cu est de 0,2 mg.L⁻¹, la vitesse spécifique d'*A. pinnata* est 0,25 (Tableau 1) faiblement inférieure à celle de *L. aequinoctialis* 0,26 (Tableau 3). Avec la même concentration, la différence sur le pourcentage d'inhibition du taux de croissance des deux plantes est non négligeable. L'inhibition de *A. pinnata* est deux fois supérieure à celle de *L. aequinoctialis*, leurs inhibitions sont respectivement 11,55 et 5,34 %.

D'autre part, concernant les paramètres toxicologiques, *A. pinnata* a une CE50,7 égale à 1,00 mg.L⁻¹ (Figure 1) inférieure à celle de *L. aequinoctialis* qui est égale à 1,33 (Figure 2). Malgré tout cela, la CSEO est inférieure à 0,2 mg.L⁻¹ pour les deux plantes.

En comparant ces résultats par rapport aux résultats trouvés dans la littérature, *L. aequinoctialis* est moins sensible au Cu que *L. minor*. La CE₅₀ de *L. minor* trouvée par Ater M. et al., (2006) est égale à 1,1 mg Cu.L⁻¹ ; Nasu Y. et al., (1984) ; Wang J., (1990) ; Buckley J., (1994) ont confirmé cette sensibilité au niveau de *L. minor*, ils ont trouvé des CE₅₀ respectivement 0,1 ; 0,25 et 0,29 mg Cu.L⁻¹. Par contre, *L. aequinoctialis* plus sensible au Cu que *L. gibba*. Ater et al., (2006) ont trouvé que la CE₅₀ de *L. gibba* est égale à 2,4 mg Cu.L⁻¹.

Effet du Cr

Comportement de *A. pinnata*

L'évolution des paramètres biologiques de *A. pinnata* selon la concentration du Cr est rapportée dans le Tableau 5, les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à p < 0,05. Le taux d'inhibition sur le nombre de fronde est semblable à celui sur la masse de la matière fraîche. Cette équivalence est maintenue tout au long du traitement avec le Cr (Figure 3).

Tableau 5 : Différence du nombre de fronde (DNF), vitesse spécifique (μ) et différence de la masse fraîche (DMF) *A. pinnata* sous l'effet du Cr. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à p < 0,05

[Cr] mg.L ⁻¹	<i>A. pinnata</i>				
	DNF	%I° _{rn}	μ	DMF	%I° _{rp}
Témoin	72,33 ± 3,21		0,28	591,00 ± 1,47	
0,2	66,00 ± 1,73	8,76	0,27	534,77 ± 12,81	9,51
0,5	63,67 ± 1,15	11,98	0,26	520,83 ± 16,25	11,87
1	61,33 ± 1,53	15,21	0,26	491,43 ± 15,62	16,85
1,5	59,33 ± 1,53	17,97	0,25	479,63 ± 8,93	18,84
2	56,33 ± 1,53	22,12	0,25	456,23 ± 2,14	22,80
3	44,56 ± 1,55	38,25	0,22	354,10 ± 23,04	40,08
5	35,33 ± 1,53	51,15	0,20	284,03 ± 10,44	51,94
10	22,00 ± 4,36	69,59	0,15	179,70 ± 11,04	69,59
20	11,33 ± 2,08	84,33	0,09	93,03 ± 9,38	84,26
50	1,33 ± 0,58	98,16	0,02	0	100,00

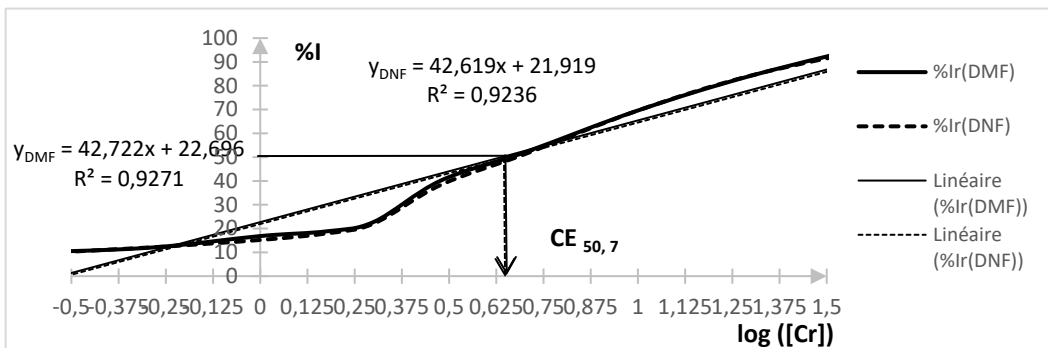


Figure 3 : Pourcentage d'inhibition *A. pinnata* en fonction du logarithme de la concentration du Cr dans le milieu nutritif

Tableau 6 : Analyse de la variance à un facteur : différence du nombre de fronde *A. pinnata* en fonction des gradients de concentration du Cr (n= 3)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	10	17 399,52	1 739,95	382,79	< 0,0001
Erreur	22	100,00	4,55		
Total corrigé	32	17 499,52			

La variation du nombre de frondes du témoin est égale à $72.33 \pm 3,21$ soit une différence de masse de $591.33 \pm 1,47$ mg, ce nombre de frondes devient $66,00 \pm 1,73$ frondes (ou $534,77 \pm 12,81$ mg) lorsque *A. pinnata* est traitée avec $0,2 \text{ mg Cr.L}^{-1}$, soit une inhibition du rendement de nombre de frondes de 8,76%. Avec cette concentration du Cr, le temps de dédoublement de la plante est de 2,72 jours.

Le pourcentage d'inhibition de *A. pinnata* en fonction du logarithme de la concentration du Cr est représenté par la Figure 3. À partir de cette courbe, nous tirons la valeur CE_{50,7}, elle est égale à $4,57 \text{ mg.L}^{-1}$. À part la variation des paramètres biologiques, l'analyse de la variance confirme la phytotoxicité du Cr sur la plante. Le Cr inhibe la croissance de *A. pinnata* et toutes les concentrations testées sont significatives ($p < 0,0001$) (Tableau 6) ainsi, la CSEO est inférieure à $0,2 \text{ mg Cr.L}^{-1}$.

Lorsque le taux du Cr est de 20 mg.L^{-1} le pourcentage d'inhibition est 84,26 % ; il ne reste que 11,33 nouvelles frondes. Avec cette concentration la plante se développe à une vitesse $\mu = 0,09$, qui est 66 fois plus faible que celle du témoin. La concentration supérieure à 20 mg Cr.L^{-1} tue la plante.

Comportement de *L. aequinoctialis*

La variation de la biomasse *L. aequinoctialis* vis-à-vis de la concentration du Cr est rapportée dans le tableau 7. Le nombre de frondes et la masse fraîche du témoin sont respectivement $359,33 \pm 9,50$ frondes et $594,07 \pm 4,59$ mg, en conséquence, le temps de doublement est de 2,49 jours et la vitesse spécifique du développement est $\mu = 0,28$.

L'ajout de $0,2 \text{ mg Cr.L}^{-1}$ est significatif pour la plante, le métal ralenti son développement. Le nombre de frondes est environ $324,00 \pm 10,07$ soit une inhibition de 9,74 % et la masse correspondante à cela est $538,73 \pm 6,56$ mg (une inhibition de 9,31 %). La vitesse spécifique sera alors de 0,27 et le temps de dédoublement 2,61 jours (Tableau 7). Toute la concentration du Cr testée est phytotoxique pour *L. aequinoctialis*. L'analyse de la variance confirme cette toxicité ($p < 0,001$) (Tableau 8), par conséquent, la concentration du Cr sans effet observé pour *L. aequinoctialis* est inférieure à $0,2 \text{ mg Cr.L}^{-1}$ ($p < 0,05$).

Tableau 7 : Différence du nombre de fronde (DNF), la vitesse spécifique (μ) et différence de la masse fraîche (DMF) *L. aequinoctialis* sous l'effet du Cu. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à $p < 0,05$

[Cr] mg.L^{-1}	<i>L. aequinoctialis</i>				
	DNF	%I° _{rn}	μ	DMF	%I° _{rp}
Témoin	$359,33 \pm 9,50$	-	0,28	$594,07 \pm 4,59$	-
0,2	$324 \pm 10,07$	9,74	0,27	$538,73 \pm 6,56$	9,31
0,5	$309,33 \pm 4,04$	13,91	0,26	$514,17 \pm 9,70$	13,45
1	$298,67 \pm 4,04$	16,88	0,26	$495,80 \pm 3,99$	16,54
1,5	$270,00 \pm 7,00$	24,86	0,24	$457,77 \pm 7,10$	22,94
2	$200,33 \pm 6,11$	44,25	0,21	$326,43 \pm 7,67$	45,05
3	$171,33 \pm 4,80$	52,32	0,19	$288,30 \pm 7,53$	51,47
5	$98,67 \pm 2,52$	72,54	0,14	$161,07 \pm 6,25$	72,89
10	$23,33 \pm 4,04$	93,51	0,05	$35,83 \pm 9,38$	93,97
20	0	100,00	0,00	0	100,00
50	0	100,00	0,00	0	100,00

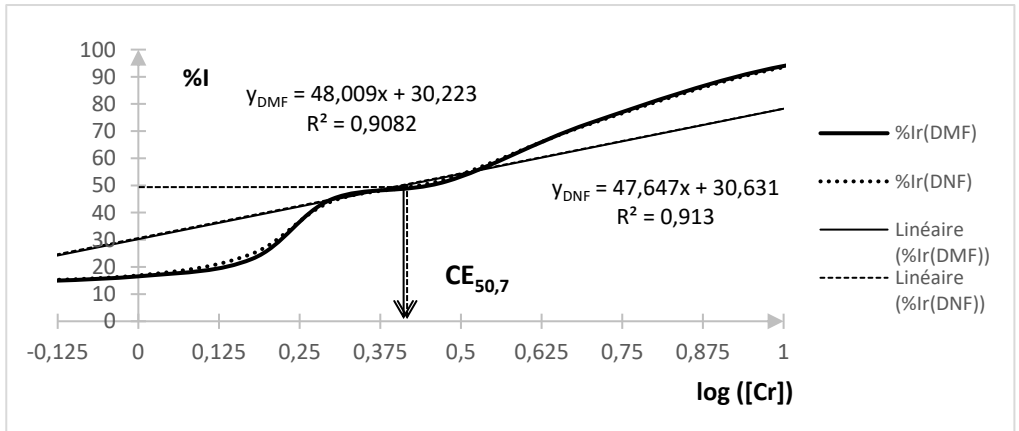


Figure. 4 : Pourcentage d'inhibition *L. aequinoctialis* en fonction du logarithme de la concentration du Cr dans le milieu nutritif

Tableau 8 : Analyse de la variance à un facteur : différence du nombre de fronde *L. aequinoctialis* en fonction des gradients de concentration du Cr (n= 3)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	10	563 500,91	56 350,09	1772,69	< 0,0001
Erreur	22	699,33	31,79		
Total corrigé	32	564 200,24			

Quand nous augmentons la concentration du Cr, la quantité de la biomasse obtenue diminue. Malgré cela, la concentration supérieure à 10 mg Cr.L⁻¹ arrête la croissance *L. aequinoctialis*. Avec cette concentration, nous ne trouvons que 23,33 nouvelles frondes c'est-à-dire qu'il ne reste que 6,49 % de biomasse, soit une vitesse spécifique du développement de 0,05. La Figure 4 nous exprime le pourcentage d'inhibition du nombre de frondes et l'inhibition de la masse de la plante, elle nous affirme que la concentration entraînant une réduction de 50 % de la biomasse est égale à 2,55 mg Cr.L⁻¹.

Discussion

Les comportements des deux plantes sont sensibles au gradient de concentrations du Cr, malgré que ce métal ne soit pas parmi les éléments nécessaires pour le développement d'une plante comme le Cu, Zn et le Mn. Il n'a que des effets toxiques⁵. Pour *A. pinnata* et *L. aequinoctialis*, l'analyse de la variance montre une

⁵ Roger P., 2011 ; William G., 2003

réduction significative ($p < 0,001$) aussi bien sur le NF que sur la MF. Cependant, *L. aequinoctialis* est plus sensible au Cr que *A. pinnata*. À des concentrations élevées du Cr, cette différence s’amplifie. La comparaison de la CE_{50} et le taux d’inhibition confirment cette sensibilité au niveau de *L. aequinoctialis*. La concentration entraînant une réduction de 50 % de la biomasse de *L. aequinoctialis* est de $2,55 \text{ mg.L}^{-1}$ (Figure 4), celle de *A. pinnata* est de $4,75 \text{ mg.L}^{-1}$ (Figure 3). Malgré cela, même si *L. aequinoctialis* est plus sensible que *A. pinnata*, quand la concentration du métal est inférieure à 2 mg.L^{-1} , les pourcentages d’inhibition des deux plantes sont similaires. Lorsque la concentration du Cr augmente l’inhibition au niveau de *L. aequinoctialis* s’intensifie. En comparant à d’autres plantes aquatiques, *A. pinnata* et *L. aequinoctialis* sont plus sensible au Cr que *L. minor* et *L. gibba*. Ater M. et al., (2006) ont trouvé une Concentration du Cr entraînant une réduction à 50% de *L. minor* égale à 6 mg.L^{-1} et de *L. gibba* égale à 7 mg.L^{-1} . Pourtant, Wang W., (1990) a trouvé une concentration du Cr entraînant une réduction de la biomasse à 50% *L. minor* encore plus grand, égale à 35 mg.L^{-1} .

Effet du Mn

Comportement de *A. pinnata*

Le Mn est un oligoélément nécessaire pour la croissance de *A. pinnata* (William G., 2003). Cependant, il a des effets inhibiteurs sur toutes les concentrations testées. Ce métal a des effets significatifs sur la croissance de *A. pinnata*, et l’analyse de la variance nous affirme que les concentrations testées sont toutes toxiques pour la plante ($F= 507,84$ et $p < 0,0001$) (Tableau 10). Ainsi, la concentration du Mn sans effet observé sur la biomasse de *A. pinnata* est inférieure à $0,2 \text{ mg.L}^{-1}$.

Quand la plante est traitée avec $0,2 \text{ g Mn.L}^{-1}$ le nombre de nouvelles frondes diminue à 69,00. Elle subit une inhibition environ de 4,61 % en nombre de fronde et 8,49 % en masse (Tableau 9).

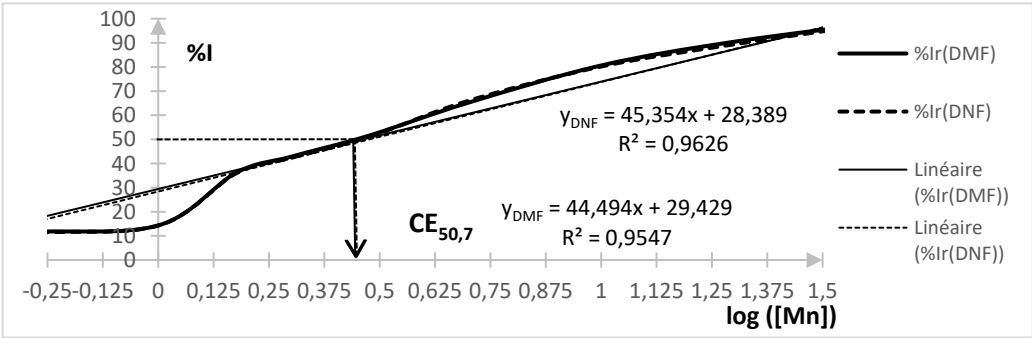


Figure. 5 : Pourcentage d’inhibition de *A. pinnata* en fonction du logarithme de la concentration du Mn dans le milieu nutritif

Tableau 9 : Différence du nombre de fronde (DNF), vitesse spécifique (μ) et différence de la masse fraîche (DMF) *A. pinnata* sous l'effet du Mn. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à $p < 0,05$

[Mn] mg.L ⁻¹	<i>A. pinnata</i>				
	DNF	%I ^o _{rn}	μ	DMF	%I ^o _{rp}
Témoin	72,33 ± 3,21	-	0,28	574,33 ± 4,74	-
0,2	69,00 ± 1,00	4,61	0,27	540,80 ± 2,31	8,49
0,5	64,33 ± 0,58	11,06	0,26	522,47 ± 4,49	11,60
1	62,00 ± 0,00	14,29	0,26	506,23 ± 3,84	14,34
1,5	46,33 ± 1,15	35,94	0,23	377,13 ± 13,80	36,19
2	41,67 ± 1,53	42,40	0,21	337,67 ± 7,78	42,87
3	35,33 ± 2,66	51,15	0,20	285,97 ± 15,52	51,61
5	24,67 ± 4,51	65,90	0,16	206,07 ± 2,78	65,13
10	14,33 ± 1,15	80,18	0,11	114,53 ± 6,92	80,62
20	7,67 ± 1,15	89,40	0,07	56,30 ± 9,38	90,47
50	0	100,00	0,00	0,00	100,00

Tableau 10 : Analyse de la variance à un facteur de la différence du nombre de fronde de *A. pinnata* en fonction des gradients de concentration du Mn (n= 3)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	10	19 698,18	1 969,82	507,84	< 0,0001
Erreur	22	85,33	3,88		
Total corrigé	32	19 783,52			

En termes de pourcentage d'inhibition, nous voyons qu'à faible concentration de Mn, la plante est inhibée deux fois plus sur la masse fraîche que par rapport au nombre de frondes. Or, nous trouvons cette différence au niveau de cette concentration uniquement. Dans les autres cas, l'inhibition au niveau des deux paramètres reste similaire (Figure. 5). La Concentration entraînant une réduction de 50 % (CE_{50,7}) de sa croissance est égale à 2,88 mg.L⁻¹.

Comportement de *L. aequinoctialis*

La croissance de *L. aequinoctialis* est influencée par le taux du Mn introduit dans le milieu nutritif. Comme les deux autres métaux, le Cu et le Cr, le développement de *L. aequinoctialis* est inversement proportionnel aux concentrations du Mn.

Tableau 11 : Différence du nombre de fronde (DNF), vitesse spécifique (μ) et différence de la masse fraîche (DMF) *L. aequinoctialis* sous l'effet du Mn. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à $p < 0,05$

[Mn] mg.L ⁻¹	<i>L. aequinoctialis</i>				
	DNF	%I ^o _{rn}	μ	DMF	%I ^o _{rp}
Témoin	359,33 ± 9,50	-	0,28	594,07 ± 4,59	-
0,2	338,00 ± 2,65	5,94	0,27	557,50 ± 4,10	6,16
0,5	319,00 ± 5,29	11,22	0,26	530,17 ± 2,98	10,76
1	261,00 ± 6,56	27,37	0,24	435,93 ± 14,65	26,62
1,5	224,67 ± 4,51	37,48	0,22	374,20 ± 5,60	37,01
2	203,00 ± 10,15	43,51	0,21	320,63 ± 10,02	46,03
3	147,00 ± 7,00	59,09	0,18	268,20 ± 8,50	54,85
5	89,67 ± 6,81	75,05	0,13	146,20 ± 18,30	75,39
10	33,67 ± 3,51	90,63	0,06	59,20 ± 11,53	90,03
20	13,67 ± 3,21	96,20	0,03	23,67 ± 2,80	96,02
50	1,33 ± 0,58	99,63	0,00	-	100

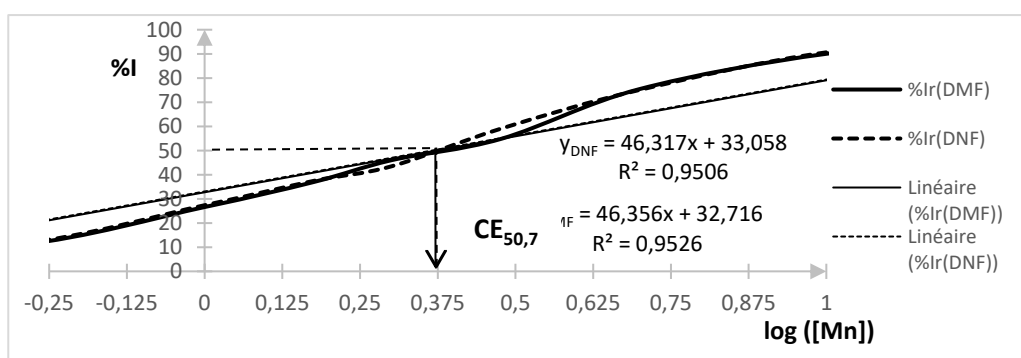


Figure 6 : Pourcentage d'inhibition de *L. aequinoctialis* en fonction du logarithme de la concentration du Mn dans le milieu nutritif

Tableau 12 : Analyse de la variance à un facteur de la différence du nombre de fronde *L. aequinoctialis* en fonction des gradients de concentration du Mn (n=3)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	10	527 315,88	52 731,59	1414,75	< 0,0001
Erreur	22	820,00	37,27		
Total corrigé	32	528135,88			

Même si ce métal est un micronutriment nécessaire pour les végétaux, toutes les concentrations testées sont significatives, il inhibe la croissance de la plante et ne représente que des effets toxiques. La concentration du métal sans effet observé par la plante est inférieure à 0,2 mg Mn.L⁻¹ (p < 0,0001) (Tableau 12). Avec cette concentration, le temps de doublement de la plante est de 2,56 jours et la vitesse du développement μ est égale à 0,27. Cependant, pour le témoin, le temps de dédoublement est 2,49 jours et la vitesse spécifique μ est égale à 0,28. En effet, cette inhibition due à 0,2 mg Mn.L⁻¹ est environ 5,94 % sur le nombre de frondes et 6,16 % sur la masse fraîche (Tableau 11).

Les effets du métal sur la biomasse de la plante sont semblables dans toutes les concentrations testées du Mn même si nous trouvons une faible différence entre 2 et 3 mg Mn.L⁻¹. Entre ces deux valeurs, la différence est minime sur les paramètres toxicologiques. Cette différence est de l'ordre de 3 à 5 % du rendement ce qui nous donne une dissimilitude de concentration inférieure à 10 µg Mn.L⁻¹. La Fig. 6 nous montre la variation de l'inhibition de la biomasse en fonction de la concentration du métal introduite dans le milieu nutritif et elle nous donne la valeur de la concentration du Mn entraînant une réduction de 50% (CE_{50,7}) de la croissance de *L. aequinoctialis* qui est égale à 2,29 mg Mn.L⁻¹.

Discussion

L. aequinoctialis et *A. pinnata* sont toutes sensibles au Mn, l'inhibition sur le nombre de frondes ainsi que sur la masse fraîche est hautement significative, vue l'augmentation de la concentration du métal dans le milieu de culture (p<0,0001) ; les pourcentages d'inhibitions sont similaires pour des concentrations inférieures à 1 mg Mn.L⁻¹. Mais lorsque la concentration est égale à 1 mg.L⁻¹, *L. aequinoctialis* est largement réduit par rapport à *A. pinnata*.

Mais concernant les paramètres toxicologiques, en les comparant avec l'effet du Mn sur la variation de la biomasse des deux plantes, nous observons que *L.*

aequinoctialis est plus sensible au Mn que *A. pinnata*. Les CSEO sont toutes inférieures à 0,2 mg.L⁻¹ pour les deux plantes. Cependant la CE50,7 confirme la sensibilité au niveau *L. aequinoctialis* car sa CE50,7 est égale à 2,29 mg.L⁻¹ (Figure 6) or celle d'*A. pinnata* est de 2,88 mg.L⁻¹ (Figure 5).

Effet du Zn

Comportement de *A. pinnata*

La variation du nombre de fronde et la variation de la masse fraîche de *A. pinnata* lors de la culture dans les gradients de concentration en Zn sont rapportées dans le Tableau 13. Pour la plus faible concentration du zinc testée, le nombre de frondes est réduit de 11,06 % par rapport au témoin et la masse fraîche de 11,60 %, ainsi, la vitesse spécifique est égale à 0,26

Tableau 13 : Différence du nombre de fronde (DNF), vitesse spécifique (μ) et différence de la masse fraîche (DMF) *A. pinnata* sous l'effet du Zn. Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à $p < 0,05$

[Zn] mg.L ⁻¹	<i>A. pinnata</i>				
	DNF	%I ^o _{rn}	μ	DMF	%I ^o _{rp}
Témoin	72 ± 3,21	-	0,28	591,00 ± 1,47	-
0,2	64,33 ± 2,52	11,06	0,26	522,43 ± 10,40	11,60
0,5	60,67 ± 0,58	16,13	0,26	495,03 ± 4,70	16,24
1	56,67 ± 1,53	21,66	0,25	466,67 ± 6,83	21,04
1,5	51,33 ± 1,53	29,03	0,24	413,47 ± 9,19	30,04
2	42,33 ± 1,53	41,47	0,22	339,67 ± 3,55	42,53
3	35,33 ± 2,66	55,30	0,19	260,83 ± 14,55	55,87
5	28,67 ± 1,53	60,37	0,17	238,40 ± 12,44	59,66
10	22,33 ± 2,52	69,12	0,15	174,90 ± 6,76	70,41
20	4,33 ± 2,08	94,01	0,04	23,30 ± 6,58	96,06
50	0,00	100,00	-	0,00	100,00

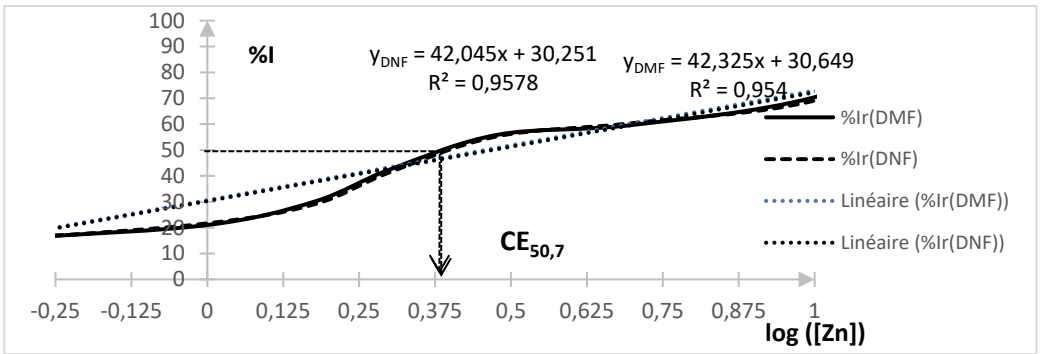


Figure. 7 : Pourcentage d'inhibition *A. pinnata* en fonction du logarithme de la concentration du Zn dans le milieu nutritif

Tableau 14 : Analyse de la variance à un facteur de la différence du nombre de fronde *A. pinnata* en fonction des gradients de concentration du Mn (n= 3)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	10	17 537,39	1 753,74	466,72	< 0,0001
Erreur	22	82,67	3,76		
Total corrigé	32	17 620,06			

Toutes les concentrations testées ont des effets significatifs, elles ont des effets inhibiteurs sur le nombre de frondes et sur la masse fraîche de la plante, de ce fait, la concentration du Zn sans effet observé par la plante est inférieure à 0,2 mg.L⁻¹ (p < 0,0001) (Tableau 14). Comme le Zn est un oligoélément nécessaire pour une plante, la concentration de ce métal dans le milieu nutritif supérieure à 20 mg.L⁻¹ tue la plante. Il faut noter que lorsque la quantité dans le milieu est supérieure à la concentration limite, nécessaire disponible dans le milieu, il deviendra toxique. L'effet du Zn sur le nombre de fronde et sur le poids de la plante est similaire Figure. 7, la CE_{50,7} de *A. pinnata* est égale à 2,39 mg.L⁻¹.

Comportement de *L. aequinoctialis*

Toutes les concentrations du Zn testées ont des effets significatifs sur le nombre de frondes de *L. aequinoctialis*. Même si l'élément est l'un des oligoéléments nécessaires à la croissance d'une plante, la quantité en excès freine sa croissance (p < 0,0001) (Tableau 16).

Quand la concentration du métal dans la solution est égale à 0,2 mg Zn.L⁻¹, la DNF est de 329,33 ± 7,64 frondes, la DMF est de 545,17 mg (Tableau 15) et la vitesse spécifique du développement est réduite de 3,82 % par rapport au témoin. Le nombre de fronde diminue au fur et à mesure où le taux du Zn augmente.

Tableau 15 : Différence du nombre de fronde (DNF), vitesse spécifique (μ) et différence de la masse fraîche (DMF) *L. aequinoctialis* sous l'effet du Zn.

Les valeurs présentées sont les valeurs moyennes calculées avec 3 répliques et des intervalles de confiance à p < 0,05

[Zn] mg.L ⁻¹	<i>L. aequinoctialis</i>				
	DNF	%I ^o _{rn}	μ	DMF	%I ^o _{rp}
Témoin	359,33 ± 9,50	-	0,28	594,07 ± 4,59	-
0,2	329,33 ± 7,64	8,35	0,27	545,17 ± 4,37	8,23
0,5	303,00 ± 5,29	15,68	0,26	504,77 ± 4,73	15,03
1	287,33 ± 4,16	20,04	0,25	476,63 ± 4,88	19,77
1,5	203,67 ± 4,16	43,32	0,21	334,20 ± 9,59	43,74
2	167,67 ± 5,13	53,34	0,19	269,53 ± 13,53	54,63
3	93,67 ± 4,27	73,93	0,13	159,77 ± 12,19	73,11
5	57,67 ± 5,13	83,95	0,10	89,37 ± 7,75	84,96
10	17,67 ± 6,03	95,08	0,04	27,17 ± 5,48	95,43
20	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00
50	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00

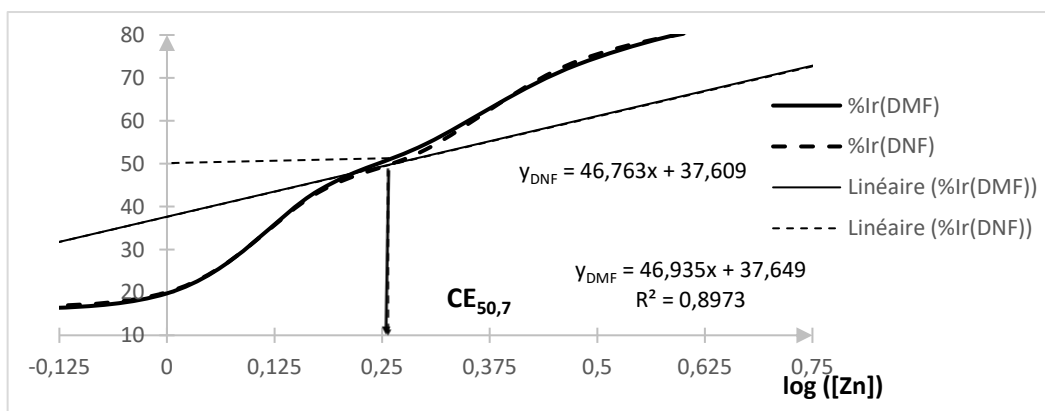


Figure. 8 : Pourcentage d'inhibition *L. aequinoctialis* en fonction du logarithme de la concentration du Zn dans le milieu nutritif

Tableau 16 : Analyse de la variance à un facteur de la différence du nombre de fronde *L. aequinoctialis* en fonction des gradients de concentration du Mn (n=3)

Source	DDL	Somme des carrés	Moyenne des carrés	F	Pr > F
Modèle	10	579 140,55	57 914,05	2005,42	< 0,0001
Erreur	22	635,33	28,88		
Total corrigé	32	579775,88			

Quand la concentration du métal est égale à 10 mg Zn.L⁻¹, la DNF et la DMF sont respectivement de 17,67 nouvelles frondes et de 27,17 mg, soit une vitesse spécifique de développement 0,04 ; vitesse équivalente à une réduction de 86,73 % par rapport à celle du témoin. Au moment où la concentration du Zn est supérieure à cette concentration il n'y a plus des nouvelles frondes.

Le comportement *L. aequinoctialis* suivant le taux du métal dans le milieu nutritif est observé sur la Fig. 8. Nous en déduisons que les variations des paramètres DNF et DMF sous l'effet du Zn sont similaires ; la différence de pourcentage d'inhibition sur le nombre de frondes et de la masse fraîche ne dépasse pas les 3 % et la concentration qui fait réduire la biomasse à 50 % est approximativement 1,73 mg.L⁻¹.

Discussion

Les remarques sont identiques par rapport aux 3 autres métaux étudiés précédemment. Les deux plantes sont sensibles au gradient de concentration du Zn. L'analyse de la variance montre une réduction très significative (p < 0,001) aussi bien sur le nombre de fronde que sur la masse fraîche. Mais en comparant les paramètres toxicologiques et l'évolution de la biomasse, nous constatons que *A. pinnata* tolère plus le Zn que *L. aequinoctialis*. Concernant le pourcentage d'inhibition, *L. aequinoctialis* est largement réduit par rapport à *A. pinnata*. Par exemple, à 1,5 mg Zn.L⁻¹, les pourcentages d'inhibition des deux plantes sont respectivement de 43,32 % et 29,03 % (Tableau 15 et Tableau 13). En effet, la vitesse spécifique de *A. pinnata* est toujours supérieure à celle de *L. aequinoctialis* tout au long de l'étude expérimentale. Pour les paramètres toxicologiques, les CSEO des deux plantes sont toutes inférieure à 0,2 mg Zn.L⁻¹, alors que la CE_{50,7} de *A. pinnata* est supérieure à celle *L. aequinoctialis*, leurs valeurs sont respectivement de 2,39 mg Zn.L⁻¹ et 1,73 mg Zn.L⁻¹.

CONCLUSION

Les paramètres toxicologiques CSEO et CE50 nous montrent la quantité minimale du métal qu'engendre un effet toxique pour la plante. L'effet du polluant est évalué selon les variations des 2 paramètres biologiques choisis dont la masse fraîche et le nombre de fronde. Dans cette étude, les résultats nous montrent que 0,2 mg.L⁻¹ de chaque métal a des effets significatifs sur les deux plantes ; la CSEO < 0,2 mg.L⁻¹ (p<0,001) et avec 0,2 mg.L⁻¹ de métaux le temps de dédoublement des deux plantes est inférieur à 3 jours. La valeur de la CSEO confirme qu'à une concentration élevée, même si parmi de ces métaux sont des oligoéléments pour les deux plantes (Heller R., 1974 ; Michel V., 1997 ; Sinha S. et Gupta A., 2005), ils deviennent toxiques et modifient les comportements biologiques de la plante, vue la diminution de la masse et le nombre de frondes. Cette valeur n'est pas très différente si nous la comparons avec les résultats antérieurs, Ater M. et al., (2006) ont trouvé une valeur inférieure à 0,5 mg Cu.L⁻¹ pour les lentilles d'eau.

Les deux plantes étudiées sont plus sensibles au Cu et moins sensibles au Cr. L'ordre de sensibilité des deux plantes aux métaux que nous avons testé est Cu > Zn > Mn > Cr. Cependant, *L. aequinoctialis* tolère plus le Cu que *A. pinnata*, la CE_{50,7} de *L. aequinoctialis* est égale à 1,33 mg Cu.L⁻¹ tandis que celle de *A. pinnata* est de 1,00 mg Cu.L⁻¹. Par contre *A. pinnata* étant moins sensible aux 3 autres métaux que *L. aequinoctialis*. Les Concentrations du Cr, Mn et Zn entraînant une réduction de 50 % de la biomasse de *A. pinnata* pendant 7 jours sont respectivement de 4,57 mg Cr.L⁻¹, 2,88 mg Mn.L⁻¹ et 2,39 mg Zn.L⁻¹ ; tandis que celles de *L. aequinoctialis* sont 2,55 mg Cr.L⁻¹ ; 2,29 mg Mn.L⁻¹ et 1,73 mg Zn.L⁻¹. Ainsi, les résultats de cette étude nous affirment qu'il y a une légère sensibilité des métaux lourds au niveau *L. aequinoctialis*. Par rapport à d'autres plantes aquatiques comme le *Nasturtium officinal* ces deux plantes ont des seuils de tolérances supérieurs. La CE₅₀ de *Nasturtium officinal* est de 0,8 mg Cu.L⁻¹ (Falihery R., 2012).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) ALBERS, P. & CAMARDESE, M. (1993). Effect of acidification on metal accumulation by aquatic plants and invertebrates: constructed wetlands. *Environment Toxicology Chemistry*, 12, 959-967.
- 2) ATER, M., ALI, N. & KASMI, H. (2006). Tolérance et accumulation du cuivre et du chrome chez deux espèces de lentilles d'eau : *Lemna minor* L. et *Lemna gibba* L. *Journal of Water Sciences*, 1(19), 57-67.

- 3) BROWN, S. (1995). Zinc and cadmium uptake by hyperaccumulator *Thlaspi caerulescens* grown in nutrient solution. *Journal of the American Soil Science Society*, 59, 125-133.
- 4) BUCKLEY, J. (1994). Bioavailability of copper in wastewater to *Lemna minor* with biological and electrochemical measures of complexation. *Water Resources*, 28, 2457-2467.
- 5) CENCI, R. (2000). The use of aquatic moss (*Fontinalis antipyretica*) as monitor of contamination in standing and running waters : limits and advantages. *Journal of Limnology*, 60, 53-61.
- 6) Centre de technologie environnement CANADA. (2007). Méthode d'essai biologique : Essai de mesure de l'inhibition de la croissance de la plante macroscopique dulcicole "*Lemna minor*". SPE 1/RM/37, CANADA.
- 7) FALIHERY, R. (2012). Etude de la phytotoxicité du cuivre chez les plantes *Nasturtium officinale* et de *Lemna paucicostata* : Détermination de la Concentration Sans Effet Observé et de la Concentration Inhibant 50% de la biomasse. Soutenance pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies. Chimie de l'Environnement. Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences.
- 8) HELLER, R. (1974). L'absorption minérale chez les végétaux. Paris : Masson et Cie.
- 9) KLAUS, J., APPENROTH, N., & BORISJUK, E. (2013). Telling Duckweed Apart : Genotyping Technologies for the Lemnaceae. *China Journal Application in Environment Biology*, 19(1), 1-10.
- 10) LANDOLT, E. (1986a). The family of Lemnaceae - A monographic study. *Biosystematic Investigations in the Family of Duckweeds (Lemnaceae)* (Vol. 1). Stiftung Ruebel, Zurich : Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH.
- 11) LANDOLT, E. (1986b). *Biosystematic Investigations in the Family of Duckweeds (Lemnaceae)* (Vol. 2). Stiftung Ruebel, Zurich : Veröffentlichungen des Geobotanischen Institutes der ETH.
- 12) MATTHEW, J. M., & LEON, V. K. (2008). Investigating Heavy-metal Hyperaccumulation using *Thlaspi caerulescens* as a Model System. *Annals of Botany*, 102, 3-13.
- 13) McCUTCHEON, S., & SCHNOOR, J. (2003). Overview of phytotransformation and control of wastes. (M. C. Schnoor, Éd.) *Phytoremediation: Transformation and Control of Contaminants*, 3-58.

- 14) MICHEL, V. (1997). La production végétale. Les composantes de la production (éd. 3ème). Paris : Lavoisier, Tec &Doc.
- 15) NASU, Y., KUGIMOTO, M., TANAKA, O., & TAKIMOTO, A. (1984). Lemna as an indicator of water pollution and the absorption of heavy metals by Lemna. *Fresh Water. Biological Monitoring*, 96, 113-120.
- 16) OCDE. (Organisation de Coopération et de Développement Economiques) (2006). Guidelines for the testing of chemicals : Lemna sp. Growth Inhibition Test.
- 17) OCDE. (Organisation de Coopération et de Développement Economiques). (2001). Développement durable : Quelles politiques ? France.
- 18) OCDE. (Organisation de Coopération et de Développement Economiques). Technical Guidance for the Environmentally Sound Management of Specific Waste Streams: Used and Scrap Personal Computers. Working Group on Waste Prevention and Recycling.
- 19) RAOELINA, B. (1995). Utilisation de l'Azolla dans l'alimentation du poulet de chair, cas de la ferme de Talatamaty. ESSA Université d'Antananarivo. Mémoire de fin d'Etudes : Département Elevage.
- 20) RASHMI, V. & SURINDRA, S. (2015). Lead and cadmium removal from water using duckweed – Lemna gibba L. : Impact of pH and initial metal load. *Alexandria Engineering Journal*, 54, 1297–1304.
- 21) ROGER, P. (2011). Les propriétés environnementales des éléments traces. Collège National d'Experts en Environnement de l'Industrie Chimique, Paris.
- 22) SINHA, S. & GUPTA, A. (2005). Translocation of metals from fly ash amended soil in the plant of *Sesbania cannabina* L. Ritz : effect on antioxidant. *Chemosphere*, 61, 1204–1214.
- 23) TAN, B., PAYAWAL, P., WATANABE, I., LAEDAN, N., & RAMIREZ, C. (1986). Modern taxonomy of Azolla. *A review Philippine Agricol*, 69, 491-512.
- 24) WAGNER, G. (1997). Azolla : a review of its biology and utilization. *Botanical Review*, 63, 1–26.
- 25) WANG, J., ZHAO, F., MEHARG, A., RAAB, A., FELDMANN, J., & McGRATH, S. (2002). Mechanisms of arsenic hyperaccumulation in *Pteris vittata*. Uptake kinetics, interactions with phosphate, and arsenic speciation. *Plant Physiology*, 130, 1552–1561.
- 26) WANG, W. (1990). Literature review on higher plants for toxicity testing. *Water Air Soil Pollution*, 59, 381-400.

- 27) WILLIAM, G. H. (2003). *Physiologie Végétale* (éd. 1ère). Paris : Boeck Université.
- 28) XIAOLIN, C., JOHN, O., & MARCEL, A. (2016). The toxicity of zinc oxide nanoparticles to *Lemna minor* (L.) is predominantly caused by dissolved Zn. *Aquatic Toxicology*, 174, 46–53.

GESTION DES HELMINTHES DIGESTIVES BOVINES PAR METHODE LASER, DANS LA REGION BONGOLAVA, MADAGASCAR

par

RAZANANORO Erline⁽¹⁾, RAZAFINARIVO Tsirinirina D.^(1,2), MICHELLE
Reine L.⁽²⁾, RAMAROSON Herilantonirina S.^(1,2), RALINIAINA Modestine^(1,2),
RANDRIANARIVELOSEHENO Arsène J.⁽³⁾, JANELLE Jérôme⁽⁴⁾,
JUANES Xavier⁽⁴⁾, TILLARD Emmanuel⁽⁴⁾

(1) Département d'Enseignement des Sciences et de la Médecine Vétérinaire (DESMV), Faculté de médecine
d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Département de Recherches Zootechniques Vétérinaires et Piscicoles (DRZVP-FOFIFA)

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

(4) Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement (CIRAD)

RESUME

Les infestations parasitaires internes freinent les techniques de production à avoir une performance satisfaisante en élevage des bovins. L'objectif de cette étude a été de déterminer les facteurs de dynamisme de l'infestation parasitaire et de comprendre ses gravités pathologiques chez les jeunes bovins afin de proposer des gestions stratégiques raisonnées aux éleveurs. Le Logiciel d'Aide aux Suivis d'Elevage des Ruminants a été utilisé pour une gestion des données collectées à l'échelle de l'animal. Des prélèvements de fèces couplés à un pesage mensuel de l'animal et des analyses coproscopiques au laboratoire ont été réalisés. Une enquête a été menée auprès des éleveurs pour l'audit des conduites d'élevage. Le logiciel R et épi infos version 7.1.5 ont été utilisés pour l'analyse des données. Ils révèlent une moyenne de 50 à 200 œufs de parasite par gramme de fèces et 85,52 % de prévalence d'infestation. Les jeunes de plus d'un an sont moins infestés que les autres grâce à leurs immunités acquises. La race frisonne a montré une résistance que les Zébus malagasy et Renitelo, mais cette différence a été non significative ($p > 0,05$). Le sexe n'influe pas sur l'infestation mais une variation saisonnière a été évoquée. Le poids vif moyen des sujets concernés tend à diminuer au mois d'octobre mais le facteur saison, faible pâturage pendant cette période peut être la cause. Un taux de mortalité a été marqué chez les sujets de moins d'un an. La négligence des bonnes conduites zootechniques et sanitaires affecte nettement le taux d'infestation. Les interventions de tous les alliés : éleveurs, vétérinaire ou technicien d'élevage et l'Etat sont primordiaux.

Mots clés : Cheptel, Dynamisme, ECLIPSE, Facteur, Infestation, Impact, Traitement

ABSTRACT

Internal parasitic infestations slow down production techniques to have a satisfactory performance in cattle rearing. The objective of this study was to determine the factors driving the parasitic infestation and to understand its pathological severities in young cattle in order to offer reasoned strategic management to breeders. Ruminant Breeding Assistance Software (LASER) was used for computerized management of data collected at the animal level. Faeces sample collection coupled with monthly weighing of the animal and then coproscopic analyzes in the laboratory were carried out. A survey was carried out among breeders to audit breeding practices. R and epi infos version 7.1.5 software was used for the data analysis. They reveal an average of 50 to 200 parasite eggs per gram of faeces and an 85.52% prevalence of infection. Young animals over one-year-old are less infested than others to its acquired immunities. The Frisian race showed high resistance compared to the Malagasy Zebu and Renitelo, but not significant ($p > 0.05$). Gender does not influence the infestation, but seasonal variation has been suggested. The subject's average live weight tends to decrease in October but deteriorates during the most critical feeding seasons. A high mortality rate was noted in those under one-year-old. Poor pasture management and inadequate pest control treatments clearly affect infestation rates. The intervention of all allies: breeders, veterinarian or breeding technician and the State is essential.

Keywords : Livestock, Dynamism, ECLIPSE, Factor, Infestation, Impact, Treatment

INTRODUCTION

Les helminthes et protozoaires sont des parasites gastro – intestinaux qui colonisent le tube digestif du bovin.

En France et en Australie 30 % des animaux abattus sont parasités (Rabearivelo T., 2011). Dans les pays Européens, le taux de mortalité des jeunes animaux dû à la maladie gastro-intestinale est de 1 à 2 %. Les facteurs principaux influençant la variation des infestations de ces parasites gastro-intestinaux sont les facteurs intrinsèques de l'animal et les facteurs extrinsèques (Aurélien P., 2016)

Au Bénin, 83,61% des veaux hébergent des strongles digestifs, 29,94 % des Strongyloides et 1,69 % sont atteints de l'ascaridiose. La mortalité des veaux peut atteindre jusqu'à 30 à 45 % dans ce pays (Raharinosy H., 2000), ainsi qu'en Côte d'Ivoire (Bathiard T & Vellut F., 2002).

Comme Madagascar est localisé en milieu tropical, le développement des nématodes, cestodes et trématodes sont très favorables dans l'élevage des ruminants à cause de la présence des facteurs climatiques comme la chaleur et l'humidité. A Mahanoro, une étude faite par Randrianantenaina D. (2011) révèle que le facteur

climatique, la conduite d'élevage, la gestion de pâturage et le système de lutte établi par le propriétaire sont des facteurs possibles d'influencer la variation des infestations des parasites gastro – intestinaux. D'après une étude menée par Daynes F. et Bouchet A. en 1972, 62% des veaux de 2 à 3 mois à Madagascar souffrent d'ascaridose et cela peut atteindre jusqu'à 100% ; et 70% des veaux hébergent des strongles digestifs à l'âge de 3 à 7 mois. La mortalité peut toucher jusqu'à 40% des veaux de 0 à 6 mois d'âge (Rabearivelo T., 2011).

La méconnaissance de l'utilité et les avantages économiques de la gestion des luttés contre les parasites gastro intestinaux digestifs chez les animaux domestiques peuvent freiner les résultats techniques à atteindre des performances satisfaisantes.

Les pertes directes pour l'animal vivant tel le retard de croissance, car un veau parasité, sans aucun signe de maladie peut avoir une diminution de 50% de son gain moyen quotidien (Cabaret, 2017), ainsi les diminutions de la production laitière et la fertilité des animaux infestés sont affrontées par la négligence des parasitismes bovins. Des pertes indirectes, pour la viande à l'abattage telle la saisie des produits comme les foies douvés aussi sont à considérer. (Rakotondravao & Kruger W., 1990). C'est à partir de ces conséquences néfastes que l'expérimentation peut viser la gestion des parasites digestifs chez les jeunes bovins en croissances futur géniteur du cheptel.

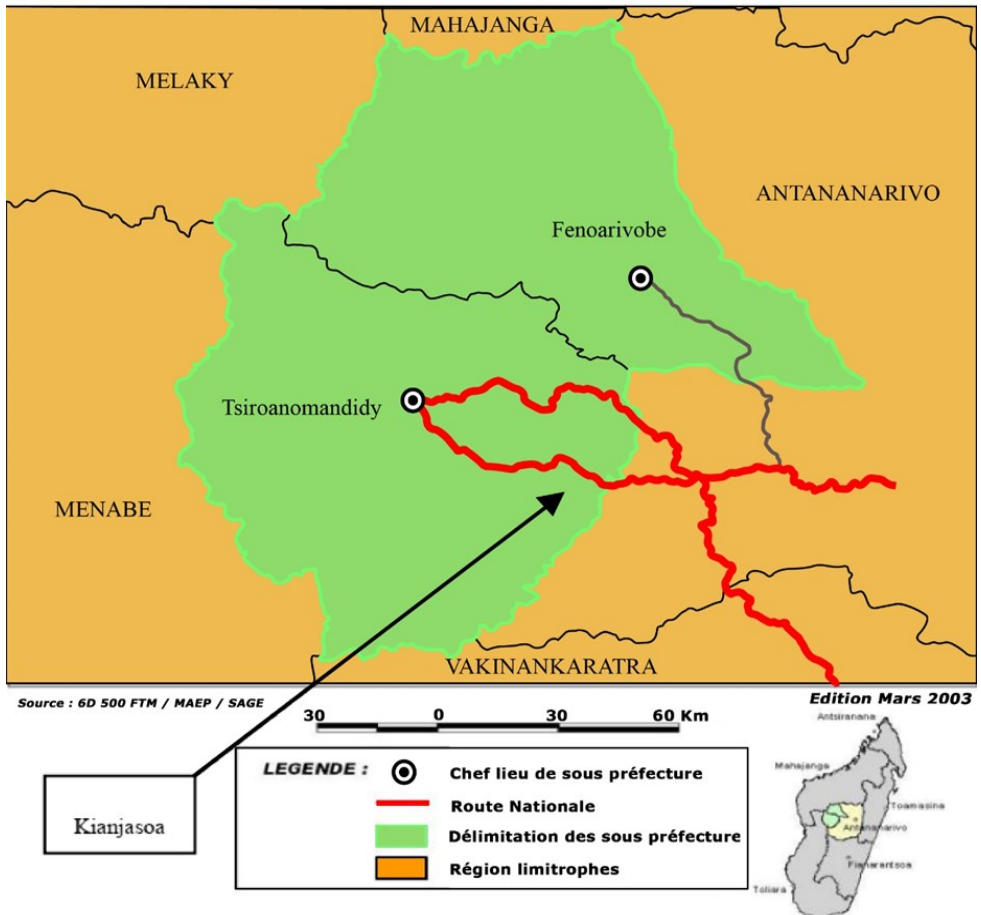
L'hypothèse de recherche est telle que les facteurs extrinsèques (liés à la saison, la conduite d'élevage, la gestion sanitaire et du pâturage), ainsi que les facteurs intrinsèques (liés à l'âge, à la race et au sexe de l'animal) constituent les principaux facteurs influençant le dynamisme de l'infestation des parasites gastro-intestinaux chez les bovins de jeunes âges.

L'objectif de cette étude a été de déterminer les facteurs du dynamisme d'infestation parasitaire et de comprendre la gravité pathologique des différents parasites digestifs présents chez les jeunes bovins. Cela devrait permettre de proposer des gestions raisonnées, stratégiques aux éleveurs.

MATERIELS ET METHODES

Zone d'étude

Ce travail a été mené dans la région Bongolava, district Tsiroanomandidy, commune Mahasolo, Fokontany Kianjasoa. La station de recherche Kianjasoa et ses environs, qui est située à 180 km d'Antananarivo, au cœur du moyen Ouest de Madagascar, 46°22 Est et 19°05 Sud de latitude (Raeliarijaona, 2017 et monographie de la région Bongolava. MAEP. 2003) a été choisie comme terrain d'expérimentation. Le climat, de type tropical, comporte une longue saison sèche au mois de mi-avril à mi-octobre et une saison pluvieuse de novembre jusqu'en mars (moyennes annuelles de pluviométrie 1400 mm à 1800 mm et autour de 22°C de température). L'étude a été réalisée d'Avril 2017 à Octobre 2020.



Source : Monographie de la région Bongolava. MAEP. 2003

Figure 1 : Carte de la zone d'étude

Cette activité effectuée depuis Avril 2017 est sous la responsabilité du FOFIFA en partenariat avec le CIRAD. Elle entre dans le cadre du projet Emerging Crop-Livestock Production System adapted to a changing Environment (ECLIPSE) ou Réseau régional de coopération pour l'émergence de systèmes de polyculture-élevage (ruminants) adaptés aux changements environnementaux.

Population d'étude

Les jeunes bovins, âgés de 4 à 24 mois quels que soient les races et sexes appartenant au suivi LASER depuis 2017 et présents lors du suivi mensuel sur terrain étaient inclus dans l'étude. L'échantillonnage est d'une façon exhaustive, tous les animaux appartiennent à cette classe d'âge aux dates de prises de prélèvements sont concernées, mais en moyenne, plus de trentaine (30) de prélèvements sont à analyser en une seule fois tous les mois. Les animaux étaient identifiés par des boucles

auriculaires et des puces d'identification sous forme de bolus pour avoir un suivi individuel. La station diffuse des races bovines Renitelo et Frisonne ; des zébus malgaches proviennent des environs.

Réalisation des prélèvements et pesages

Les prélèvements étaient faits le matin et les animaux passaient dans un couloir de contention avant la mise au pâturage. Ces pratiques étaient appliquées mensuellement, couplées d'un pesage des animaux à étudier sur une balance pèse bétail. L'opérateur prélevait alors le plus de fèces possible auprès de chaque animal, à l'aide d'un gant d'exploration. Les fèces étaient laissées à l'intérieur du gant d'examen, sur lequel était inscrit au feutre indélébile le numéro d'identification de l'animal et son nom de troupeaux selon l'éleveur. Ce numéro correspond au numéro de la fiche dite « inventaire ».

Environ 50 à 100g de fèces par animal ont été prélevés par fouille rectale. Ils ont été transportés dans des glacières avec accumulateur de froid vers le laboratoire. Les prélèvements ont été ensuite conservés à une température +4°C au réfrigérateur avant chaque analyse microscopique proprement dit. Ces techniques permettent d'empêcher la chaleur de favoriser l'éclosion des œufs de parasite à déterminer.

Analyse coproscopique au laboratoire

Les analyses ont été effectuées au sein du laboratoire de la Station Régionale de Recherche Kianjasoa. La technique de MAC MASTER été réalisée pour le comptage des œufs des parasites observés lors du coproscopie (Frederic B., Bruno P., Hoan D., 2004). Ce principe consiste à :

- Compter les œufs de parasites dans les selles afin d'évaluer la corrélation entre le nombre des parasites présents dans l'intestin de l'animal et celui des œufs trouvés dans les selles¹ ;
- Ensuite, peser 5 g de matières fécales et préparer 75ml de solution dense ;
- Mettre progressivement en suspension chaque échantillon fécal et mélanger avec 75 ml de solution saline (les fèces sont diluées au 1/15) ;
- Triturer et homogénéiser dans un mortier puis tamiser la suspension et mettre la solution dans un bocal en verre ;
- Laisser reposer pendant une heure pour que les œufs flottent en dessus de la solution ;
- Aspirer et refouler plusieurs fois les liquides à la surface à l'aide d'une pipette ;
- Placer rapidement les volumes nécessaires (0,15 ml dans chaque partie de la cellule de lame MAC MASTER) ;

¹ Institut de l'élevage, édition France Agricole. Maladies des bovins. 4 ème édition, 2008

- Attendre 10 min pour que les œufs se collent sous le verre supérieur de la lame MAC MASTER puis faire une lecture au microscope optique à l'objectif x10.

La méthode MAC MASTER nécessite une technique par flottaison. Les œufs ont été identifiés par leurs formes, coquilles, blastomères ou contenus à l'intérieur et taille. Les liquides ou solutions utilisées doivent avoir des densités qui peuvent faire flotter les œufs. Ici, des solutions de chlorure de sodium ont été utilisées (densité environ 1.2 obtenue par dissolution de 200g de sel fin dans 3 litres d'eau).

La formule suivante détermine le nombre d'œufs des parasites par gramme de fèces ou OPG observées : $N = (n1 + n2) / 2 \times 100$, tel que : N = nombre d'œufs par gramme de fèces et (n1 + n2) : nombre des œufs de parasite dans chaque cellule respective 1 et 2 de la lame MAC MASTER. L'unité est en œuf par gramme de matière fécale de l'animal diagnostiqué ou OPG.

L'interprétation du degré d'infestation des espèces parasites par chaque échantillon se présente comme le tableau suivant l'indique :

Tableau 1 : Valeurs références d'interprétation du degré d'infestation parasitaire par OPG

Niveau d'infestation	Nombres d'œufs par gramme de fèces
Faible	400
Moyenne	400 – 1000
Elevé	1000 – 2500
Massif	2500

Source : Rafamantanantsoa, 2011

Enquêtes auprès des éleveurs

Des enquêtes ont été menées auprès des éleveurs pour avoir les informations sur les conduites de production et sur la gestion sanitaire des troupeaux. Le but de ces enquêtes est d'extérioriser toutes situations possibles influençant les variations des infestations parasitaires.

Les variables à étudier

Les variables explicatives relatives à l'étude sont : mode d'alimentation (sur pâturage ou non), mode d'abreuvement (rivière, puits ou autre), présence ou non du bâtiment et ses infrastructures, nettoyage et désinfection du bâtiment d'élevage, saison (mois de prélèvement), genre (mâle et femelle), classe d'âge (4 – 6 mois, 7 mois – 12 mois, 13 – 24 mois), races (Renitelo, Zébu, Frisonne), l'heure de sortie et d'entrée des

animaux dans les pâturages, utilisation ou non des antihelminthiques correspondants au parasite cible, mode d'utilisation des antihelminthiques(fréquences et molécule utilisée), et le poids vif mensuel du sujet concerné.

Gestion et analyse des données

Les données récoltées à chaque descente étaient enregistrées dans un ordinateur qui comporte un logiciel nommé L.A.S.E.R. Ce logiciel est conçu pour former les bases de données individuelles des animaux de chaque troupeau comportant toutes les informations zootechniques et sanitaires de chaque individu animal.

Les logiciels R, le logiciel Epi Infos version 7.1.5 et Excel 2016 étaient utilisés pour les traitements des données. Le test ANOVA était appliqué pour juger la signification l'hypothèse et le résultat était significatif si $p\text{-value} < 0,05$.

RESULTATS

La conduite zootechnique de l'élevage

Aucun éleveur ne pratique la gestion raisonnée des pâturages. En moyenne, 11 têtes de bovins étaient mises quotidiennement dans le même pâturage (surface variable selon les bouviers) et 5,26 % étaient mélangées avec d'autres espèces (ovins). Les pâturages tournants étaient appliqués par tous les éleveurs appartenant à l'étude avec une durée moyenne de 15 jours dans un même lieu. Le bovin de la station ne suit pas ce rythme de mise au pâturage car ils pâturent au le même endroit toute l'année. Le veau reste sous la mère jusqu'à l'âge d'un an.

Les animaux ont été majoritairement hébergés dans une structure sans couverture le soir et libérés dans les pâturages toute la journée. Les bâtiments d'élevage ont été fondés en terre battue (52,63%), en bois (21,05%) et en béton (5,26%) pour le bovin de la station et les autres en brique (10,52%) et sans abris (10,52%). L'alimentation a été basée surtout sur des fourrages verts tels *Bracharia* et *Hétéropogancontortus* avec une supplémentation alimentaire en saison sèche, saison de faible pâturage (juillet à octobre) tels que : provende (5,26%), manioc frais (36,84%), paille (10,52%), provende et ensilage de maïs (5,26%), Le reste était sans supplémentation (42,10 %). Tous les éleveurs ont mis leurs bovins sur les pâturages de bas-fonds pendant la saison sèche et sur les collines en saison de pluie. Le bétail était abreuvé par l'eau de rivière, plus précisément des barrages hydrauliques naturels. Ils ont été mis dans les pâturages sans catégoriser l'âge et la taille. Enfin, ils ont été envoyés dans les pâturages à 8 heures du matin et ont été rentrés à l'étable à 17 heures – ce qui comporte des risques de contamination par les larves infestantes aux plantes fourragères restées sur la plante à forte densité à ces heures pas ensoleillées.

Conduite sanitaire de l'élevage

Du point de vue sanitaire, aucun éleveur n'applique le traitement systématique des parasites gastro-intestinaux et 57,89 % appliquent la vermifugation interne chez les jeunes bovins âgés de 1 à 6 mois, rappelée tous les 3 mois avec des molécules à base de Lévamisole. Les animaux adultes ont été vermifugés tous les 6 mois par des douvicides (26,31 %) surtout à base de Nitroxynil. Ils sont tous vaccinés contre les 2 maladies charbonneuses symptomatiques et bactériennes qui sont des vaccins obligatoires par l'Etat malgache annuellement.

Des vitamines aussi ont été administrées systématiquement pour fortifier les animaux en saison de faible pâturage (saison sèche) en une seule fois (36,84 %).

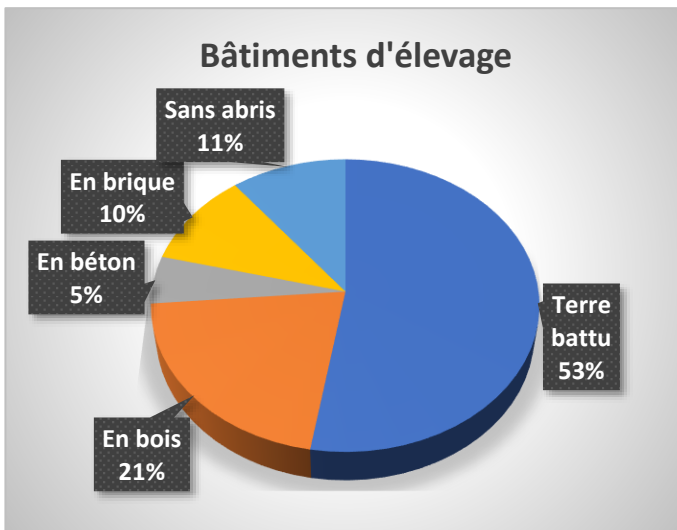


Figure 2 : Proportion des types de bâtiment d'élevage

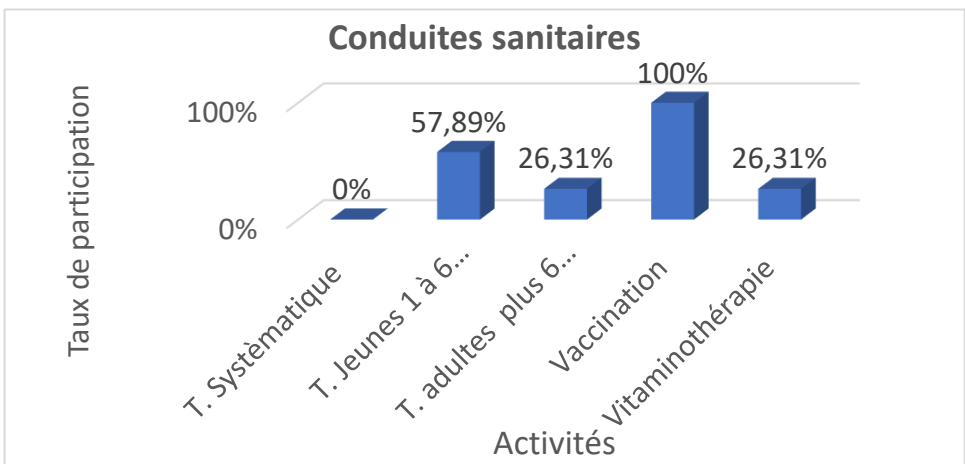


Figure 3 : Proportion des traitements effectués par les éleveurs

L'infestation parasitaire

La prévalence

La prévalence globale des infestations parasitaires était de 85,52%, c'est-à-dire 910 prélèvements à diagnostiquer sur 1 064 ont été positifs à l'examen microscopique.

Dix sept types de parasites ont été identifiés chez les jeunes bovins lors de l'analyse au laboratoire, à savoir les nématodes tels les strongles digestifs (*Oesophagostomum*, *Cooperia*, *Ostertagia*, *HaemoncusBunostomum*), les *Trichuris*, les *Trichostrongylus*, les *Toxocarasbovis*, les *Capillaria*, les *Strongyloides*, ; les trématodes : *Paramphystomum*, *Fasciolagigantica* et *Dicrocoelium*. Il y a aussi le cestode qui est le *Moniezia* et les protozoaires tels que *Eimeriabovis*, *Eimeriaauburnensis*, *Cryptosporidium*. Les strongles digestifs (*cooperia*, *Oesophagostomum*, *Ostertagia*) ont été les plus fréquemment observés chez les animaux de tous les âges et les *Moniezia* aussi. Mais, le *Fasciolagigantica*, le *Capillaria*.et le *Toxocaras bovis* ont des variations significatives selon les classes d'âge d'animaux. Le tableau 2 montre ces différentes variations.

Tableau 2 : Variation séquentielle des moyens des OPG de chaque parasite gastro intestinal selon l'âge de l'animal diagnostiqué

Types parasites	Moyenne en OPG	Age le plus touché (mois)	P –value
<i>Oesophagostomum</i>	50 -150	5 – 11	0,8690
<i>Cooperia</i>	72 – 189	10 – 15	0,6382
<i>Ostertagia.</i>	75 – 536	5	0,1293
<i>Haemoncus.</i>	50 -150	6 – 12	0,3878
<i>Bunostomum.</i>	50 -150	6 – 12	0,6104
<i>Trichuris.</i>	50 -108	7 – 17	0,4789
<i>Trichostrongylus.</i>	50 – 493	5	0,2950
<i>Toxocarasbovi.,</i>	50 – 2125	4 – 5	0,0240
<i>Capillaria.</i>	50	5 – 24	0,05
<i>Strongyloides</i>	50 – 133	6 – 12	0,3016
<i>Paramphystomum,</i>	50 – 150	20 – 21	0,8551
<i>Fasciolagigantica.</i>	50 – 115	5 – 23	0,0570
<i>Dicrocoelium</i>	50 – 125	6 – 15	0,4851
<i>Moniezia</i>	50 – 425	6 – 12	0,6386
<i>Eimeriabovis,</i>	50 – 106	7 – 21	0,9639
<i>Eimeriaauburnensis,</i>	50	12	
<i>Cryptosporidium</i>	50 – 108	14 – 24	0,4851

Source : Auteur

La moyenne des OPG

Les degrés d'infestation moyenne varient de 50 à 200 œufs des parasites par gramme de fèces OPG (Figure 4).

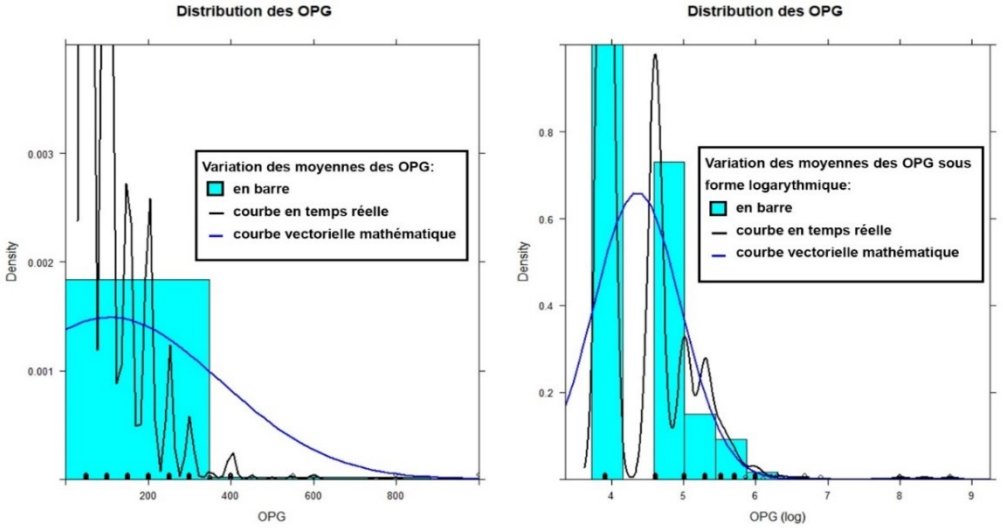


Figure 4 : Moyenne de distribution des œufs des parasites par gramme de fèces (OPG)

Infestation en fonction de la saison

La variation mensuelle du taux de charge d'infestation était marquée, les mois appartenant aux saisons de pluies ont eu une prévalence élevée pour le cestode et nématode et protozoaire tandis que les trématodes infestent plutôt en saison sèche.

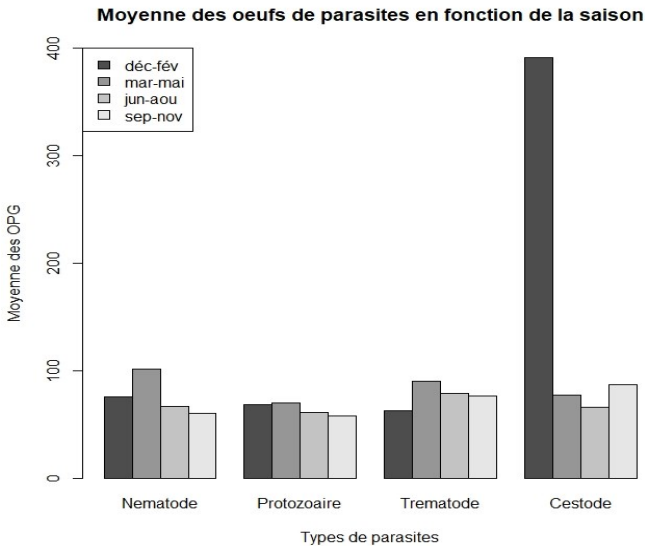


Figure 5 : Moyennes des OPG de chaque classe parasitaire en fonction de la saison

Infestation en fonction de la race

Le taux de charge de classe parasitaire (nématode, cestode, trématode et protozoaire) varie selon les races de l'animal, mais aucune différence significative n'a été mesurée ($p > 0,05$). La race Frisonne a montré une résistance plus élevée par rapport aux Zébus malgaches et Renitelo mais non significative, sauf le cas du cestode qui est différent (Figure 6).

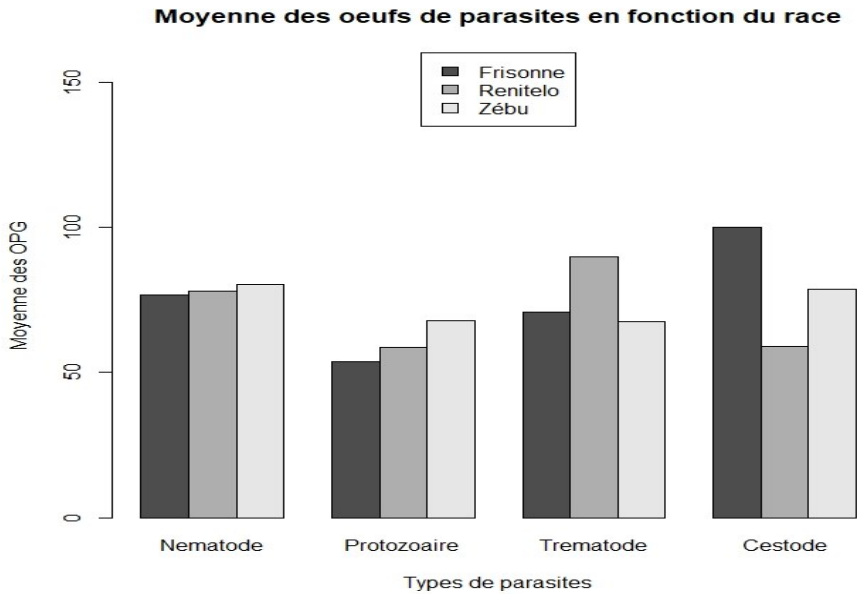


Figure 6 : Taux de charge des classes parasitaires (OPG) selon les races bovines

Infestation en fonction de l'âge

En séparant les classes d'âge par sensibilité, on obtient des prévalences peu différentes. Les animaux de plus d'un an (sevrans et jeunes bovins) sont moins infestés que les veaux de lait (< 5mois) et que les veaux en présevrage (5-9 mois) grâce à leurs immunités acquises après la première infestation aux premières saisons de pâturage, tandis qu'une augmentation du taux du protozoaire et cestode a été repérée chez les plus d'un an (Figure 7) mais le résultat n'été pas significatif ($p > 0,05$).

Infestation en fonction du sexe

Aucune différence significative sur le taux d'infestation a été trouvé sur la différence du sexe des animaux (Figure 8). Spécialement pour les trématodes, les sujets males sont plus infestés mais le résultat n'été pas significatif ($p > 0,05$).

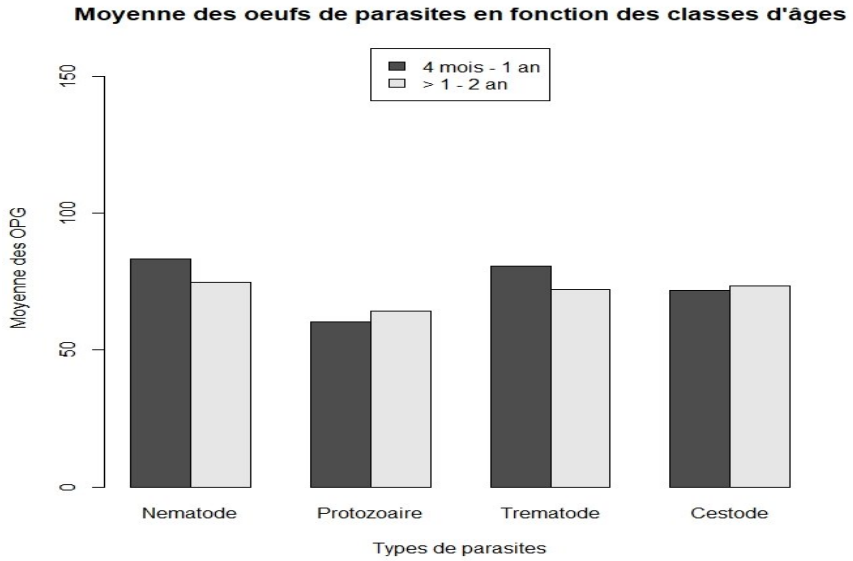


Figure 7 : Taux de charge des classes parasitaires (OPG) selon l'âge

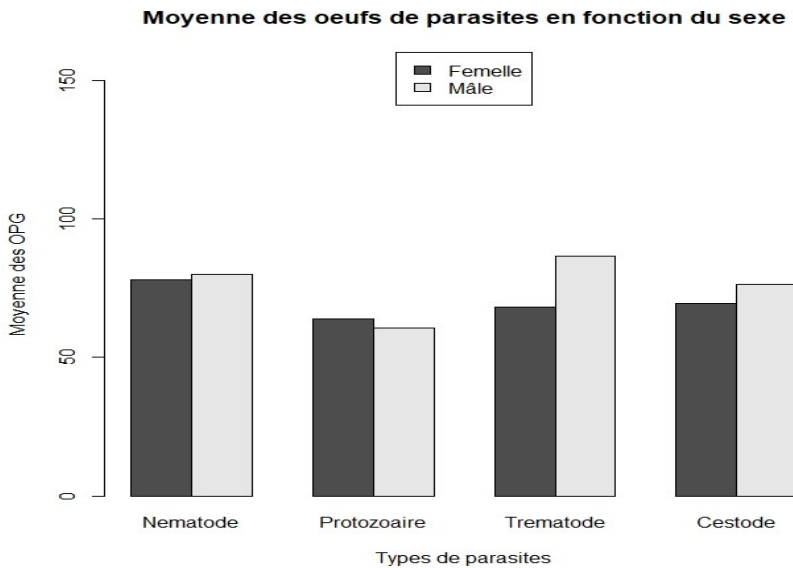


Figure 8 : Taux de charge des classes parasitaires (OPG) selon le sexe

Conséquence des infestations parasitaires

La croissance des jeunes bovins

Le poids vif de l'animal concerné 4 à 24 mois quel que soit son sexe et sa race varie en moyenne de 60 à 180 kg.

Le Taux de mortalité en fonction de l'âge et de la race

La mortalité était élevée chez les animaux de moins d'un an par rapport aux autres classes d'âges mais pas significative. Sur la population d'étude de 4 mois à 24 mois, il touche la 16,1 % du cheptel.

DISCUSSION

La conduite zootechnique de l'élevage

Sur les conduites zootechniques des bovins de Kianjasoa et ses environs, plusieurs risques d'infestation des parasites sont détectés : la conduite sur pâturages naturels avec des groupes de cheptels sans séparation des classes d'âges, l'abreuvement aux points d'eau naturels, l'hétérogénéité des prairies influent le niveau d'infestation parasitaire, ces résultats sont similaires aux études déjà publiées par Dayanes J. M. (2001). Une autre étude dans le district de Morondava a montré que la variation des parasites gastro - intestinaux peut être influencée par différents facteurs comme le mode d'élevage, l'environnement où se localise l'élevage, l'animal lui-même et la conduite de l'animal (Amed M., 2017).

La rotation des pâturages est très nécessaire, elle est recommandée avant la phase infestante d'un tel parasite mais à condition qu'il y ait repousse de l'herbe. En cas de long séjour au même pâturage, un risque de réinfestation grave peut apparaître chez les animaux concernés. Par conséquent, une phase de repos de pâturage couplée à un traitement est très importante. Les jeunes animaux en première année de pâturage sont très sensibles (Cabaret J., 2017), En évitant cette charge parasitaire élevée, la séparation des animaux par classe d'âge est primordiale pour limiter les infestations par des œufs excrétés par les adultes. Une association de bovins avec les petits ruminants est une gestion raisonnée non chimique car ces derniers peuvent brouter les restes des prairies trop courtes sur le sol, par cohérence, une réduction de charge parasitaire ingéré par chaque animal se produit (Hoste et *al.*, H., Paolini V., Paraud C., Chartier C., 2004). Les systèmes mixtes d'élevage de petits ruminants et de bovins est donc recommandé (Alexis, Valérie Angeon, Rémy Arquet, Maryline Boval, 2015) car la technique d'hétérogénéité d'espèce animale réduit l'infestation parasitaire dans un même lieux de pâturage Une diminution de la nourriture en saison sèche favorise l'attaque des parasites sur les sujets faibles (Cabaret J., 2017).Une culture fourragère (graminée et légumineuse) associée peut corriger la sous-alimentation en saison sèche:

à savoir *Brachiaria decumbens*/ *Calopogonium* *Stylosanthes* dans les zones exposées aux risques de sécheresse, *Digitaria swazilandensis*/ *Calopogonium* sur les sols dégradés et pauvres, *Brachiaria arrecta* Tanner / *Desmodium ovalifolium* sur les terrains inondés, Dayanes J. M. (2001). Ainsi, les cultures des alicaments (ou aliments médicaments) ou de fourrages contenant des tannins peuvent diminuer les infestations parasitaires. Il est donc mieux de donner une alimentation suffisante en quantité et en qualité, qui permet aux animaux de renforcer sa capacité de défense (Kyriazakis, 2001, Hoste et al., 2005).

La sortie précoce à l'herbe et la rentrée tardive constituent une augmentation des taux d'infestation par ingestion des œufs ou larves fixant sur les plantes fourragères (GRUNER et al., 1980 ; Cabaret, 2017). Des conditions météorologiques peuvent influencer la charge parasitaire grâce aux facteurs humidités et chaleur. Le résultat d'étude ici était significatif ($p < 0,05$) en fin de saison de pluie (avril-mai) car les conditions sont favorables, pas trop d'humidité mais avec de chaleur adéquate à son développement. Ce résultat est identique à celle de résultat trouvé par Barry et al., 2002, Achi et al., 2003.

Conduite sanitaire de l'élevage

L'infériorité d'efficacité des traitements antiparasitaires et l'utilisation des molécules inadéquates aux parasites cibles ont un effet sur le niveau d'infestation (Cabaret J., 2017). Cela produit une adaptation des parasites à la molécule antiparasitaire administrée. On déduit que l'installation de la résistance des helminthes aux antihelminthiques est possible en cas de sous dosage ou technique inadéquate aux traitements chimiques.

L'infestation parasitaire

La prévalence et la moyenne des OPG

Le taux de charge des classes parasitaires sur notre zone d'étude est une valeur basse mais non négligeable car cela peut être dangereux chez certains genres de parasites comme le *fasciolagigantica*, *oesophagostomumhaemoncus* et *oestertagia* grâce à ses capacités de coloniser les sujets hôtes par les lésions des cellules accessoires des glandes (référentiel gestion du parasitisme bovin en zones humides - janvier 2020).

Les traitements raisonnés sont primordiaux par application des traitements systématiques de tout le cheptel avec des protocoles de vermifugation adéquate ou bien par des traitements sélectifs en visant les saisons à risques et les animaux sensibles par des molécules adéquates (Cabaret J., 2017). Cette deuxième technique est nécessaire pour éviter l'installation de résistance aux antihelminthiques. Les gestions des pâturages couplés aux traitements sélectifs en utilisant des molécules adéquates sont très efficaces.

Infestation en fonction de la saison

Les taux de charge des parasites observés sur terrain sont variés en fonction de la saison avec une élévation importante des nématodes tandis que les trématodes sont marqués en saison sèche surtout le genre *dicrocoelium*. Ce résultat, en fonction de la saison, est similaire aux résultats du B. Bonfoh, J. Zinstag, P. Ankers, L.J. Pangui, K. Pfister en 1995 qui était un résultat significatif (P value < 0,005). Les connaissances sur l'épidémiologie des parasites et ses dynamismes est l'une de base des mises en place des stratégies de gestion raisonnées (Aurélié P., 2017). Une technique d'élimination des charges parasitaires est utile, à savoir la conservation des fourrages après fauchage tel l'ensilage et foin coupé en saison de forte production fourragère (saison de pluie) puis utilisé en période critique en alimentation (saison sèche).

Infestation en fonction de la race

Le résultat par rapport aux races montre une bonne résistance de la Frisonne, cela signifie que cette race a une rusticité forte grâce à sa composition génétique, Glass et al., 2005 aussi a trouvé le même résultat que les veaux à race Holstein Frisonne sont résistants aux certaines parasites gastros intestinaux. Par contre, la race zébus malgache est indiquée comme résistants aux parasites gastro – intestinaux et la race Renitelo reste encore à être vérifiée face aux infestations parasitaires. Une mise en place de sélection génétique appropriée est donc recommandable.

Infestation en fonction de la classe d'âge

Les animaux de plus d'un an sont moins infestés par rapport aux veaux de lait de moins d'un an grâce à leur immunité. Cela est dû aux immunités acquises après la première infestation aux premières saisons de pâturage, tandis qu'une augmentation du taux du protozoaire et cestode repéré chez les plus d'un an provient de la capacité d'ingestion des adultes à ingérer beaucoup plus des larves infestantes L3. Ces résultats sont identiques aux études publiées par l'Institut de l'élevage français en 2008². Il est admis que la résistance acquise n'est vraiment efficace qu'après l'âge d'un an.

Infestation en fonction du sexe

Le taux d'infestation sur la différence du sexe des animaux n'est pas différent mais le type trématode montre une élévation chez le sujet mâle. Le taux d'ingestion des charges parasitaires ne dépend pas du sexe mais de la charge parasitaire sur le milieu de pâturage. Ce résultat est semblable à l'étude menée en Guadeloupe, il n'y a pas d'effet sexe sur le taux d'infestation (Salas M. et Sheikboudou C., 1988).

² Edition France Agricole - 2008

Conséquence des infestations parasitaires

La croissance des jeunes bovins

Le poids des veaux, jeunes en croissance parasités sont diminués, retardés surtout en cas d'hyperparasitose ou coinfection par différents types d'helminthes. Plusieurs résultats de recherche évoquent la réduction de gain de poids des jeunes bovins infestés et non traités allant jusqu'à 14 kg (Cabaret J., 2017) (Dimander et *al.*, en 2003).

Taux de mortalité

Quels que soient le sexe et la race de l'animal, le veau de moins d'un an est le plus touché. Ce résultat n'est pas significatif en raison des autres facteurs qui peuvent influencer la mortalité des veaux. Différentes études montrent une valeur importante et significative sur le taux de mortalité des veaux infestés par des parasites gastro-intestinaux. Il avait un taux de mortalité allant jusqu'à 20 à 30 % à cause de l'action conjuguée de la malnutrition et l'infestation parasitaire (Bathiard T. & Vellut F., 2002).

CONCLUSION

L'utilisation des pâturages comme alimentation des ruminants est une solution économique et durable. Or l'infestation par les parasites gastro-intestinaux est une contrainte non négligeable sur la croissance et mortalité des jeunes bovins. La gestion de la charge parasitaire peut s'envisager par les traitements antihelminthiques et par une gestion non chimique comme la mise en rotation des pâturages. Ainsi, les pâturages mixtes avec des petits ruminants et la mise en place des meilleures conduites zootechniques et sanitaires du cheptel peuvent aussi réduire les résistances des parasites aux antihelminthiques. L'objectif final serait de favoriser, avec tous les alliés comme l'éleveur, les techniciens d'élevage et l'Etat, une gestion raisonnée du parasitisme afin d'atteindre une production satisfaisante en élevage. Une des difficultés de la réalisation d'une stratégie adéquate sera la disponibilité éleveur.

Remerciements

Les remerciements sont adressés au projet ECLIPSE Arch Net CIRAD et aux collaborateurs.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Amed, M. (2017). Trématodose et strongylose gastro-intestinale des bovins dans le district de Morondava [Thèse]. Médecine Vétérinaire : Antananarivo.
- 2) Aurelie, P. (2000). Etude du parasitisme digestif des bovins et du porc dans le Guangxi, chine [Thèse]. Faculté de médecine : Créteil.

- 3) Bonfoh, B., J. Zinstag, P. Ankers, L.J. Pangui, K. Pfister (1995). Epidémiologie des nématodes gastro intestinaux chez les petits ruminants dans la région des plateaux au Togo. Rév. Elev. Méd. Vét. Pays trop, 1995, 148 (4) : 321 – 326.
- 4) Basabe, J., D.F. Eiras and J.R. Romero (2009). Nutrition and gastrointestinal parasitism in ruminant production. Arch. Zootec. 58 (R) : 131-144.
- 5) Bathiard, T, Vellut F. Coproscopie parasitaire. Vet Agro Sup [En ligne]. (2002) [Consulté le 08 mai 2020]. Consultable à l'URL : <http://www.vetlyon.fr/formation/copro/index.html>].
- 6) Cabaret, J. (2017). Parasitisme interne des ruminants (strongles) et utilisation du pâturage : comment faire durablement bon ménage ? Le pâturage au coeur des systèmes d'élevage de demain 63 : Journées AFPF.
- 7) Demeler et al (2013) : Evaluation of resistance in a selected fieldstrain of *Haemonchus contortus* to ivermectin and moxidectin using the Larval Migration on Agar Test : Pesq. Vet. Bras. vol.33 (2) Rio de Janeiro.
- 8) Frederic B, Bruno P, Hoan, D., (2004) : Atlas de coproscopie. p12
- 9) Gruner L., Mauleon H., Hubert J., Sauve C. (1980). A study of ovine gastrointestinal strongylosis in a sheepflock on permanent pasture .2. Population-dynamics of parasites on the pasture in 1977 and an epidemiological interpretation. Ann. Rech. Vét., 11, 133-140.
- 10) Hoste, H., Paolini, V., Paraud, C. Chartier, C. (2004). Gestion non chimique du parasitisme par les nématodes chez les petits ruminants. caprins / ovins / parasitologie / Agriculture Biologique 15 : 1-2. Toulouse : Bulletin des GTV.
- 11) Institut de l'élevage (2008). Maladies des bovins. 4 ème éd., Édition France Agricole 13 : 149.
- 12) Dayanes, J. M. (2001). Contribution à l'étude des helminthoses digestives des bovins en milieu équatorial humide. Thèse en doctorat médecine vétérinaire, Toulouse.
- 13) Ladikpo, E. Nématodes digestives des veaux en République Populaire du Bénin [Thèse]. Médecine Vétérinaire : Dakar.
- 14) Mahieu, M., et al. Arquet, R., Fleury J. et al. (2009) : Contrôle intégré du parasitisme gastro-intestinal des petits ruminants au pâturage en zone tropicale humide : Renc. Rech. Ruminants, 16 : 265 – 266.
- 15) MAEP. Monographie de la région bongolava. maep (updr). (2003).

- 16) Rabearivelo, TS (2011). Fasciolose et strongylose gastro-intestinale des bovins dans la commune rurale d'Ambatofinandrahana [Thèse]. Antananarivo : Médecine Vétérinaire
- 17) Raeliarijaona, G. (2017) : état des lieux et perspectives pour la conservation des troupeaux de bovins Renitelo à Kianjasoa : [Thèse], Université d'Antananarivo.
- 18) Rafamantanantsoa (2001). Les Helminthoses digestives des bovins dans la commune rurale d'Andina Ambositra. Mémoire de fin d'études, ESSA Département Elevage : 1 – 83
- 19) Raharinosy, H. S. (2000.). Les helminthoses digestives des bovins aux alentours de la réserve spéciale de Bezaha – Mahafaly [Mémoire de fin d'études]. Ecole Supérieur des Sciences Agronomique : Antananarivo.
- 20) Rakotondravao, C., Kruger, W. (1990). Helminthoses des bovins du Moyen - ouest : identification des espèces dominantes, études du dynamisme de l'infestation et essai de traitement stratégique. FOFIFA. 343 : 117-30.
- 21) Randrianantenaina DB (2011). Helminthoses gastro-intestinales des bovins dans la commune rurale de Mahanoro [Thèse]. Médecine Vétérinaire, Antananarivo.
- 22) Randrianantenaina, D.B. (2011). Helminthoses gastro-intestinales des bovins dans la commune rurale de Mahanoro [Thèse]. Médecine Vétérinaire, Antananarivo.
- 23) Référentiel de gestion raisonnée et durable du parasitisme bovin au pâturage en zones humides (2020), Référentiel gestion du parasitisme bovin en zones humides: 15.
- 24) Salas M., Sheikboudou C (1988). Le parasitisme digestif dans le système d'élevage bovin traditionnel en Guadeloupe. 1. Enquête globale. Revue Elev. Méd. vét. Pays trop., 1988,41 (2) : 171-180.
- 25) Séverine, A., Valérie A., Rémy A., Maryline B. (2015). Les systèmes mixtes d'élevage de petits ruminants et de bovins : Une alternative pour améliorer les performances animales au pâturage. Innovations Agronomiques, INRA, p.19-28. hal-01222900.
- 26) Sochat F. (2015). Évaluation d'un nouvel liquide dense par le diagnostic cryoscopique des infestations des ruminants par les trématodes. Thèse en médecine vétérinaire, Toulouse : 50 -2.

ETUDES PHYTOCHIMIQUE ET PHARMACOLOGIQUE DE LA PLANTE *Gymnosporia sp* DE LA FAMILLE DE CELASTRACEAE

par

SOAVINA Silvère A.⁽¹⁾, RAZAFIMAHATRATRA Jean Hugues A.⁽¹⁾,
HANITRINIAINA NATAFITA Carène⁽¹⁾, MANJOVELO SAMBANY Christian⁽¹⁾,
RASOLONDRATOVO Benoit⁽¹⁾, FATIANY PIERRE Ruphin⁽¹⁾,
RASOLOHERY Claudine Aimée⁽⁴⁾, RAZAFIMAHEFA Solofoniaina^(2,3)

(1) Domaine Science et Technologie, Université de Toliara, Madagascar

(2) Institut d'Enseignement Supérieur Antsirabe Vakinankaratra, Université d'Antananarivo, Madagascar

(3) Institut Malgache de Recherches Appliquées, Antananarivo, Madagascar

(4) Université de Fianarantsoa, Madagascar

RESUME

Ce travail consiste à confirmer les connaissances recueillies auprès de la médecine traditionnelle malgache à travers des études phytochimiques et pharmacologiques d'une plante. En effet, des enquêtes ethnobotaniques initiées auprès des tradipraticiens du Sud-Ouest de Madagascar nous ont permis de choisir l'espèce *Gymnosporia sp.*, utilisée traditionnellement pour traiter la douleur suite à une blessure, les inflammations et les infections microbiennes. Pour valoriser ces données ethnobotaniques, ont été abordés les criblages phytochimiques de l'extrait hydroalcoolique de la plante qui permettent de connaître la présence des familles chimiques comme les triterpènes, les flavonoïdes, les composés phénoliques, les tanins galliques, les polysaccharides, les saponosides, responsables des effets thérapeutiques des traitements à base de cette plante. L'absence de toxicité jusqu'à la dose de 1000mg/kg confirme l'innocuité de l'extrait aqueux du *Gymnosporia sp.* A 500 mg/kg, avec le test de pincement, le même extrait présente une activité antalgique significative en utilisant comme produit de référence le Paracétamol (40mg/kg). La pommade préparée à 1% de cet extrait accélère la fermeture des plaies provoquées mécaniquement sur la partie dorsale des souris par rapport à la pommade de référence Ody Fery Meva à 1% d'Asiaticoside (phytomédicament produit par l'IMRA). L'étude de la cinétique du Bleu d'Evans montre aussi l'activité anti-inflammatoire de l'extrait en diminuant la perméabilité capillaire suite à l'injection intra-péritonéale de l'acide acétique 6%. La suite de notre étude se focalise sur l'isolement des molécules responsables de ces activités issues de l'extrait hydroalcoolique de cette plante.

Mots clés : *Gymnosporia sp.*, Ethnobotanique, Phytochimie, Cicatrisant, anti-inflammatoire

ABSTRACT

The present work consists to confirm the knowledge gathered from traditional Malagasy medicine through phytochemical and pharmacological studies of the plant. Indeed, ethnobotanical surveys initiated with traditional healers in southwestern Madagascar enabled us to choose the *Gymnosporia sp.*, Traditionally used to treat pain following an injury, inflammation and microbial infections. To valorize these ethnobotanical data, the phytochemical screens of the hydroalcoholic extract of the plant have been approached which make it possible to know the presence of chemical families such as triterpenes, flavonoids, phenolic compounds, gallic tannins, polysaccharides, saponosides, responsible for the therapeutic effects of treatments based on this plant. The absence of toxicity up to a dose of 1000 mg/kg confirms the safety of the hydroalcoholic extract of *Gymnosporia sp.* At 500 mg/kg, with the pinch test, the same extract exhibits significant analgesic activity using Paracetamol (40 mg/kg) as a reference product. The ointment prepared with 1% of this extract accelerates the closing of mechanically induced wounds on the dorsal part of mice compared to the reference ointment, Ody Fery Meva (phytomedicine produced by IMRA). The study of the kinetics of Evans Blue also shows the anti-inflammatory activity of the extract by reducing capillary permeability following the intra peritoneal injection of 6% acetic acid. The rest of our study focuses on the isolation of the molecules responsible for these activities from the hydroalcoholic extract of this plant.

Keywords : *Gymnosporia sp.*, Ethnobotanique, Phytochimie, Cicatrisant, anti-inflammatoire

INTRODUCTION

Madagascar regorge d'une richesse floristique hors du commun avec un taux d'endémicité très élevé : sur 12 000 plantes recensées, 85% sont endémiques (Delphin, 2013). Du fait de sa situation isolée en plein océan Indien, Madagascar a vu prospérer de nombreuses espèces de plantes et d'animaux. Cette biodiversité endémique est également due à la différence des climats : des régions les plus arides aux régions saturées en humidité (Office National du Tourisme de Madagascar, 2017).

Face à cette richesse floristique inégalée, nombreux scientifiques locaux ou étrangers cherchent à percer les secrets des plantes de Madagascar à travers l'utilisation thérapeutique pour soigner les maladies et trouver de nouveaux médicaments. Dans cette optique, nous proposons l'approche de notre recherche en commençant par l'enquête ethnobotanique pour mieux choisir la plante à étudier et adopter le processus de mise en œuvre de la recherche proprement dite.

MATERIELS ET METHODES

Matériel végétal

Ont été abordées avant la récolte des plantes, les enquêtes ethnobotaniques auprès des tradipraticiens dans la Région Sud-Ouest de Madagascar. Suite aux informations ethnobotaniques enregistrées sur lesquelles reposent les critères de sélection de la plante (effets thérapeutiques semblables sur plusieurs enquêtes, utilisation fréquente de la plante dans la zone d'enquête), la plante connue sous le nom scientifique *Gymnosporia sp* de la famille de CELASTRACEAE a été choisie. Par la suite, la récolte sur terrain a été réalisée au mois d'Août 2018 : les petites tiges feuillées et l'écorce du tronc de la plante ont été mises chacune dans des sacs. L'identification botanique a été réalisée auprès de l'équipe botaniste de l'Université de Toliara et a été confirmée à partir des herbiers existants au Parc Botanique et Zoologique de Tsimbazaza à Antananarivo.

Après avoir été séchées à l'ombre, l'écorce et les tiges feuillées de la plante récoltée ont été broyées à l'aide d'un broyeur RETSCH Type SM100 au Laboratoire Biothérapeutique de l'IMRA à Antananarivo.

Préparation des extraits aqueux et hydroalcoolique

La poudre de l'écorce ainsi que les tiges feuillées du *Gymnosporia sp* (CELASTRACEAE) ont été respectivement soumises à la décoction et la macération hydroalcoolique (à la proportion éthanol-eau : 80/20) pendant 72 heures sous agitation au Laboratoire Biothérapeutique de l'IMRA. Au bout de 15min de décoction sous agitation, le filtrat a été concentré au Rotavapor sous vide : d'où l'extrait aqueux noté FEAG. Quant à l'extraction hydroalcoolique, le filtrat a été évaporé avec le même Rotavapor pour en récupérer l'extrait hydroalcoolique.

Seul l'extrait FEAG du *Gymnosporia sp*, a été utilisé pour les études phytochimiques et pharmacologiques dans ce travail afin de respecter l'utilisation traditionnelle enregistrée lors de l'enquête ethnobotanique.

Méthodes de révélation des métabolites secondaires

Révélation des alcaloïdes

Les tests ont été réalisés par des réactions de précipitation avec le réactif de Dragendorff. Il s'agit d'introduire 10 g de poudre végétale sèche dans un erlenmeyer, à laquelle 50ml de H₂SO₄ dilué au 1/10 avec de l'eau distillée est ajouté. Ce mélange a été agité et macéré pendant 24 h. Ensuite, dans 1ml du filtrat, 5 gouttes de réactif de Dragendorff ont été ajoutées. L'apparition d'un précipité orange, révèle la présence d'alcaloïdes (Azzi, 2013).

Révélation des stéroïdes et triterpènes

Dans un tube à essai, une faible quantité de l'extrait FEAG a été solubilisée dans 5 ml de chloroforme selon le test de Liebermann Buchard. À cette solution, ont été ajoutés 2 ml d'anhydride acétique et 1 ml d'acide sulfurique concentré. L'apparition d'une coloration bleu verdâtre indique la présence de triterpènes (Ribereau-Gayon & Peynaud, 1968) (Brain & Tumer, 1975).

Révélation des composés phénoliques

Environ 1 mg d'extrait FEAG a été solubilisé dans le méthanol et à cette solution ont été ajoutées quelques gouttes de chlorure ferrique FeCl_3 . La présence de composés phénoliques provoque la formation d'une couleur bleue ou violette (Emmanuel et *al.*, 2020).

Révélation des tanins

Une quantité de 1,5 g de poudre de la plante sèche a été placée dans 10 ml de méthanol 80% et agitée durant 15 mn puis filtrée. On a ajouté quelques gouttes de chlorure ferrique (FeCl_3) 1% à l'extrait méthanolique déjà préparé. En présence de tanins galliques et ellagiques, on observe une coloration bleue noire, alors qu'en présence de tanins catéchiques, cette coloration est brune verdâtre (Rizk, 1982).

Révélation des flavonoïdes

À une solution alcoolique de l'extrait FEAG (1 mg/ml) ont été ajoutés des copeaux de magnésium et ensuite quelques gouttes d'acide chlorhydrique 37 %.

La présence des flavonoïdes s'est manifestée par l'apparition d'une coloration rougeâtre (Brain K. R, & Tumer T. D., 1975) (Paris R, et *al.*, 1975).

Révélation des saponosides

50 mg d'extrait FEAG ont été ajoutés à 5 ml d'eau distillée. Le mélange a été chauffé au bain- marie pendant 5 minutes. Après agitation, l'indice de mousse devrait être au moins de 2 cm (Emmanuel et *al.*, 2020).

Révélation des polysaccharides

Le filtrat de décoction de la poudre de la plante a été mélangé avec trois fois (3X) volume de l'éthanol 80°.

L'apparition du précipité signifie la présence des polysaccharides dans la plante.

Méthodes pharmacologiques

Matériel biologique

Des souris mâles albinos de race SWISS de l'animalerie de l'IMRA, âgées de 12 semaines environ, ont été utilisées pour tous les tests biologiques réalisés au Laboratoire Biothérapeutique du même institut. Ces animaux pesants entre 27 et 35 g ont été placés dans un milieu aéré à la température ambiante et ont été nourris quotidiennement.

Etude de la toxicité aigüe

La toxicité aigüe a été estimée conformément à la ligne directrice n°423 de l'OCDE (OCDE, 2001).

Les souris ont été mises à jeun pendant 24 heures avant l'administration orale de l'extrait FEAG (Elion Itou RDG et *al.*, 2017). Quatre (4) lots de 3 souris chacun ont été constitués et traités respectivement aux doses respectives 250, 500 et 1000mg/kg. L'administration de ces produits a été faite par voie orale à 10 ml/kg du poids corporel (pc) de l'animal.

Les animaux ont été observés pendant les quatre premières heures après le traitement pour enregistrer des cas de morts immédiats et des éventuels signes symptomatiques (ptosis, pilo érection, agressivité, mobilité, vigilance, état des selles) et une fois par jour pendant 14 jours pour enregistrer des morts tardives (ELION Itou RDG et *al.*, 2017).

Etude de l'activité cicatrisante

Pour une application homogène et non agressive qui aggraverait la plaie, un cicatrisant peut être appliqué directement sur la plaie sous forme de pommade, de crème, de gel ou de cataplasme (pansement) (Fromantin I. et *al.*, 2011). Cette étude consiste à appliquer par voie topique sous forme de pommade 1%, l'extrait aqueux FEAG de la plante *Gymnosporia sp* pour évaluer son activité cicatrisante face à des plaies provoquées. L'excipient principal était la vaseline en raison de sa stabilité et de sa compatibilité avec la plupart des principes actifs (Ernest et *al.*, 2019).

En effet, 20 g de pommade ont été préparées à partir de 200mg d'extrait. Pour rendre plus facile la dissolution de l'extrait, 300 µL de propylène glycol ont été rajouté puis 19,8g de vaseline. L'ensemble a été mélangé jusqu'à l'obtention d'une pommade homogène.

Quatre (4) lots de quatre (4) souris, chacun placé dans des cages individuelles, ont été utilisés pour cette expérience. Une plaie mécanique a été provoquée, à l'aide d'un ciseau et d'un rasoir, sur la région dorsale désinfectée de chaque souris au niveau de l'homoplate, zone non accessible au grattage, après avoir anesthésié par inhalation

les animaux avec de l'éther diéthylique (Bhaskar A. & Nithya V., 2012). Le premier lot (Lot 1), témoin négatif a été traité avec de la vaseline seule, le deuxième lot témoin positif avec le produit de référence OFM (Ody Fery Meva) de l'IMRA. En fin, le lot 3 a été traité avec la pommade de l'extrait FEAG.

Tous les jours, à la même heure, la plaie a été nettoyée à l'aide d'un coton imbibé d'eau. La surface de la plaie a ensuite été séchée, avant d'être observée et mesurée par planimétrie directe. Après le nettoyage, 10 mg de crème ont été appliquées sur la surface de la plaie tous les jours à la même heure jusqu'à la fermeture complète des plaies (Dally L.I., et al., 2007).

Tous les animaux ont été suivis régulièrement jusqu'à la cicatrisation complète des plaies et ont eu accès à la nourriture et à l'eau à volonté (EPA CHARLES1 et al., 2015).

Afin d'évaluer l'activité cicatrisante de l'extrait FEAG, le pourcentage de cicatrisation (%C) des plaies a été calculé selon la formule suivante :

$$\%C = \frac{S_{n-1} - S_n}{S_n} \times 100$$

Avec :

S_{n-1} : Surface de la plaie au jour J_{n-1} (jour précédent J_n)

S_n : Surface de la plaie au jour J_n

Etude de l'activité analgésique

Le test consiste à induire la douleur en pinçant la queue de la souris. Le temps mis par l'animal pour essayer d'enlever la pince en la mordant est considéré comme temps de réaction à la douleur (Shrivastava A. et al., 2012). Ce temps est augmenté par les analgésiques centraux.

Avant d'entamer l'expérience, les souris soumises au test ont été sélectionnées selon leur capacité de réagir au pincement appliqué à 2 cm environ de la queue : seuls les animaux qui ont présenté un temps de réaction inférieur à 5 secondes ont été retenus pour l'expérience (Ajith T. S. et al., 1998).

Les seize (16) souris sélectionnées ont été réparties en quatre (04) lots : Lot 1, pour témoin négatif (de l'eau distillée), Lot 2, pour témoin positif (dont la référence : paracétamol à la dose 40 mg/kg) et deux autres lots (Lot 3 et Lot 4) avec l'extrait aux doses respectives 250 et 500 mg/kg. Les animaux de ces lots ont respectivement reçu une administration par voie orale de 10ml/kg de souris.

Au cours de l'expérience, la pince a été placée à la base de la queue des souris à des intervalles de temps : 15, 30, 45, 60, 90, 120 minutes après l'administration des

produits. Le temps de réaction a été noté. Pour éviter des lésions tissulaires, la queue n'a pas été pincée plus de 30 secondes (Shrivastava A. et *al.*, 2012).

L'activité analgésique centrale de l'extrait de la plante est traduite par le pourcentage d'inhibition de la douleur en fonction de temps de réaction de souris avant et après l'administration de ces produits :

$$\%PI = \frac{T_1 - T_0}{T_2 - T_0} \times 100$$

Avec :

T_0 : Temps de réaction avant l'administration des produits [sec] ;

T_1 : Temps de réaction expérimental après l'administration des produits [sec] ;

T_2 : Temps maximal de réaction de la souris lors du pincement [sec], fixé à 30 secondes; (Abimbola S. et *al.*, 2013).

Etude de l'activité anti inflammatoire

L'effet anti inflammatoire de l'extrait FEAG a été évalué selon la phase vasculaire de l'inflammation provoquée par l'acide acétique injectée par voie intrapéritonéale (Coyen Y., 1990). En effet, seize (16) souris ont été mises à jeun pendant 16 heures, puis elles ont été réparties en quatre (04) lots : Lot 1 pour témoin négatif, Lot 2 pour témoin positif et deux autres lots (Lot 3 et Lot 4) avec l'extrait aux doses respectives 250 et 500 mg/kg. Les animaux du Lot 1 ont reçu 10 ml/kg d'eau distillée par voie orale tandis que ceux du Lot 2 ont été traités à l'indométacine à la dose 5mg/kg (Diel H. & Heinz K, 2010).

30 minutes après l'administration de ces produits, 10 ml/kg de la solution de Bleu d'Evans à 1 % ont été injecté dans la veine caudale des animaux. Après 15 minutes, 10 ml/kg d'acide acétique à 6% ont été injectés par voie intra-péritonéale. 15 minutes après l'injection de l'acide acétique, les souris ont été sacrifiées. Une laparotomie a été effectuée et la cavité péritonéale a été lavée avec 2 ml de solution de NaCl 0,9 %. La solution de lavage a été récupérée, puis centrifugée à 1500 tours/mn pendant 10 minutes. La densité optique du surnageant a été mesurée à l'aide d'un spectrophotomètre TYPE AWARENESS TECHNOLOGY INC à la longueur d'onde de 630 nm contre un blanc, solution de NaCl 0,9 % (Kou J., et *al.*, 2006).

L'activité de l'extrait de la plante *Gymnosporiasp* a ensuite été exprimée en pourcentage d'inhibition de la perméabilité vasculaire chez les lots d'animaux traités avec l'extrait par rapport au témoin selon la formule :

$$\%PI = \frac{DO_1 - DO_2}{DO_1} \times 100$$

DO₁ : densité optique moyenne des souris témoins

DO₂ : densité optique moyenne de souris traitées(KOU J. et *al.*, 2006).

Analyses statistiques

L'analyse statistique des résultats a été réalisée par comparaison de chaque lot d'animaux traités par rapport aux témoins en utilisant le test t de Student sur EXCEL. Les différences sont considérées comme significatives si la valeur de « p » (p value) est inférieure à 0,05 par rapport au groupe contrôle négatif.

RESULTATS

Rendement d'extraction

L'extraction hydroalcoolique et la décoction de la partie aérienne (feuille+tige) de la plante *Gymnosporia sp* ont permis d'obtenir les résultats suivants :

- 62g d'extrait hydroalcoolique, soit 12,4% de rendement ;
- 74g d'extrait aqueux, soit 14,8% de rendement.

Criblages phytochimiques des métabolites secondaires

Le tableau ci-après représente les résultats de révélation des métabolites secondaires présents dans l'extrait FEAG de la plante *Gymnosporia sp* :

Tableau 1 : Résultats du criblage phytochimique de l'extrait aqueux FEAG

Métabolites secondaires	Observation	Résultats
Alcaloïdes	Aucune précipitation	— — —
Stéroïdes et triterpènes	Coloration Bleue verdâtre	+ + +
Composés phénoliques	Coloration Bleue	+ + +
Tanins	Coloration Bleue noire Présence des tanins galliques	+ + +
Flavonoïdes	Virage à la couleur rougeâtre	+ +
Saponosides	Présence de mousse à hauteur considérable	+
Polysaccharides	Précipitation	+ + +

Tests biologiques

Test de toxicité aigue

L'administration par voie orale de l'extrait aux doses 250, 500 et 1000 mg/kgpc aux souris n'a provoqué aucun cas de mort ni de changement de comportement particulier des souris au cours de 14 jours d'observation.

Activité cicatrisante

D'après la Figure 2, les surfaces des plaies des animaux traitées par l'OFM diminuent favorablement dès le 2ème jour de traitement, avant celles des animaux du Lot 3 puis Lot 1. Ce qui confirme que l'OFM a plus d'effet cicatrisant que la pommade FEAG.

A partir du 7ème jour de traitement, les valeurs de « p value » relative à la pommade l'extrait FEAG par rapport au témoin (Vaseline) sont 0,03 ; 0,09 ; 0,016 ($p < 0,05$) donc les résultats s'avèrent significatifs : l'extrait aqueux de *Gymnosporia sp* a un effet cicatrisant par rapport au témoin négatif. Quant à la pommade OFM, son effet cicatrisant est pris en compte à partir du 2ème jour de traitement.

La Figure 1 montre qu'entre le 6ème et 7ème jour de traitement, 50% de cicatrisation sont observées chez les souris du Lot 2 traitées avec la pommade 1% de l'extrait aqueux de la plante tandis que celles du lot témoin n'en connaissent que vers le 11ème jour de traitement.

La différence entre OFM et la pommade FEAG n'est observée qu'à partir du 9ème jusqu'à 11ème jour où les valeurs de « p value » sont 0,045 ; 0,026 ; 0,038 ($p < 0,05$). En conséquence, l'effet cicatrisant de l'extrait FEAG est plus considérable que celui de la pommade OFM lorsque 60% de cicatrisation des animaux traités est atteint.

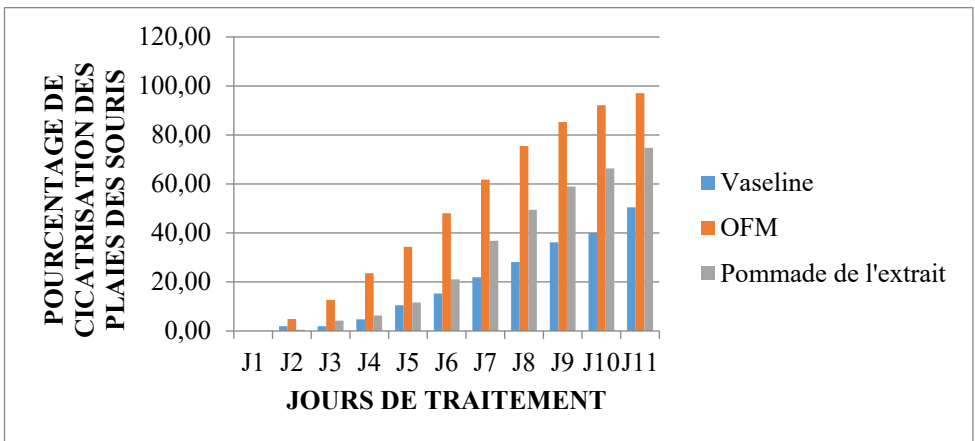


Figure 1 : Evolution journalière de cicatrisation des plaies des souris (en %) au cours des traitements avec la vaseline comme témoin négatif, les pommades de l'Ody Fery

Meva (OFM) et l'extrait aqueux de *Gymnosporia sp* (moyenne notée $\bar{x} \pm$ erreur standard de mesure notée e.s.m, n=4)

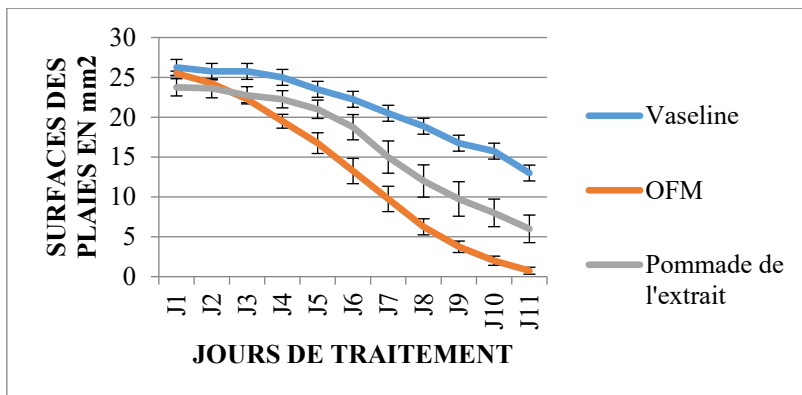


Figure 2 : Variation des surfaces des plaies dues à l'effet cicatrisant de Ody Fery Meva (OFM) et l'extrait aqueux de *Gymnosporia sp* ($\bar{x} \pm$ e.s.m,n=4)

Activité analgésique

Dans la Figure 3, les résultats montrent que l'extrait FEAG à 250mg/kg et 500mg/kg présentent un effet analgésique par rapport au témoin négatif. Le pic du temps de réaction (11,5s) des souris a été atteint à la 45ème minute de l'expérimentation. Il s'agit d'un temps maximal de réaction d'une souris pour lequel le paracétamol ou l'extrait FEAG a pris considérablement effet en tant qu'analgésique. Les valeurs du temps de réaction maximal (pic) relatives aux doses 250mg/kg (5,75s) et 500mg/kg (9s) ont permis d'affirmer que l'extrait FEAG à la dose 500mg/kg a plus d'effet analgésique que celui à la dose 250mg/kg.

Après le temps maximal de réaction ci-dessus, l'allure de la courbe descend, ce qui explique l'effet du produit administré diminue.

Selon la Figure 4, l'extrait FEAG a un effet inhibiteur à la douleur comparable à celui du paracétamol. Respectivement, l'extrait FEAG à la dose 500mg/kg et le Paracétamol à 40mg/kg, l'inhibition maximale est de 26,32% contre 35,09%.

Par le test de STUDENT, l'analyse statistique des données de cette expérience confirme les propriétés analgésiques du paracétamol et l'extrait FEAG ($p < 0,05$) par rapport au témoin. Pourtant, l'extrait FEAG à la dose 500mg/kg ne présente aucune différence significative avec le paracétamol à 40mg/kg ($p > 0,05$).

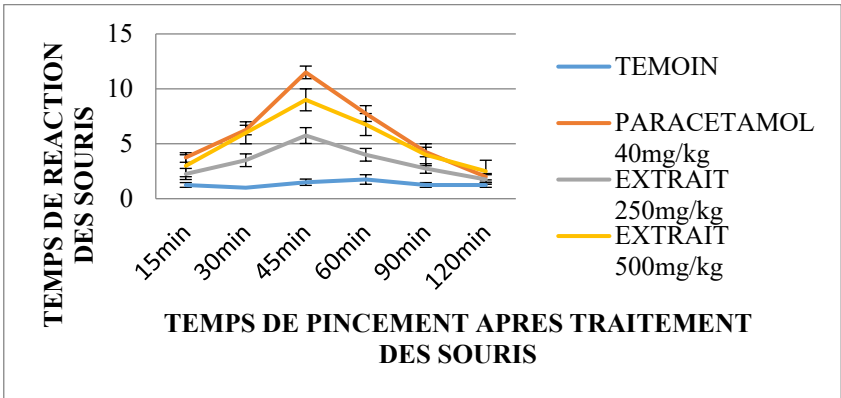


Figure 3 : Evolution de temps moyens de réaction des souris traitées avec le Paracétamol à la dose 40mg/kg et l'extrait aqueux de plante *Gymnosporia sp* aux doses 250mg/kg et 500mg/kg ($\bar{x} \pm e.s.m, n=4$)

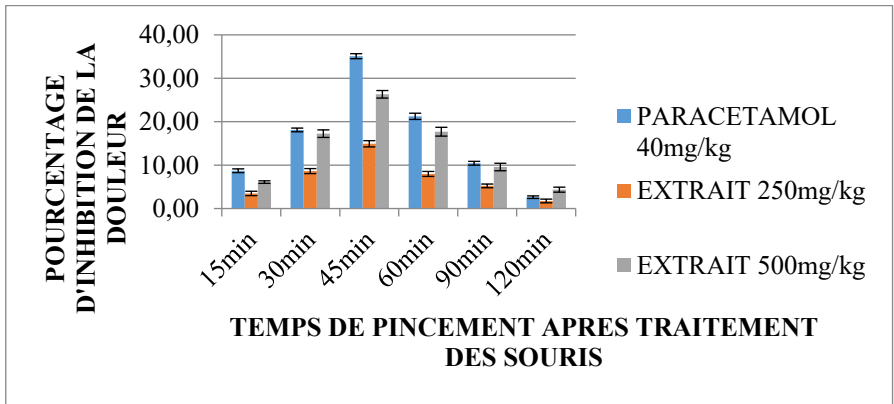


Figure 4 : Effet inhibiteur à la douleur de l'extrait aqueux de plante *Gymnosporia sp* et le paracétamol ($\bar{x} \pm e.s.m, n=4$)

Activité anti inflammatoire

D'après la Figure 5, la densité optique moyenne du lot traité par l'indométacine à 4mg/kg est plus faible que celles des autres lots. Les résultats de la Figure 6 montrent que l'extrait FEAG à 500mg/kg et l'indométacine à 4mg/kg ont un effet inhibiteur de l'augmentation de la perméabilité capillaire par rapport au témoin ($p < 0,05$). Par ailleurs, la différence est significative pour l'extrait FEAG à la dose 500mg/kg et l'indométacine à 4mg/kg (10% d'inhibition contre 22,04%).

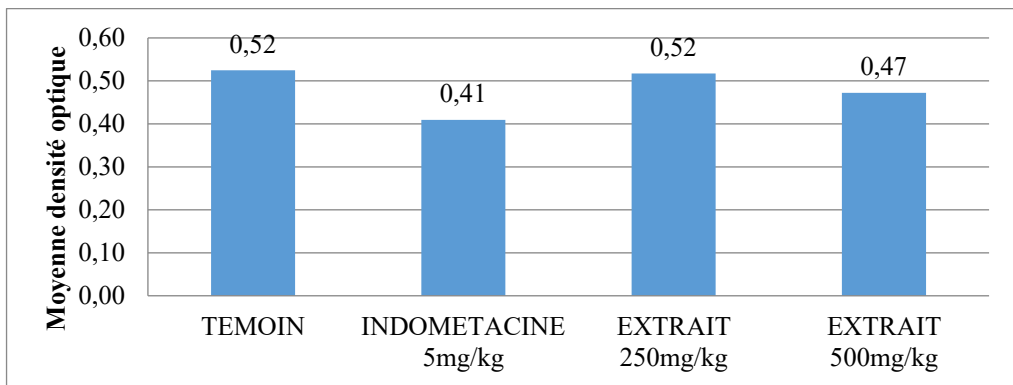


Figure 5 : Variation de la densité optique moyenne du liquide intestinal des souris traitées à l'indométacine 5mg/kg et l'extrait aqueux de *Gymnosporia sp* aux doses 250 mg/kg et 500mg/kg

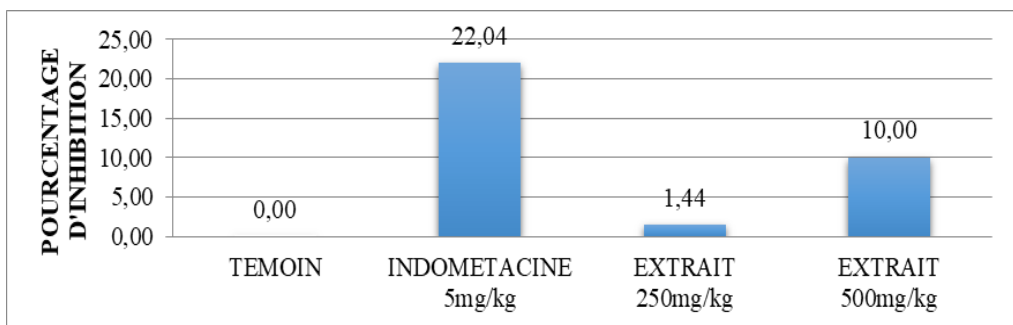


Figure 6 : Inhibition de la perméabilité vasculaire de l'indométacine et l'extrait FEAG aux doses 250 et 500mg/kg

DISCUSSION

L'étude phytochimique de la plante *Gymnosporia sp* permet d'identifier les familles chimiques présentes dans l'extrait aqueux FEAG qui caractérisent ses éventuelles propriétés pharmacologiques.

En ce qui concerne l'étude pharmacologique, le test de toxicité aiguë est une étape primordiale et inévitable avant d'entamer les expérimentations portant sur les autres activités biologiques. Les résultats nous rassurent l'innocuité de l'extrait décocté de cette plante.

La pommade 1% de l'extrait de FEAG diminue significativement les surfaces des plaies chez les souris. Au 9ème jour de traitement avec une surface moyenne de plaie de 23,75mm², le pourcentage de cicatrisation de plaie passe déjà la barre de 50% environ. Ces résultats montrent que la plante *Gymnosporia sp* est dotée d'un pouvoir

cicatrisant capable d'accélérer le processus cicatriciel : d'où la rapidité de la phase exsudative pour passer à l'épithélialisation de la plaie.

Compte tenu de ce qui est décrit dans la littérature et précisément en ce qui concerne les composés phénoliques, l'efficacité pharmacologique de la pommade à base des feuilles de *Gymnosporia sp* est due à la présence des polyphénols, révélée par les criblages phytochimiques. En effet, ces composés sont connus pour avoir de propriétés cicatrisantes liées à leur effet astringent (Ernest et *al.*, 2019). L'activité cicatrisante de la pommade serait liée à des mécanismes en rapport avec les effets anti-inflammatoire, antioxydant et astringent de la plante (Foutse Y. et *al.*, 2014).

Le pouvoir analgésique évalué par le test de pincement en fonction du temps agit sur l'inhibition de la douleur au niveau du système nerveux central. Ce qui explique le choix du paracétamol comme référence à test. Il inhibe la production de substances, les prostaglandines, impliquées dans les processus de la douleur. L'effet de l'extrait FEAG est comparable à celui du paracétamol : ces résultats ont démontré que l'extrait augmente le temps de latence avant la perception de la douleur et ils ont conclu que cet extrait possède une activité analgésique centrale

L'acide acétique a été utilisé pour provoquer la vasodilatation afin d'augmenter la perméabilité vasculaire. C'est un modèle expérimental typique pour l'étude de l'effet des substances naturelles ou synthétiques sur la phase vasculaire de l'inflammation (Okoli C. O. et coll., 2007). L'acide acétique administré par voie intra-péritonéale provoque une augmentation de la libération de la sérotonine, de l'histamine et des prostaglandines dans la cavité péritonéale. Ces deux derniers médiateurs provoquent la dilatation des artérioles et des veinules, entraînant une augmentation de la perméabilité vasculaire et l'infiltration des protéines plasmatiques vers la cavité péritonéale (Okoli C. O. et *al.*, 2007). Tandis que le Bleu d'Evans est un colorant très utilisé comme marqueur de l'exsudation extravasculaire, il possède une affinité aux protéines plasmatiques. Les résultats des tests sur la perméabilité vasculaire montrent que l'extrait FEAG diminue la densité optique du bleu d'Evans dans le liquide intra-péritonéal. Ce qui signifie que la quantité de Bleu d'Evans dans le liquide intra-péritonéal diminue. Cette diminution est fonction de la dose de l'extrait administré, ce qui nous permet de dire que l'extrait serait responsable de cette diminution.

CONCLUSION

Cette étude est une évaluation des propriétés pharmacologiques de l'extrait aqueux de la plante *Gymnosporia sp*. L'information sur ces activités a été recueillie lors de l'enquête ethnobotanique effectuée auprès des guérisseurs comme cicatrisant, anti inflammatoire. Des tests pharmacologiques sont réalisés dans notre laboratoire pour la confirmation de ces activités. Il a été démontré que la plante connue sous le

nom scientifique *Gymnosporia sp* possède des activités cicatrisantes, analgésique et anti inflammatoire.

Toutefois, il reste à déterminer les fractions bioactives de l'extrait de cette plante dotée de ces activités biologiques. Ainsi, la suite de nos travaux se focalisera donc sur l'isolement de ces molécules actives.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Abimbola S., Monsurat O., Muyiwa S.F., & Titilayo F. (2013). Studies on the anti-inflammatory and anti-nociceptive properties of *Blepharis maderaspatensis* leaves. *Rev. Bras. Farmacogn.*, 23, 830-835, 830-835.
- 2) Ajith T., S. Renege g., & Vijayalakshmi A. (1998). Anti – inflammatory and analgesic properties of the leaves of *Tamarindus indicus*. *Anc. Sci. Life*, 120-126.
- 3) Azzi R. (2012). Contribution à l'étude de plantes médicinales utilisées dans le traitement traditionnel du diabète sucre dans l'ouest algérien : Enquête ethno pharmacologique, analyse pharmaco-toxicologique de figuier (*figus carica*) et de coloquinte (*citrulluscolocynthis*) chez le rat WISTAR. Thèse de doctorat en Biologie, 75 p.
- 4) Bhaskar A., & Nithya V. (2012). Evaluation of the wound-healing activity of the *Hibiscus rosa sinensis* L. (MALVACEAE) in Wistar albino rats. *Ind. J. Pharmacol.*, 44 : 694-698.
- 5) Brain KR, & Tumer TD. (1975). *Practica evaluation of phytopharmaceuticals. Wright sientechica*, Bristol. 1st Ed., 1975, p. 144.
- 6) Coyen Y. (1990). *Les médiateurs chimiques de l'inflammation. Abrégé de pharmacologie*. 3^eéd., Paris : Masson, 333 – 350.
- 7) Dally L.I., Coulibay S., Angnimell H., & Bamba M. (2007). Formation, contrôle galénique, toxicologique et essai biogalénique d'une crème à activité cicatrisante à base de feuilles fraîches de *Baphianitida* (PAPILIONACEAE). *J. Sci. Pharm. Biol.*, 8(1) : 3-40.
- 8) Delphin R. (2013). Production et analyse des huiles essentielles de plantes aromatiques et médicinales de Madagascar. Caractérisation par RMN13C, CPG(Ir) et CPG-SM. Thèse de doctorat en Chimie organique, Ecole ESPA Université d'Antananarivo (p 2).
- 9) Diel H., & Heinz K. (2010). A good guide to the administration of substances and removal of blood, including rat and volume. *J. Appl. Toxicol.*, 21 : 15 – 23, 21.
- 10) Elion Itou RDG, Etou O AW, Morabandza CJ, Kiessé D.S, Mayela Nkouka S.H.J, & Abena AA. (2017). Toxicité Aigüe Et Effets Des Extraits Des Feuilles De

Cogniauxia Podolaena Bail. (Cucurbitaceae) Sur l'excrétion fécale et la motilité intestinale. European Scientific Journal September 2017 edition Vol.13(27) ISSN: 1857 – 7881 (Print) e - ISSN 1857- 7431.

- 11) Emmanuel, N., Francis N., Vanessa S., ManiépieNpjs., MartinN., Eya'ane Meva, F., MpondoE., & JacquelineZ. (2020). Identification des Composés Bioactifs dans les Feuilles de Psychotria Calceata Utilisées en Médecine Traditionnelle au Cameroun Identification of bioactive compounds in the leaves of Psychotria calceata used in traditional medicine in Cameroon. Journal Health Sciences and Diseases 21, 1-4.
- 12) Epa Charles, Elion I. RDG, Etou O. AW, Attibayéba, Ongoka P. R., & Abena A. A. (2015). Effet anti-inflammatoire et cicatrisant des extraits aqueux et éthanolique des écorces du tronc de Buchholzia coriacea Engl. (Capparidaceae). Journal of Applied Biosciences 94 : 8858 – 8868, ISSN 1997–590.
- 13) Ernest, D., Yimta, F., Stéphanie M. K., & Théophile D. (2019). Activité cicatrisante d'une pommade à base des feuilles de Kalanchoe crenata (Andr.) Haw chez le rat. (Wound scarring of a kalanchoe crenata leaves ointment). International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAR) (No 4). 6(4), 21.
- 14) Foutse Y., Monekeng R., & Nguimatsia F. (2014). Antibacterial activity of methanol extracts and fractions from Kalanchoe crenata, Terminalia avicennioides and Sarcocephallus latifolius, Pharmacologia 5(6) 199-204, 2014.
- 15) Fromantin I., Teot L., & Meaume S. (2011). Soins : Pansements booster de cicatrisation. Ed. Elsevier Masson SAS, France, 56 (758) : 19-21.
- 16) Kou J., SI M., Dai G., Zhu D., & SI M. (2006). Anti-inflammatory activity of Polygala japonica extract, Fitoterapia 77(6) :411-415.
- 17) OCDE. (2001). Harmonized Integrated Hazard Classification system for Human Health and Environmental Effects of Chemical substances, part 2, OECD Paris : 20-24, 2001. OECD Paris.
- 18) Okoli C. O., Erojikwe O. (2007), Akah P. A., Nwafor S. V., Anisiobi A. I, & Ibeghunam I. N. (2007). Anti-inflammatory activity of hexane leaf extract of Aspilia africana ADAMS. C.D. J. Ethnopharmacol., 109 : 219 – 225. C.D.
- 20) Paris R, Jacquemin H, & Linard A. (1975). Chlaenaceae from Malagasy, Leptolaena pauciflora, L. Diospyroidea cavaco var tampoketsensis, and Sarcolaena multiflora. Presence of myricetol heterosides. Plantes Méd et Phyto, 1975 ; 9 : 230-7 14.
- 21) Ribereau-Gayon J., & Peynaud E. (1968). Les composés phénoliques des végétaux. Traité d'oenologie. 254 p. Paris : Édition Dunod. 1968.

- 22) Rizk A. M. (1982). Constituents of plants growing in Qatar, *Fitoterapia*, 52 (2), (1982) 35-42.
- 23) Shrivastava A., Neeraj S., & Nitesh K. (2012). Phytochemical screening and study of analgesic activity of brinjal leaves. *Int. J. Pharmac. Sci.*, 3(4) : 3029-3033.

VALORISATION DES DECHETS DE GERANIUM D'AMBOSITRA PAR BIOMETHANISATION

par

TOLOJANAHARY J. M.^(1,2), MANJOVELO Sambany C.⁽²⁾, FATIANY P. R.⁽²⁾

(1) Doctorant, Département Chimie Organique, Université de Toliara, Madagascar

(2) Département Chimie Organique, Université de Toliara, Madagascar

RESUME

L'objectif général de ce travail est la recherche des alternatives durables vis-à-vis de l'accumulation des déchets et de la déforestation galopante causée par le développement de la culture de Géranium. Un essai en laboratoire de 4285g mélangé avec 857g d'inoculum pendant 91 jours donne 502 litres de biogaz soit 335 L/kg.MS avec une teneur en méthane de 63,26% et 33,04% CO₂, un pouvoir calorifique inférieur à 2269 kJ/Nm³. L'extrapolation de ces résultats à la valorisation, par biométhanisation des 32 000 t des déchets disponibles par an peut remplacer les 64 000 mètres cube de bois consommés pour la distillation et les besoins énergétiques annuels en bois des 3 786 foyers à 8 personnes. Une production de 20 800 t de compost est envisagée avec une émission évitée estimée à 2 464t éq.CO₂ dans l'atmosphère. Les études techniques d'installation des infrastructures et d'organisation des activités prévoient une réelle faisabilité du projet, dont la réalisation apporte des solutions à plusieurs problématiques : traitement local des déchets organiques, création d'emploi local, indépendance énergétique, maintien de l'agriculture, développement économique.

Mots clés : Biogaz, Développement, Digestion anaérobie, Fertilisant, Géranium

ABSTRACT

The general objective of this work is the research of the lasting alternatives of the accumulation of the waste and galloping deforestation caused by the development of the geranium culture. So, to arrive there, a test in laboratory of 4285g mixed with 857g inoculum during 91 days gives 502 liters of biogas in average, i.e. 335 L / kg.DM with a methane content of 63.26% and CO₂ of 33.04%, at a lower calorific value of 2269 kJ/Nm³. The extrapolation of these results to the valorization 32 000 Tons of the available waste is able to replace of 64 000m³ consumed for the distillation and the yearly energizing necessity of wood for 3 786 families of 8 peoples. A production of 20 800 Tons of compost is considered with an emission of 2,464 tonnes of equivalent

CO² avoided in the atmosphere. The technical study for the installation of infrastructures and the organization of activities provide for a real feasibility of the project, the realization of which provides solutions to several issues : local treatment of organic wastes, creation of local green job, development of local resources, energy independence, maintenance of agriculture, economic development.

Keywords : Anaerobic digestion, Biogas, Developpement, Fertilizer, Geranium

INTRODUCTION

Le Géranium est une plante industrielle dont les huiles essentielles sont très recherchées sur le marché international pour plusieurs usages comme parfumerie, savon, alimentaire et usines pharmaceutiques (Nkurunziza, Ntaganda, & Hitimana, 2008). Il est cultivé à Madagascar depuis l'année 1980 (Lantomalala, 2013). Actuellement la géraniculture est en phase d'expansion sur les Hautes Terres malagasy où les facteurs edaphoclimatiques sont propices et favorables au développement de cette plante.

Depuis 2012, dans le district d'Ambositra, elle couvre une surface de plus de 1000 ha. L'extraction consomme plus de 64 000 mètres cube de bois de chauffe et génère plus de 32 000 t des déchets issus des unités de la distillation. Une quantité négligeable de ces déchets est utilisée comme engrais biologique. Une autre quantité est traitée par incinération non contrôlée, alors que la grande partie de ces déchets est rejetée dans la nature sans traitement ni valorisation.

L'accumulation de ces déchets dans la nature présente plusieurs impacts négatifs. D'abord, elle constitue une perte économique car ces déchets sont des matières premières intermédiaires avec lesquelles on peut produire de l'énergie (électricité, engrais...). En outre, elle aggrave le danger environnemental. En effet, suites aux actions des bactéries les matières organiques émettent des gaz à effet de serre dans l'atmosphère comme le CO₂ et le méthane dès que les conditions sont favorables (Ramampihirika, 1997). De plus, elle engendre une nuisance de l'attractivité du site par la dégradation du paysage et l'odeur aux riverains.

C'est une menace à la santé publique suite à la contamination de l'eau, du sol et de l'air.

Un autre problème posé par cette filière génératrice de revenu, est la consommation de 64 mètres cube bois/ha/an qui entraîne une déforestation galopante de l'ordre de 100 ha de la forêt primaire d'Ankazomivady et autres forêts aux alentours (Tantelygasy, 2014). Cela a comme conséquence, une disparition des faunes et des flores endémiques de Madagascar, l'érosion des sols, une dépense supplémentaire de 640 millions d'Ariary pour les exploitants.

C'est dans ce contexte que le développement du concept de l'économie circulaire est considéré comme une des alternatives pour résoudre ces problèmes si épineux à travers la valorisation de ces déchets par biométhanisation dont les principaux objectifs sont de :

- Produire du biogaz à partir des résidus de Géranium afin de remplacer les bois ;
- Produire d'engrais biologique pour améliorer la plantation de Géranium ;
- Minimiser les dégâts environnementaux dus à la geraniculture.

MATERIEL ET METHODE

Sites de l'étude et choix de l'échantillon

Notre étude a été menée le long de la route RN7 du PK 20 au PK 60 au sud de la ville d'Ambositra, plus précisément dans les communes rurales d'Ivato Centre, Ambalamanakana, Ambatofitorahana, Fiadanana et Anjoma Nandihizana. Des champs de culture de Géranium couvrent plus de 1000 ha. L'extraction de l'huile essentielle de cette plante aromatique génère d'innombrables déchets qui ne sont ni traités ni valorisés sous d'autre forme. En plus, leur distillation gaspille 2m³ de bois/t de matières vertes. Ce qui entraîne une déforestation galopante, environ 100 ha de forêt primaire d'Ankazomivady (Tantelygasy, 2014). Le choix de l'échantillon réside dans la disponibilité de ces déchets dans le temps et dans l'espace.



Photo 1 : Présentation des zones d'études et déchets de Géranium à Antamponala

Evaluation des déchets disponibles

Pour obtenir des informations fiables autour de la filière Géranium, des enquêtes ont été réalisées dans les cinq communes où l'étude a été effectuée.

La méthode d'enquête est basée sur l'approche de MARP qui s'est divisée en trois étapes.

La première étape consiste à des entretiens avec les 12 grands exploitants de Géranium dans les zones d'exploitation à propos leurs surfaces cultivées, le

rendement, les bois consommés pour la distillation, les déchets et les problèmes autour de la filière Géranium.

La seconde étape consiste à des entretiens auprès des autorités locales afin de mieux assimiler les enjeux socio-économiques et environnementaux de la geraniculture dans les zones d'étude.

La dernière étape consistait à effectuer une observation directe dans les différentes zones d'extraction et de culture, et ce, dans le but de valider la cohérence des informations obtenues auprès des exploitants et des autorités locales.

Prélèvement et caractérisation des matières premières mises en fermentation

Substrat

Nous avons prélevé 20 kg de résidus de la distillation dans la décharge de l'usine. Après 6 heures ils ont été sortis de l'alambic à Antaponala, 40 Km au Sud de la ville d'Ambositra, au bord de la RN7. Les échantillons sont conservés dans un sachet plastique noir durant le voyage Antamponala-Toliara. Une fois arrivée au laboratoire du CREADE Toliara, les échantillons ont été broyés à l'aide d'un broyeur électrique puis conservés à 4°C avant leur utilisation. Ils ont été ensuite caractérisés, en vue de déterminer leur taux de matière sèche (MS), leur taux de matière organique (MO) et leur taux en matière minérale (MM).

Pour ce faire, une quantité M_0 connue du substrat a été introduite dans une étuve maintenue à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante M_1 . Après cela, on a calciné la masse M_1 à 600°C dans un four jusqu'à un poids constant M_2 pendant plus de 6 heures (Apha, 1998).

$$E\%MS = \frac{M_1}{M_0} * 100 \quad (1)$$

$$\%MO = \frac{M_1 - M_2}{M_1} * 100 \quad (2)$$

$$\%MM = \frac{M_2}{M_1} * 100 \quad (3)$$

Inoculum

Dans cette expérience, nous avons pris l'eau résiduaire de l'abattoir de Befanamy Toliara composé majoritairement de rumen de bovidé comme inoculum. Le rumen a été choisi en raison de sa caractéristique présumée riche en bactéries méthaniques qui se développent naturellement dans les voies intestinales des bovins (Jouany, 1994) (Ynagata, Kamagata, Kawaharasaki, Suzuki, Nakamura, & Minato, 2000). Il est activé en avant, en le laissant 6 jours dans un autre biodigesteur.

Dispositif expérimental

Nos expérimentations ont été conduites avec un digesteur de 20 litres de type discontinu. Il est conçu à partir de l'assemblage d'une boîte de peinture de 20 litres, sur son couvercle perforé fixe une jointe hydraulique formée par l'emboîtement de deux sceaux en plastique dépourvus de leurs bases inférieures. Comme gazomètre, un sceau coupé de sa partie supérieure, de surface de base de 444 cm² coulisse dans la jointe hydraulique. Son déplacement vertical est réferé par un tuyau pvc gradué de 0 à 28cm. Ce digesteur est muni d'une conduite de biogaz sur laquelle connecte un manomètre à liquide, port d'analyseur de biogaz, deux vannes d'arrêt, et un bruleur. Une vanne d'arrêt est montée sur boîte de peinture sans ouvrir le biodigesteur pour les prélèvements de liqueur mixte lors de la fermentation.

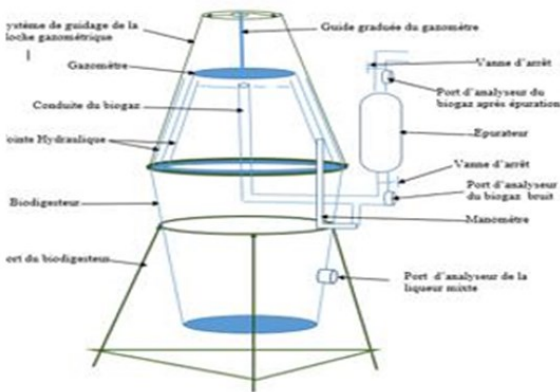


Photo 2 : Digesteur expérimental

Protocole expérimentale

Le mélange pour la fermentation est composé de 4285g du substrat frais, finement broyé et introduit dans le digesteur en même temps que 857g d'inoculum (20% en masse du substrat).

Nous avons ajouté 10 litres d'eau pour remplir le digesteur avant de fermer la cloche gazométrique et toutes les vannes d'arrêt. Ensuite, le joint hydraulique est rempli d'eau pour assurer l'étanchéité. Le dispositif est déposé à l'air libre à température ambiante.

Suivi de la fermentation

Mesure de pH et de la température

Ces deux paramètres sont mesurés tous les jours à la même heure à l'aide d'un multimètre de type by HANNA muni d'une électrode en verre de précision 0.01. La première étape avant l'utilisation est l'étalonnage de l'appareil à l'aide de deux

solutions tampons de pH=4 et pH=7. Après l'étalonnage, on immerge l'électrode dans la liqueur mixte et on lit directement les valeurs stables affichées.

Production journalière du biogaz

Elle est obtenue en multipliant la surface de la base du gazomètre par la hauteur prise par le mouvement vertical ascendant de la guide graduée.

Composition du biogaz, pouvoir calorifique et équivalence énergétique

Le biogaz est composé majoritairement du méthane et du gaz carbonique et quelques gaz traces (H₂S, H₂, ...). Tjalfe affirme que, pour substrat solide, ces gaz traces varient de 0-3% du biogaz (Tjalfe & Poulsen, 2003). L'absence de matériel sophistiqué nous a obligé à utiliser de matériel Orsat pour déterminer les composantes majoritaires du biogaz dans ce travail. Le principe de cette méthode est la capacité de la solution alcaline telle que KOH de 40% d'absorber le gaz carbonique à température ambiante pour donner de sel soluble K₂CO₃ (Tjalfe & Poulsen, 2003).

L'injection de volume connu du biogaz à l'aide de seringue avec agitation nous permet de connaître la teneur en gaz carbonique absorbée. Le restant non absorbé est considéré comme teneur en méthane, plus 3% des autre gaz traces (Abdel-Hadi, 2008).

Le pouvoir calorifique du biogaz produit est obtenu en multipliant la teneur en méthane du biogaz par 35,874 kJ/Nm³.

L'équivalence énergétique du biogaz par rapport à d'autres sources énergétiques est obtenue en divisant le pouvoir calorifique d'un mètre cube de biogaz par celui d'une unité de source d'énergie à comparer (Ramampihirika, 1997)

RESULTATS

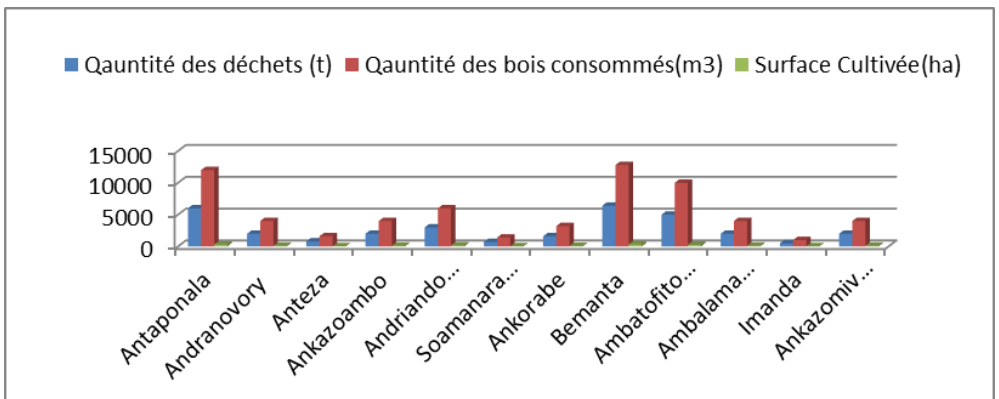


Figure 1 : Quantité des déchets Géranium disponibles et bois consommés par la distillation par an

Tableau 1 : Caractéristiques du substrat avant et après digestion anaérobie

Constituants	Humidité	Matières sèches	Matières organiques	Matières minérales
Avant fermentation	65%	35%	90%	10%
Après fermentation	80%	20%	54%	46%

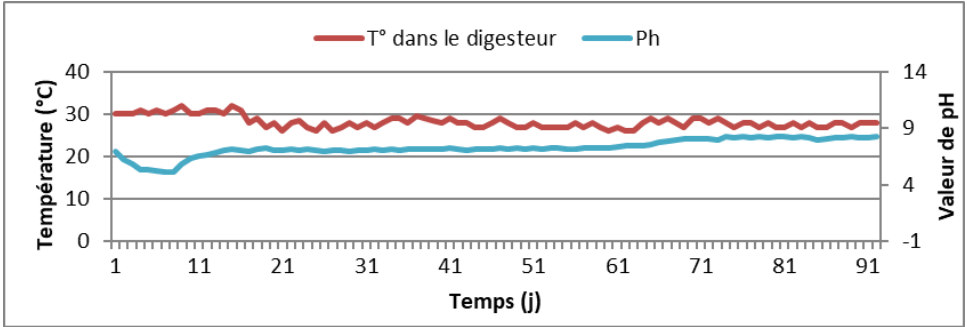


Figure 2 : Evolution de la température et du pH dans le digesteur

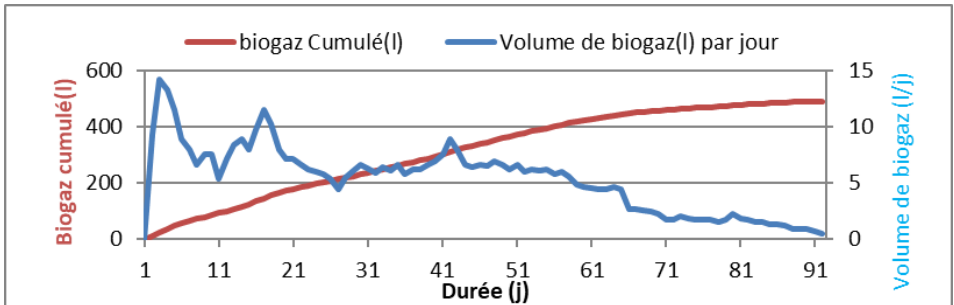


Figure 3 : Evolution de la production du biogaz

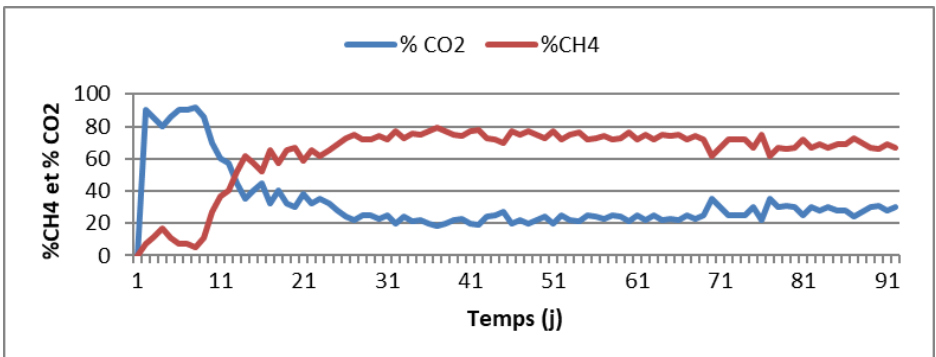


Figure 4 : Evolution des composantes majoritaires du biogaz

Tableau 2 : Pouvoir calorifique inferieur de quelques combustibles (Maes, 1986)

Combustibles	Pouvoir calorifique inferieur
Ethanol	21.4 10 ⁶ kJ/Nm ³
Essence	33.3 10 ⁶ kJ/Nm ³
Gasoil	34.5 10 ⁶ kJ/Nm ³
Charbon de bois	18 804 kJ/kg
Méthane	35 874 kJ/Nm ³

Tableau 3 : Equivalences énergétiques de la totalité des déchets disponibles

Déchets disponibles	Autres sources d'énergie	Equivalences
32 000 t	Ethanol	4 125 mètres cube
	Charbon de bois	4 650 t
	Gasoil	2 437 mètres cube
	Bois de chauffe	101 373 mètres cube

DISCUSSIONS

Déchets de Géranium disponibles et bois consommés pour l'extraction

D'après le figure1, on peut déduire que l'exploitation de Géranium d'Ambositra génère 20 t de déchets/ha/an et consomme 64 mètres de bois/ha/an pour la distillation d'huile essentielle. Ces déchets sont disponibles dans le temps et dans l'espace, ne présentant pas d'utilisations concurrentielles. Comme la combustion d'un mètre cube de bois libère environ 920 kg de gaz carbonique (Ariane, Ruedi, & Veronice, 2010), la distillation des huiles essentielles de Géranium d'Ambositra contribue à la restitution de 58 880 t de gaz carbonique par an dans l'atmosphère. Il est vrai que la combustion des bois présente un bilan de carbone nul, mais dans ce cas, la régénération de la plante ne suit pas le rythme d'exploitation. Comme conséquences, les rôles des forêts de stockage de gaz carbonique et de rafraichissement de l'air s'interrompent. L'utilisation de bois comme combustible pour l'extraction prive l'atmosphère de cet effet rafraichissant, créant ainsi un cercle vicieux qui accentue le changement climatique. Il est évident que si des mesures ne sont pas prises, certains services écosystémiques rendus par les forêts, essentiels à la vie risquent de disparaître.

Caractéristiques physico-chimiques des déchets de Géranium

La teneur en matière sèche de ces déchets est supérieure à 15%, ce qui les classe dans les substrats solides (S3d & Apesa, 2014). Ils présentent une teneur en eau plus importante. Ils sont, donc, très difficilement combustibles. On devra attendre beaucoup de temps pour qu'ils puissent être incinérés, sans compter la pollution causée par les fumées et la perte de 90% de matière première. Par rapport aux traitements des déchets, l'incinération et l'enfouissement entérique, la digestion anaérobie reste la technologie de traitement déchets la moins agressive vis-à-vis de l'environnement.

A la fin de la fermentation, en ouvrant la cloche gazométrique, l'inexistence l'odeur a été constatée. Cela montre que les matières organiques responsables de cette nuisance olfactive sont transformées en biogaz. D'après le tableau 1, l'on remarque que la teneur en matière organique du substrat passe de 90% à 54%. Il y a, ainsi, une perte de 36% qui sont transformés en biogaz. Par contre, il y a une augmentation de la matière minérale. Ceci s'explique la minéralisation du substrat après fermentation. En effet, l'azote change de forme pendant le processus : présent sous forme d'azote organique dans les substrats frais, il se retrouve sous forme d'ion ammonium NH_4^+ dans le digestat. L'ammonium est une forme d'azote, facilement assimilable par les plantes (Valbiom, 2013). Il y a, alors, une amélioration de la valeur fertilisante du digestat par rapport au substrat de départ.

La digestion anaérobie est un procédé permettant de produire, d'une part, une source d'énergie renouvelable et d'autre part, d'engrais organique en valorisant les déchets biodégradables.

Evolution de la température et du potentiel hydrogène

Le pH est un indicateur très important dans la stabilité et le bon déroulement de la digestion anaérobie. Au cours de cette expérience, toutes les valeurs de pH mesurées sont comprises entre 5.12 et 8.3, avec une valeur moyenne de 7.32, qui est incluse dans le seuil idéal par rapport à l'exigence des bactéries méthanogènes.

Les températures prises pendant 91 jours de la digestion anaérobie de ce substrat tournent autour de 26 à 32°C, avec une valeur moyenne de 28,18°C. Cela permet de dire que les populations bactéries actives pendant la fermentation sont des bactéries mésophiles survivant entre 20 à 45°C, avec un temps de digestion supérieur à 20 jours (Ramampihirika, 1997).

Production de biogaz

La fermentation à 91 jours a été choisie durant laquelle la production journalière en gaz est inférieure à 0.444 litre même si elle peut se poursuivre en petite quantité. Aucun blocage de production ni phase de latence n'a été observé. Dès le premier jour,

après la mise en digesteur, le gaz commence à se produire avec une forte teneur en gaz carbonique.

Ce phénomène peut s'expliquer par l'activation préalable des bactéries de rumen de bovidés utilisés. Le volume total du biogaz obtenu est de 502 litres pour 4,285 kg de résidu de Géranium, soit 335 litres/kg de Matière sèche ou 117 litres/kg de substrat brut. Il se répartit en fonction de temps : 51% sont formés en 31 jours avec 14.208 litres au maximum le 2^{ème} jour, 30% produits du 31 au 54^{ème} jour, les 18% restant produits lentement après le 55^{ème} jour jusqu'à la fin de la fermentation.

Les résultats obtenus ne sont pas loin de ce que les autres littératures ont trouvé sur le potentiel et les compositions du biogaz. Les résidus agricoles produisent en moyenne 450 litres par kilogramme de biomasse sèche (Goma & Yamego, 1981). Ici, celui du déchet de Géranium qui est de 335 litres/kg de matière sèche, étant inférieur parce que la partie matière organique est déjà extraite sous forme d'huile essentielle. Mais il est en conformité à celui que Nkurunziza Théo a trouvé, à savoir 331 litres (64.5% CH₄) par kilogramme de Géranium sèche pendant 112 jours de fermentation (Nkurunziza, Ntaganda, & Hitimana, 2008). En se basant sur les déchets disponibles, l'on peut produire, par an, 3 750 116 mètres de biogaz moyen à partir de ces 32 000 t de résidus de Géranium disponibles.

Evolution de la composition du biogaz

Durant les 91 jours de temps de rétention, la teneur en CO₂ varie entre 92% et 18% et celle de méthane entre 5% et 79% avec une valeur moyenne de 34,04% pour le CO₂ et 63,26% pour celle du méthane. C'est un biogaz moyen dont le pouvoir calorifique est de l'ordre de 2 269 kJ/Nm³. Pour cette fermentation, la flamme de biogaz commence à être inflammable le 9^{ème} jour, et ce, après la mise en digestion mais elle ne persiste pas. Elle devient seulement stable à partir du 10^{ème} jour où la teneur en CO₂ est égale à 40%.

D'après la Figure 6, au début de la fermentation, il y a une forte augmentation de la teneur de CO₂ (1^{er} au 7^{ème} jour) et baisse de pH de l'ordre de 5,12 qui caractérise la phase hydrolyse et acidogenèse. Cette augmentation est due à l'accumulation de l'acide gras volatil.

Dès le 8^{ème} jusqu'à la fin, il y a une lente diminution de la teneur en CO₂ et une augmentation de celle du méthane. Ce phénomène permet de déclencher la phase acétogenèse et méthanogenèse.

Equivalences énergétiques des déchets disponibles

Sachant qu'un mètre cube de biogaz suffit pour le besoin d'un foyer de 8 personnes pour la cuisson de trois repas par jour s'ils utilisent ensemble un brûleur. Et

environ 37 mètres cube de biogaz peut remplacer un mètre cube de bois de chauffe (Ramampihirika, 1997).

D'après le Tableau 3, nous pouvons déduire qu'une production annuelle des 3 750 116 mètres cube de biogaz est envisagée à partir de 32 000 t des résidus disponibles. Avec lesquels l'on pourrait remplacer les 64 000 mètres cube de bois consommés par 2 368 000 mètres cube du biogaz.

Les restes 1 382 116 mètres cubes du biogaz suffisent pour les besoins énergétiques annuels des 3 786 foyers de 8 personnes si l'on considère que l'utilisation de ce combustible est destinée uniquement pour la cuisson de repas (Ramampihirika, 1997). L'investissement pour la construction des digesteurs et leurs équipements est envisageable à la place des sommes dépensées à l'achat de bois de chauffe. On peut donc cultiver le Géranium sans toucher la forêt si on valorise leur déchet par digestion anaérobie.

La biométhanisation produit deux types de produits conduisant à éviter des émissions de gaz à effet de serre (Ademe, 2016) :

- du méthane, valorisé en chaleur ou électricité, 44 kg $\text{eq.CO}_2/\text{t}$ évités ;
- du compost, valorisé comme amendement en substitut des engrais de synthèse, la production moyenne est de 650 kg par tonne de déchets entrant en méthanisation 33 kg $\text{eq.CO}_2/\text{t}$. Les émissions évitées pour la biométhanisation est alors 77kg $\text{eq.CO}_2/\text{t}$ de déchets ;
- En se basant sur 32 000 t de déchets de Géraniums disponibles annuellement, on pourra envisager de produire 20 800 t de compost et éviter 2 464 t eq.CO_2 d'émissions par an.

La valorisation par biométhanisation de ces déchets permet de déployer une nouvelle économie circulaire, et non linéaire, fondé sur le principe de « refermer le cycle de vie » des produits, des services, des déchets. C'est-à dire, elle permet de produire des biens et des services tout en limitant la consommation et le gaspillage en matière première.

CONCLUSION

L'objectif général du présent travail est la recherche d'alternatives durables face à l'accumulation des déchets et la déforestation galopante causée par le développement de la culture de Géranium. En effet, pour y parvenir, un essai en laboratoire de 4285g mélangé avec 857g d'inoculum pendant 91 jours donne 502 litres de biogaz moyen de pouvoir calorifique 2 269kJ/Nm³. L'extrapolation de ces résultats à la valorisation de 32 000 t de déchets disponibles peut remplacer les 64 000 mètres cube de bois consommés pour la distillation et les besoins énergétiques annuels en

bois des 3 786 familles de 8 personnes. Une production de 20 800 t de compost est envisagée avec une émission évitée estimée à 2 464 t éq.CO₂.

La valorisation des déchets de Géranium d'Ambositra par biométhanisation dégagent les quelques axes stratégiques suivantes :

- Arrêt de la déforestation ;
- Traitement et valorisation des matières organiques biodégradables ;
- Exploitation massive des énergies renouvelables et pauvres en carbone (méthane) ;
- Substitution d'engrais de synthèse par de l'engrais organique produit localement.

Ces axes constituent des perspectives intéressantes, car ils répondent aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures à répondre aux leurs. Le « développement durable » est à ce prix.

Remerciements

Nous exprimons nos remerciements et notre gratitude à la Cellule Régionale des Energies Alternatives pour le Développement et Environnement (CREADE), au Laboratoire de Chimie des Substances Naturelles (LCSN) et à Monsieur RAMAMPIHERIKA Kotonirina Daniel, Directeur du CREADE, pour leur soutien et leur constante disponibilité.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Abdel-Hadi, M. A. (2008, July). A simple apparatus for biogas quality determination. *Agricultural Engineering*, 25(3), pp 1055-1066.
- 2) Ademe. (2016, Mars). Bilan Gaz à Effet de Serre. Consulté le 02 Novembre 2020, https://bilanges.ademe.fr/UPLOAD_DOC_FR/index.htm?emissions_evitees.html
- 3) Apha. (1998). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, and Water Environment Federation, 20th ed.
- 4) Ariane, W., Ruedi, T., & Veronice, S. (2010, Juillet 7). L'utilisation du bois est plus efficace que les puits de carbone. Pour une protection optimale du climat grâce aux forêt, pp. 27-30.
- 5) Consort manual. (2012). Handleiding, mode d'emploi, Anleitung. pp. 18-19.
- 6) Goma, G., & Yamego, T. R. (1981). Production de méthane et d'éthanol par voie biologique à partir de la biomasse : potentialités et concepts technologiques. Actes du deuxième colloque international de technologie, Lomé (Togo) du 14 au 20 janvier 1981, (pp. pp121-121).

- 7) Jouany, J. P. (1994). Les fermentations dans le rumen et leur optimisation. INRA Productions Animales, Vol.7(n°3), pp 207-225.
- 8) Kajangwe, V., Kamanzi, J. B., & Mukarusine, E. (2002). Pelagonium graveolens (Geranium rasat), essai de culture et de production d'huile essentielle. Bulletin de l'institut de Recherche Scientifique et Technologique,IRST(2), pp. pp26-37.
- 9) Lantomalala, F. (2013). Caractérisation des exploitations agricoles familiales accompagnées par cap malagasy fert du point de vue production rizicole : cas de la Région Amoron'i Mania.
- 10) Laura, A., Nicolas, D., Ludovic, V., André Pausse, Thierry Ribeiro, & Bassard, D. (2014). A simple and rapid one-time method to evaluate the non-acidic gas content from bioprocesses. (D. Weuster-Botz, Éd.) Bioprocess and Biosystems Engineering, Vol.37(2), pp337-341.
- 11) Maes, M. (1986). Déchets industriels : mode d'emploi.
- 12) Nkurunziza, T., Ntaganda, J., & Hitimana, N. (2008). Laboratory scale biogas production from geranium distilled leaves. 3rd International Conference on Appropriate Technology, (pp. 18-27). Kigali, Rwanda.
- 13) Ramampihirika, K. D. (1997). Biométhanisation appliquée à la valorisation agroénergétique et chimique des déchets : développement lié à la protection de l'environnement cotier et marin. Toliara.
- 14) Record. (2014). Les filières de valorisation du CO₂ : Etat de l'art et avis d'expert. Cas des activités de traitement et valorisation des déchets.
- 15) S3d, & Apesa. (2014). Guide pédagogique : La biologie des digesteurs à destination des exploitants d'unité de méthanisation. (ADEME, Éd.)
- 16) Sawyer C.N. and McCarty Perry, L. (1978). Chemistry for environmental engineering. (McGraw, Éd.) -Hill Publishing Company, 3 rd edition.
- 17) Tantelygasy. (2014). Agence de presse Océan Indien. Consulté le Octobre 12, 2018, sur Il faut sauver la forêt d'Ankazomivady : <https://agencepresse-oi.com/il-faut-sauver-la-foret-dankazomivady>
- 18) Tjalfe, G., & Poulsen. (2003). Solid waste management. Chapter 5 Anaerobic digestion, Aalborg University. Denmark.
- 19) Valbiom. (2013). Estimation de la valeur fertilisante de digestats issu de la biométhanisation. (UCL, Éd.)
- 20) Ynagata, K., Kamagata, Y., Kawaharasaki, M., Suzuki, T., Nakamura, Y., & Minato, H. (2000). Phylogenetic analysis of methanogens in sheep rumen ecosystem and detection of Methanomicrobium mobile by Fluorescence in Situ Hybridization. Biosc. Biotechnol. Biochem, Vol.64, 1737-17412.

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



PROPRIETES NUTRACEUTIQUES DES FINES HERBES ET LEURS INTERETS NUTRITIONNELS FACE AU COVID-19

par

RAFALIMANANTSOA Jules⁽¹⁾, RASOAZANANY Elise O.⁽²⁾,
RANDRIAMANANTENA Andrin'iranto⁽¹⁾, RATIARIMANANJATOVO Narindra⁽¹⁾,
RAKOTONDRAJAO Mampananirina F.⁽¹⁾, ROBIJAONA
RAHELIVOLOLONIAINA Baholy⁽³⁾

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

(2) Enseignant chercheur du Département de Fluorescence X et Environnement, Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Université d'Antananarivo, Madagascar

(3) Professeur Titulaire, Chimie Environnement, Ecole Doctorale GPSIAA, Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

A Madagascar, 41,6 % des enfants de moins de 5 ans sont touchés par la malnutrition chronique avec un retard de croissance. Cette situation est exacerbée par les éventuels problèmes sanitaires qui préoccupent plusieurs pays. Au regard de l'expérience difficile de la pandémie de la Covid-19, tout le monde est préoccupé par les conséquences inhérentes à la pandémie dans le domaine de la sécurité alimentaire et nutritionnelle. La plupart des personnes utilisent des produits naturels pour renforcer leurs auto-défenses immunitaires. C'est à cette préoccupation principale que la présente recherche tient à apporter des solutions purement naturelles à base de fines herbes ou d'herbes aromatiques qui regorgent d'éléments nutritifs inestimables. Madagascar dispose d'un énorme potentiel agricole permettant de résoudre les problèmes d'insécurité nutritionnelle et d'inverser les tendances en matière de pauvreté vers l'émergence et le développement holistique de Madagascar post-Covid 19. La valorisation des ressources alimentaires locales, disponibles, accessibles et convenables pour toutes les catégories d'âges constitue un levier pour pallier les carences nutritionnelles actuelles. Cette étude a démontré l'effet bénéfique des éléments nutritifs dans les plantes aromatiques pour renforcer l'immunité et pallier les carences nutritionnelles des catégories de gens vulnérables de la malnutrition. Des analyses approfondies par spectrométrie d'absorption atomique ont été réalisées afin d'identifier les éléments nutritifs disponibles dans les fines herbes : Aneth, coriandre, gombo, menthe, romarin, basilic, céleri et persil.

Mots clés : Aromatiques, Covid-19, Immunité, Micronutriment, Malnutrition chronique, Nutrition, Fines herbes, Propriétés nutraceutiques, Eléments nutritifs

ABSTRACT

In Madagascar, 41.6% of children under 5 years old are affected by chronic malnutrition with stunted growth. This situation is exacerbated by potential health problems that are concerned in several countries. In view of the difficult experience with the Cov-19 pandemic, everyone is concerned about the inherent consequences of the pandemic in the area of food security and nutrition. Most people use natural products to strengthen immune self-defense. That why, the present research aims to provide purely natural solutions based on herbs or aromatic herbs that are full of invaluable nutrients. Madagascar has a huge agricultural potential to solve the problems of nutritional insecurity and to reverse poverty trends towards the emergence and holistic development of post-Covid 19 in Madagascar. The valorization of local food resources that are available, accessible and suitable for all age groups constitute a lever to overcome the current nutritional deficiencies.

This study demonstrated the beneficial effect of nutrient elements in aromatic plants to strengthen immunity and alleviate the nutritional deficiencies of the categories of malnutrition -vulnerable people. In -depth analyzes by atomic absorption spectrometry were performed to identify the nutrient elements available in the herb fins : Aneth, coriander, gombo, mint, rosemary, basil, celery and parsley.

Keywords : Aromatics, Covid-19, Immunity, Chronic Malnutrition, Micronutrient, Nutrition, Herb fins, Nutrient elements

INTRODUCTION

Madagascar est un pays à vocation agricole avec un taux de 80% dans le secteur primaire. Malgré cette potentialité, le pays se place au troisième mauvais rang en termes de disponibilités alimentaires. 48% des ménages malgaches sont vulnérables à l'insécurité alimentaire (ONN & WFP, 2016). D'autre part, la situation de malnutrition chronique est géographiquement répartie de manière inégale. Les plus forts taux de malnutrition chronique se localisent dans les régions du centre, là où la production agricole est la plus abondante, ce qui démontre que la disponibilité alimentaire n'est pas la seule condition garantissant un statut nutritionnel adéquat pour la population. D'après les résultats de l'enquête MICS 2018, 42 % des enfants de moins de 5 ans sont touchés par la malnutrition chronique. Cette situation est exacerbée par les éventuels problèmes sanitaires qui préoccupent plusieurs pays. Actuellement, la pandémie qui a un impact sur les systèmes alimentaires mondiaux, perturbe les chaînes

de valeurs agricoles régionales et provoque des risques pour la sécurité alimentaire des ménages. Des mesures sanitaires strictes et des régimes alimentaires adéquats ont été adoptés pour renforcer le système immunitaire contre la Covid-19. La plupart des ménages ont tendance à s'égarer dans des régimes draconiens, des attitudes contraignantes, des ordonnances sans fin et une automédication irrationnelle alors que les fines herbes disponibles localement offrent des vertus inestimables permettant de pallier les carences nutritionnelles et contribuer au renforcement du système immunitaire face à la pandémie de la covid-19. Leurs propriétés anti-oxydantes en font des ingrédients à ne pas négliger. Savoir varier les modes de consommation tout en gardant à l'esprit que l'essentiel avec les herbes culinaires, c'est surtout d'en manger régulièrement. Les richesses cachées dans les fines herbes incitent l'esprit scientifique à mettre en exergue des formules diverses composées par six types de fines herbes (aneth, coriandre, gingembre, menthe, romarin, et persil.). Les constituants chimiques présents dans les mélanges sont très diversifiés et se retrouvent en concentrations variables selon les composants. L'analyse quantitative des échantillons des mélanges de fines herbes a été effectuée au moyen d'un spectromètre de fluorescence X à énergie dispersive (EDXRF). Ainsi, la proposition de formules à base des fines herbes comme exhausteur de goût issu des ressources alimentaires locales, pourrait constituer un élément de résolution aux problèmes nutritionnels touchant les catégories à risque constituées principalement par les nourrissons, les enfants de moins de 5 ans, les femmes enceintes et allaitantes, les adolescent(e)s et les personnes âgées.

MATERIELS ET METHODES

Matériels d'étude

Dans la réalisation de la recherche, les matériels utilisés concernent les fines herbes à savoir ; la coriandre, le basilic, le romarin, le thym, la menthe, le persil, le céleri, et l'aneth. Ils se dispersent dans différentes familles. Ces familles sont constituées par celles des LAMIACEAE et l'APIACEAE.

Présentation de La famille LAMIACEAE

La famille LAMIACEAE est caractérisée par son origine méditerranéenne. Les LAMIACEAE appartiennent à l'ordre Lamiales. Les espèces sont adaptées au climat chaud et sec. Il existe 6970 espèces réparties en 240 genres. La famille LAMIACEAE est caractérisée par une tige quadrangulaire, et feuilles opposées sans stipules. D'après la figure 1 ci-dessous, les feuilles sont disposées de façons opposées décussées (Reynaud J. 2010). Le fruit appelé tetrakène épouse un calice persistant. Les espèces appartenant à la famille des LAMIACEAE sont très riches en essence renfermant des composés phénoliques et surtout terpéniques. Elles sont connues pour leur propriété diurétique, antisyphilitique, anti-diarrhéique, cicatrisante, antiseptiques. Elles soulagent les problèmes intestinaux et la flatulence. Cette famille a son grand intérêt

dans la phytothérapie, pharmacopée traditionnelle africaine et dans l’art culinaire. (Reynaud J., 2010).



Figure 1 : Disposition des feuilles de la famille LAMIACEAE

Présentation de La famille APIACEAE

La famille APIACEAE (ex OMBELLIFERE) est une famille végétale homogène. L’APIACEAE se trouve parmi l’ordre Apiale. Elle possède 3 000 espèces végétales. Les espèces de la famille APIACEAE sont caractérisées par une tige creuse et cannelée. Leurs feuilles sont alternes, découpées ayant une gaine développée et sans stipule. Elles sont souvent composées, pennées, palmées, ou ternées (Figure 2). En général, les fleurs peuvent être blanches, jaunâtres, verdâtres ou rosées (Reynaud J. 2010).

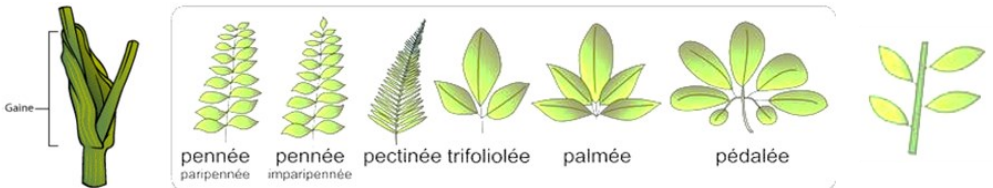


Figure 2 : Caractéristiques des feuilles de la famille APIACEAE

L’ombelle peut être simple ou composée. L’appareil végétatif souterrain peut être une racine pivotante, rhizome ou tubercule. Le fruit est souvent diakène. L’APIACEAE est l’ensemble des plantes à usage condimentaires. Cette famille regroupe les plantes herbacées annuelles et bisannuelles. Elle est caractérisée par sa propriété antispasmodique, sa capacité de stimuler les sécrétions des glandes salivaires, les sécrétions pancréatiques, intestinales, gastriques et l’excrétion biliaire. Certaines espèces de l’apiacée ont une propriété photo sensibilisante (Reynaud J., 2010), (Zeghad N., 2012).

Classification des herbes culinaires

En général, les herbes aromatiques appartiennent à la classe des dicotylédones. Cette classe regroupe les plantes caractérisées par deux cotylédons, la forme générale des feuilles et de la racine. La feuille des plantes dicotylédones est constituée d’un

pétiole, d'un limbe et des nervures réticulées. Le système racinaire est généralement pivotant. Les plantes dicotylédones sont des plantes angiospermes (Reynaud J. 2010). Le Tableau 1 représente la classification des plantes regroupées dans une grande famille naturelle constituée principalement de plantes herbacées et de sous arbrisseaux

Tableau 1 : Classification des plantes herbacées

Noms scientifiques et vernaculaires	Famille	Classe	Genre	Espèce
<i>Anethum graveolens</i> (ou <i>Peucedanum graveolens</i>) Aneth	APIACEAE	Dicotylédone	<i>Anethum</i>	<i>Graveolens</i>
<i>Apium graveolens</i> (Céleri)	APIACEAE	Dicotylédone	<i>Apium</i>	<i>Graveolens</i>
<i>Coriandrum sativum</i> L. (Coriandre)	APIACEAE	Dicotylédone	<i>Coriandrum</i>	<i>Sativum</i>
<i>Mentha piperita</i> (Menthe poivrée)	LAMIACEAE	Dicotylédone	<i>Mentha</i>	<i>Piperita</i>
<i>Ocimum basilicum</i> (Basilic)	LAMIACEAE	Dicotylédone	<i>Ocimum</i>	<i>Basilicum</i>
<i>Petroselinum crispum</i> (Persil)	APIACEAE	Dicotylédone	<i>Petroselinum</i>	<i>Crispum</i>
<i>Rosmarinus officinalis</i> L. (Romarin)	LAMIACEAE	Dicotylédone	<i>Rosmarinus</i>	<i>Officinalis</i>
<i>Thymus vulgaris</i> L. (Thym)	LAMIACEAE	Dicotylédone	<i>Thymus</i>	<i>Vulgaris</i>

Sources : Morris B. 2003 ; Naouel O, 2015

Identification du principe actif

Par définition, les photochimies se réfèrent aux premiers ou seconds métabolites. Les premiers concernent les macronutriments ; les seconds touchent les dérivés des premiers et possèdent des rôles écologiques (Morris B., 2003), (Paul I, Edith Y, Astrid L.M., 2001)

Ensuite, les nutraceutiques sont des substances constituant un aliment ou une part d'aliment et peuvent procurer des effets médicaux, thérapeutiques pour prévenir ou traiter une maladie. Les éléments nutraceutiques contenus dans les fines herbes correspondent aux éléments photochimiques : protéines, glucides, antioxydants, vitamines, minéraux (Espitalier J., 2010). Ainsi, chaque élément constituant des fines herbes, présenté précédemment, peut être valorisé en nutraceutique.

Méthodes

Pour parvenir à l'obtention des formules et des éléments physico-chimiques des mélanges, différentes méthodes concourantes ont été retenues. Dans la réalisation de la recherche, les fines herbes telles qu'aneth, coriandre, gombo, menthe, romarin, et persil ont été les matériels utilisés. D'après la composition chimique et photochimique de ces plantes, un large spectre de nutraceutique et éléments bio-fonctionnels étaient valorisés. Les matières utilisées sont de la catégorie tout-venant d'un jardin potager dans la ville d'Antananarivo. Quatre formules codées ont été élaborées afin d'identifier le mélange le plus intéressant en teneurs en nutriments indispensables pour renforcer l'immunité et pallier les carences nutritionnelles des catégories vulnérables à la malnutrition. La détermination des éléments nutritionnels par la méthode spectromètre de fluorescence X à énergie dispersive (EDXRF) a abouti à la détection des éléments photochimiques.

Méthode physique

Environ 100 mg de l'échantillon ont été réduits en poudre (Figure 3) à l'aide d'un mortier et d'un pilon en agate, la poudre ainsi obtenue a été tamisée en vue d'obtenir des grains de taille inférieure à 100µm.

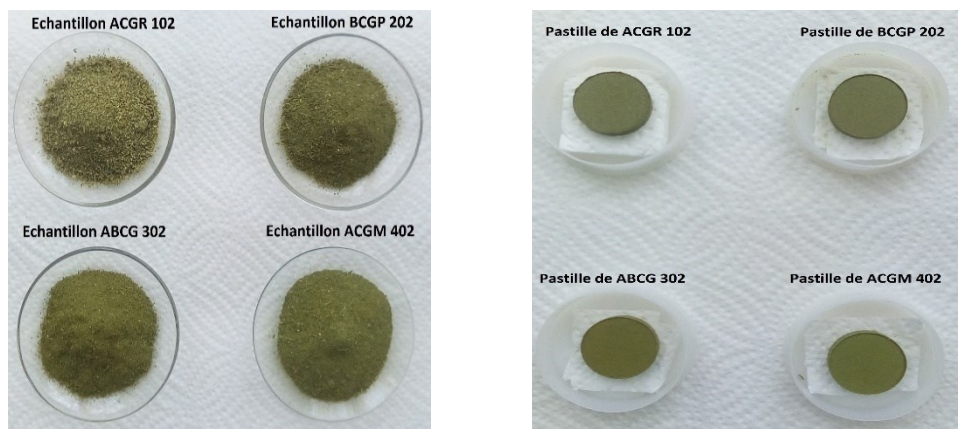


Figure 3 : Echantillons de mélange des fines herbes

La dernière étape a consisté à transformer la fine poudre en pastille (3 mm d'épaisseur et 25 mm de diamètre) à l'aide d'une presse SPECAC sous une pression de 5 tonnes et un temps de séjour de 1 min. Aucun liant n'a été appliqué. Les pastilles, prêtes à être mesurées, ont été stockées dans des boîtes circulaires en PTFE bien codifiées.

Méthodes d'analyses

Le Département Technique et Environnemental de rayon-X Fluorescence de l'Institut National des Sciences et des Techniques Nucléaires-Madagascar (INSTN) possède un spectromètre fluorescence rayon X de marque SPECTRO X-Lab Pro pour l'analyse des échantillons.

L'analyse quantitative des échantillons a été effectuée au moyen d'un spectromètre de fluorescence X à énergie dispersive (EDXRF) muni d'un tube à rayons X à anode en palladium (Pd) produisant un faisceau primaire de 50 watts et d'un changeur de cible comprenant un polariseur Bragg et des sources secondaires en molybdène et en cobalt (Leyden D. E., 1990). Les réglages du courant de tube et de la haute tension dépendent des cibles. Les paramètres de mesure sont donnés dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Conditions de mesures

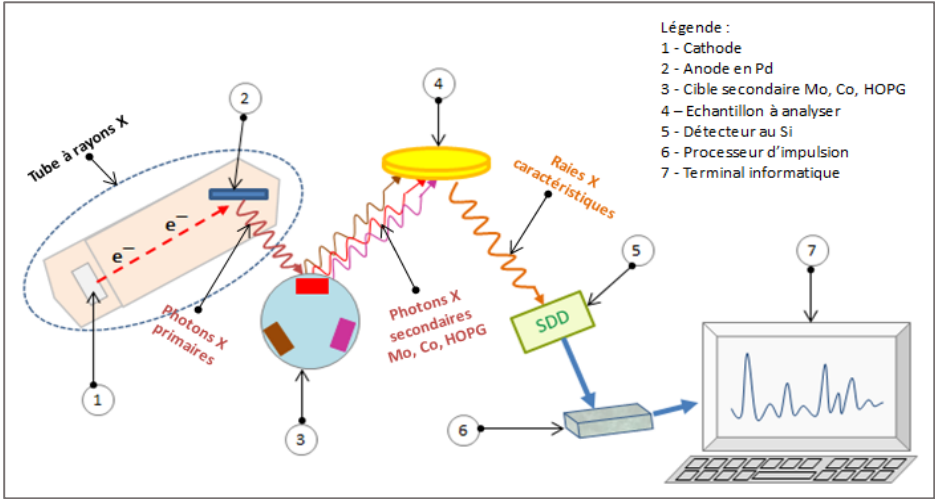
Excitation	Tension du tube	Eléments	Temps de mesure (sec)
Molybdenum (Mo)	40kV/0,88mA	K, Ca, Ti, Cr, Mn, Fe, Ni, Cu, Zn, As, Pb	300
Bragg crystal (HOPG)	17,5kV/2mA	Na, Mg, Si, P, S, K, Ca	300
Cobalt (Co)	35kV/1mA	K, Ca, Ti, Cr, Mn	300

Source : INSTN

Un détecteur de dérive au silicium (Silicon Drift Detector, SDD) a été utilisé pour collecter le rayonnement de fluorescence issu de l'échantillon. La résolution spectrale du SDD est ≤ 130 eV pour la raie du Mn-K α . Les mesures ont été effectuées en mode sous vide et la durée des analyses d'un échantillon était de 900 sec. L'analyse a été contrôlée par un système d'acquisition de données sur ordinateur à l'aide du logiciel spécialisé SPECTRO X-Lab Pro.

Les photons X provenant du tube ont été focalisés à l'aide du collimateur avant qu'ils ne frappent à tour de rôle les 3 cibles secondaires en Mo, Co et cristal graphites contenus dans le changeur de cible. A ce stade, les atomes excités de la cible émettent des rayons X appelés rayonnements secondaires qui tombent ensuite sur la surface polie et plane de l'échantillon à analyser (pastille). Sous l'effet de l'irradiation, l'échantillon va émettre par la suite des raies caractéristiques correspondant aux éléments qui y sont présents (Figure 4). Ces raies caractéristiques ont été, à leur tour, recueillies par le détecteur où elles ont été traitées de façon électronique. Les impulsions sortant du détecteur ont été transformées en signaux numériques et traitées sur le terminal informatique. Dans un spectre de fluorescence X, le flux de raies

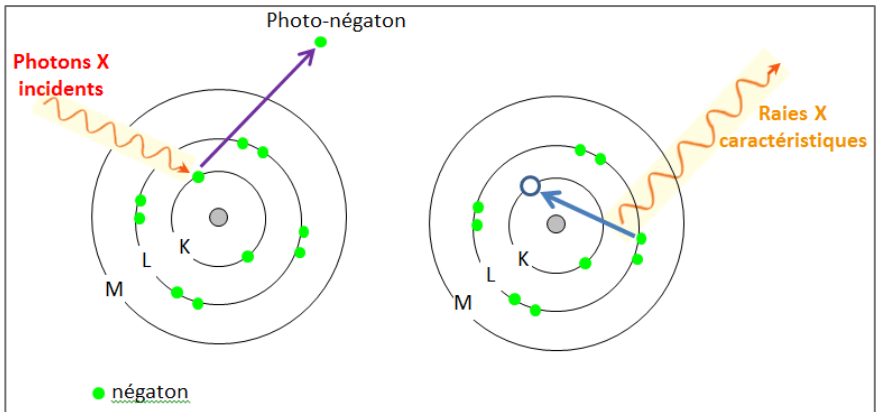
caractéristiques provoquant une accumulation du nombre de coups dans un canal donné a formé un pic. Le numéro de canal du pic donne la valeur de l'énergie caractéristique de l'élément sujet à l'excitation. Pour l'analyse quantitative, le nombre de coups sous le pic considéré a été en relation avec l'intensité de la raie caractéristique c'est-à-dire à la concentration de l'élément considéré (Leyden D. E., 1990).



Source : INSTN

Figure 4 : Schéma simplifié du principe d'analyses par Fluorescence X

D'après la Figure 4, l'émission des raies X caractéristiques provient de l'excitation du négaton sur la couche interne de l'atome qui provoque ainsi la formation de trou. Pour que l'atome revienne à son état d'équilibre, un négaton de la couche supérieure vient remplir le trou. C'est au moment de ce réarrangement interne qu'a lieu l'émission des raies X caractéristiques (Figure 5). Si c'est un négaton de la couche K qui est excité, c'est le rayonnement K ($K\alpha$ et $K\beta$) qui est obtenu, si c'est un négaton de la couche L, c'est le rayonnement L ($L\alpha$, $L\beta$, $L\gamma$,...).



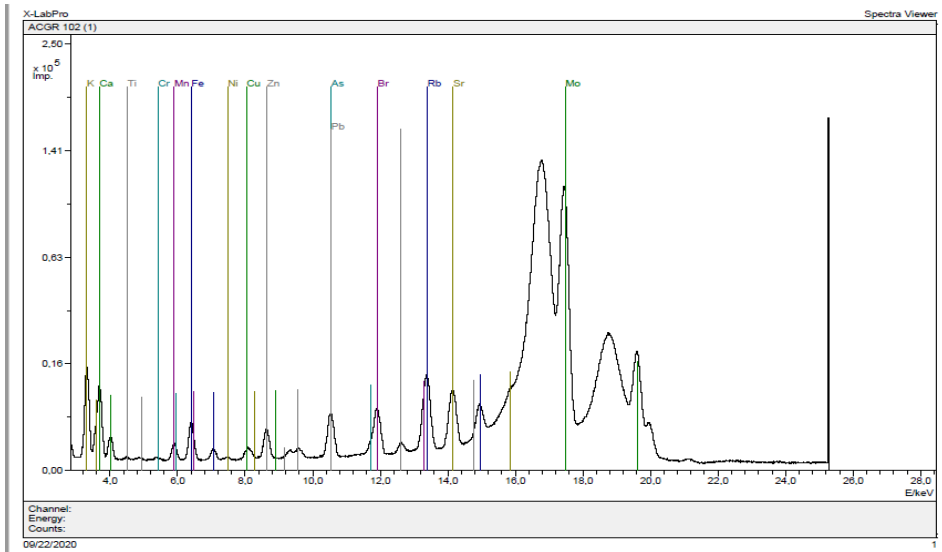
Source : INSTN

Figure 5 : Emission de raies X caractéristiques au sein de la matière

RESULTATS

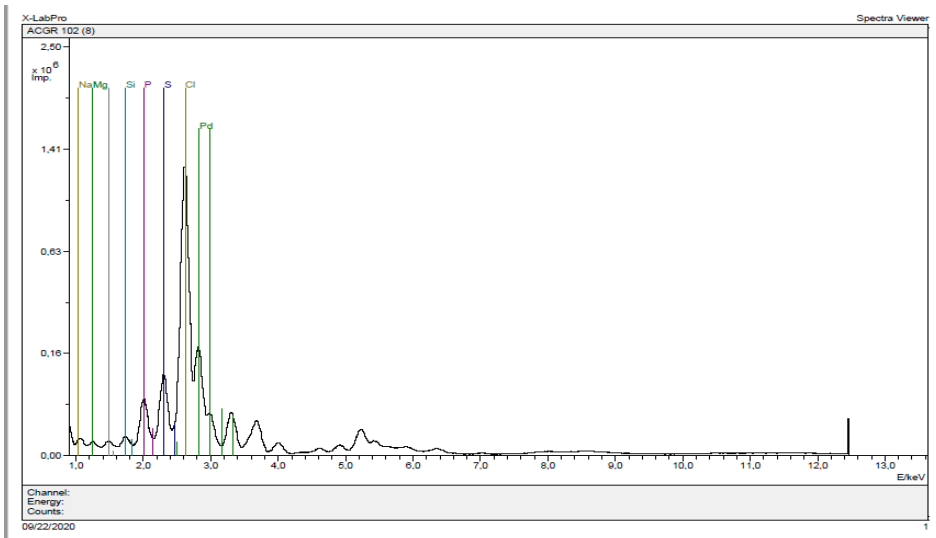
Résultats sur la teneur en éléments minéraux des mélanges

Les résultats des analyses chimiques apparaissent plus loin dans les Tableaux 3 et 4. Quatre échantillons codés ont été analysés au début des expériences afin de déterminer les propriétés physicochimiques des mélanges sous forme codé (**ABCG 302, ACGM 402, ACGR 102, BCGP 202**). Les résultats d'analyses minérales à partir d'une méthode spectromètre de fluorescence X à énergie dispersive (Figure 6, 7) ont permis d'identifier la présence des micronutriments indispensables au bien-être de l'organisme. Deux mélanges ont été retenus en fonction de la prédominance des éléments nutritifs dans les produits, il s'agit de BCGP 202 et ACGR 102.



Source : INSTN

Figure 6 : Résultats obtenus du mélange ACGR 102 par la méthode d'excitation par Molybdène (Mo)



Source : INSTN

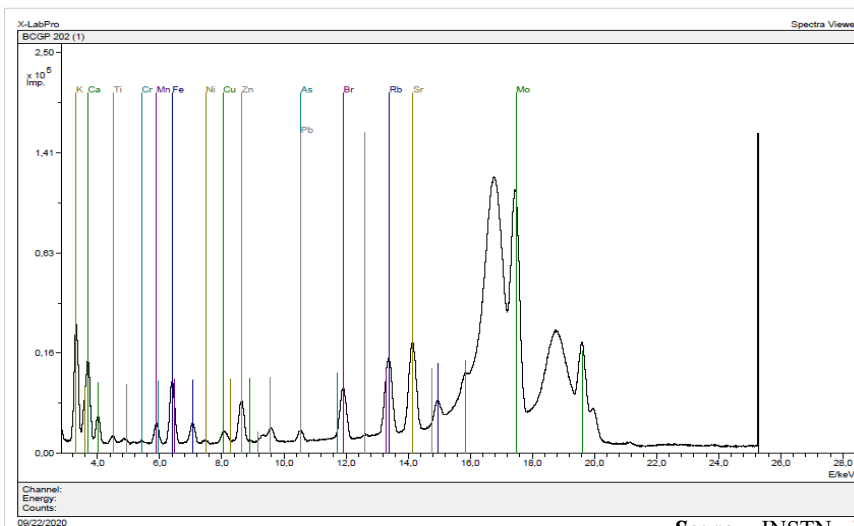
Figure 7 : Résultats obtenus du mélange ACGR 102 par la méthode d'excitation par HOPG

Tableau 3 : Echantillon ACGR 102

Eléments	Unité	Concentration
Sodium (Na)	%	1,30 ± 0,13
Magnésium (Mg)	mg/kg	2248,00 ± 202,32
Aluminium (Al)	mg/kg	791,00 ± 71,19
Silicium (Si)	mg/kg	1054,00 ± 94,86
Phosphore (P)	mg/kg	4852,00 ± 436,68
Soufre (S)	mg/kg	5623,00 ± 562,30
Chlore (Cl)	%	3,82 ± 0,38
Potassium (K)	%	2,91 ± 0,29
Calcium (Ca)	%	1,45 ± 0,13
Titane (Ti)	mg/kg	19,30 ± 1,74
Chrome (Cr)	mg/kg	3,40 ± 0,27
Manganèse (Mn)	mg/kg	145,70 ± 11,66
Fer (Fe)	mg/kg	240,50 ± 19,24
Cobalt (Co)	mg/kg	< 3,00
Nickel (Ni)	mg/kg	2,70 ± 0,22
Cuivre (Cu)	mg/kg	9,10 ± 0,73
Zinc (Zn)	mg/kg	58,20 ± 5,24
Arsenic (As)	mg/kg	47,80 ± 3,82
Sélénium (Se)	mg/kg	< 0,50

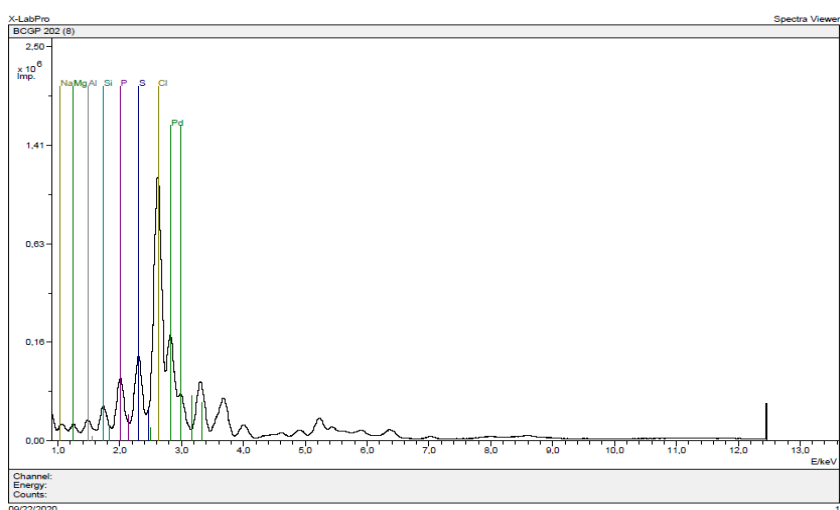
Brome (Br)	mg/kg	55,90 ± 4,47
Rubidium (Rb)	mg/kg	80,90 ± 6,47
Strontium (Sr)	mg/kg	55,40 ± 4,99
Plomb (Pb)	mg/kg	15,10 ± 1, 211,21
Mercure (Hg)	g/kg	26,18 ± 0,76

Source : INSTN



Source : INSTN

Figure 8 : Résultats obtenus du mélange BCGP 202 par la méthode d'excitation par Molybdenum (Mo)



Source : INSTN

Figure 9 : Résultats obtenus du mélange BCGP 202 par la méthode d'excitation par HOPG

Tableau 4 : Echantillon BCGP 202

Eléments	Unité	Concentration
Sodium (Na)	%	1,00 ± 0,10
Magnésium (Mg)	mg/kg	3834,00 ± 345,06
Aluminium (Al)	mg/kg	2289,00 ± 206,01
Silicium (Si)	mg/kg	3439,00 ± 309,51
Phosphore (P)	mg/kg	5131,00 ± 513,10
Soufre (S)	mg/kg	5338,00 ± 533,80
Chlore (Cl)	%	2,71 ± 0,27
Potassium (K)	%	4,67 ± 0,47
Calcium (Ca)	%	2,05 ± 0,18
Titane (Ti)	mg/kg	121,80 ± 10,96
Chrome (Cr)	mg/kg	3,20 ± 0,26
Manganèse (Mn)	mg/kg	226,10 ± 20,35
Fer (Fe)	mg/kg	789,00 ± 71,01
Cobalt (Co)	mg/kg	< 3,00
Nickel (Ni)	mg/kg	4,40 ± 0,35
Cuivre (Cu)	mg/kg	15,70 ± 1,26
Zinc (Zn)	mg/kg	121,30 ± 10,92
Arsenic (As)	mg/kg	6,10 ± 0,49
Sélénium (Se)	mg/kg	< 0,50
Brome (Br)	mg/kg	78,30 ± 6,26
Rubidium (Rb)	mg/kg	100,20 ± 8,02
Strontium (Sr)	mg/kg	132,90 ± 11,96
Plomb (Pb)	mg/kg	4,60 ± 0,37
Mercure (Hg)	g/kg	14,17 ± 0,31

Source : INSTN

Présentation des résultats des herbes culinaires

La perte des nutriments commence dès qu'il y a de la chaleur. La cuisson, le séchage, la congélation, et lavage à l'eau constituent des facteurs qui entraînent la diminution et la dégradation des vitamines dans les herbes culinaires dont certaines peuvent être éliminées même en contact de l'air ambiant. Les minéraux supportent en général le milieu ambiant. La congélation ne touche que 3% des minéraux environ. La cuisson engendre une perte de 28%, et quand elle est suivie d'égouttage, la perte des éléments minéraux augmente jusqu'à 42%. Le séchage et le réchauffage n'ont aucun effet sur les minéraux. A 100°C les minéraux se précipitent et deviennent non assimilables par l'organisme (Espitalier J., 2010). Ainsi, les résultats ci-après montrent les minéraux indispensables et disponibles dans les plantes aromatiques traitées. Les

résultats présentés dans le Tableau 5 ont été obtenus à partir de l'analyse de 100g de MS des mélanges.

Tableau 5 : Récapitulation de la teneur en minéraux des herbes culinaires

Herbe	Ca (mg)	Cu (mg)	Fe (mg)	I (µg)	Mg (mg)	Mn (mg)	P (mg)	K (mg)	Se (µg)	Na (mg)	Zn (mg)
Aneth	208	0,15	6,59		55	1,26	66	738		61	0,91
Basilic	273	0,39	5,24		64	1,15	56	295	0,30	12	0,81
Céleri	120,85	0,07	0,30	1,10	11	0,10	27	289	0,40	71	0,12
Coriandre	67	0,23	1,77		26	0,43	48	521	0,90	46	0,50
Menthe	221	0,28	8,48		71,50	1,15	66	514	0,50	31	1,10
Persil	218	0,12	4,67	5	39,50	1,70	65	598	0,10	54	0,77
Romarin	317		6,65		91	0,96	66	668		26	0,93
Thym	405	0,56	17,50		160	1,72	106	609		9	1,81

Source : Morris, B., 2003 ; Naouel O. 2015 ; APRIFEL 2019 ; CREAPHARMA 2020 ; Santé canada. 2010 ; <https://www.index-glycemique.fr>

Résultats d'analyses nutritionnelles et celluloses

Les besoins nutritionnels constituent des guides précieux pour faire la formulation des aliments indispensables à l'amélioration de l'état nutritionnel des catégories vulnérables. Quatre formules (ACGR, ABCG, ACGM, BCGP) ont été proposées. La formulation des fines herbes a été établie suivant les caractéristiques nutritionnelles des matières premières utilisées et en se référant les apports en macronutriments et micronutriments de 100 g de mélanges obtenus théoriquement. Ainsi, les résultats de l'analyse du Centre National de Recherche pour l'Environnement (CNRE) mentionnés dans le Tableau 6 représentent la proportion des macronutriments dans chaque mélange.

Tableau 6 : Résultats d'analyses nutritionnelles et celluloses

Code de l'échantillon	ACGR	ABCG	ACGM	BCGP
Humidité (%)	5,33	7,57	7,16	7,81
Cendre brute (%)	18,11	24,13	20,13	19,73
Protéine (%)	23,06	22,04	17,38	22,09
Lipide (%)	3,51	4,21	2,87	4,44
Glucide (%)	55,67	41,75	46,24	45,93
Cellulose brute (%)	10,54	10,74	11,39	9,77
<i>Valeur énergétique</i>	<i>323,79 Kcal 1356,68 KJ</i>	<i>293,05Kcal 1227,88 KJ</i>	<i>305,79 Kcal 1278,75 KJ</i>	<i>312,04 Kcal 1307,45 KJ</i>

Source : Laboratoires : CNRE Tsimbazaza ; FOFIFA Ampandrianomby

DISCUSSION

Lors des différentes analyses nutritionnelles dans les formules retenues, la présence des différents macroéléments, microéléments et oligoéléments ainsi que des molécules actives dans les herbes aromatiques a été mise en évidence. Dans la partie résultats d'analyses nutritionnelles et celluloses, les macroéléments dans les mélanges de fines herbes ont été identifiés. D'une manière générale, ils regroupent les éléments pour renforcer l'apport énergétique de l'organisme. D'après les résultats des Tableaux 3 et 4, la teneur en potassium a été significativement plus élevée pour la méthode d'excitation par molybdène (Mo) comparativement aux traitements HOPG. Pour le calcium, le magnésium et le zinc, les traitements HOPG ont présenté une différence significativement à la baisse par rapport aux mélanges traités par méthode d'excitation par molybdène (Mo). Les herbes aromatiques contiennent bel et bien des minéraux indispensables à l'organisme.

Compte tenu des résultats obtenus sur la teneur en micronutriments et macronutriments, deux formules ont été retenues, il s'agit de, ACGR et BCGP. Ces deux formules ont été sélectionnées du fait de leurs apports élevés en micronutriments et en protéino-énergétiques. Ces éléments sont fortement recommandés pour combattre la malnutrition des catégories vulnérables telles que les femmes enceintes, et les enfants de moins de cinq ans. La formule ACGR est constituée de 23,06% de teneur en protéine par 100g de Matière sèche et celui de BCGP s'élève à 22,09 %. La teneur en lipide dans les formules est faible, elle varie de 3,51% à 4,44. La teneur élevée en glucides (46% à 56%) et celle des protéines de ces deux formules reflètent une forte densité énergétique de 323,79 Kcal pour 100 g de MS et de 312,04 Kcal pour 100 g de MS.

D'après les Tableaux 3 et 4 susmentionnés, et suivant leur ordre d'importance, les minéraux Mg, P, Cl, K, Ca, Fe, et Zn présentent des concentrations moyennes élevées. Les minéraux présentés dans les tableaux 3 et 4 présentent une concentration totale très remarquable. Ainsi, d'après les compositions nutritionnelles des matières premières utilisées, la présence des éléments nutritifs dans les produits formulés permet de renforcer l'immunité de l'organisme face aux maladies courantes comme la grippe. Concernant les analyses nutritionnelles, des conclusions ont été tirées :

- La faible variabilité pour les macronutriments, variabilité intragroupe, constatée, démontre une bonne répétabilité et reproductibilité des mesures effectuées et une stabilité de ces macronutriments, même pour une durée de conservation prolongée ;
- La forte variabilité intragroupe des micronutriments démontre la fiabilité et la ponctualité des mesures, donc leur instabilité vis-à-vis des traitements effectués sur les produits, la formule élaborée et leur sensibilité ;

- Par rapport aux autres constituants chimiques qui jouent un rôle primordial, le calcium (Ca) intervient dans le constituant du squelette, et des dents. Il contribue à la coagulation du sang et la contraction musculaire (Hammoudi R., 2015).

Le cuivre (Cu) est un constituant de nombreuses oxydoréductases. Il tient un rôle important dans le métabolisme du fer (dans le plasma, il s'associe à la ceruloplasmine qui catalyse l'oxydation Fe^{2+} en Fe^{3+} forme sous laquelle le fer est transporté dans le sang par la transferrine vers le foie). Le cuivre intervient dans de nombreuses activités enzymatiques ainsi que dans le fonctionnement du système nerveux. Il est en quantité importante au niveau des tissus nerveux et du foie (Latham M., 2001).

Le fer (Fe) est un constituant de nombreux enzymes. Il se présente sous deux formes :

- Fer fonctionnel qui se réfugie dans l'hémoglobine et myoglobine où il assure notamment le transport de l'oxygène,
- Fer de réserve qui est stocké dans le foie, la rate, la moelle osseuse au sein des protéines. (Latham M., 2001).

Le magnésium (Mg) est un constituant et activateur de nombreux enzymes c'est-à-dire un cofacteur (Latham M., 2001). Le manganèse (Mn) est un activateur du pyruvate carboxylase et autres enzymes. Il est consommé majoritairement par le foie, le pancréas, les reins et le cerveau. (Sébastien D., 2009). Le phosphore (P) intervient dans la formation des os et des dents sous forme de phosphate (hydroxyapatite). Il assure la réaction de phosphorylation et maintient l'équilibre acido-basique dans le métabolisme. La combinaison du phosphore sous forme de phosphate avec le calcium aboutit à la formation et le durcissement des tissus osseux et dentaires. Pour cela, leur quantité devrait être égale (rapport Ca/P environ 1). (Sébastien D., 2009). Le potassium (K) assure la régulation de la pression osmotique dans la cellule. Son rôle se repose généralement dans le transport membranaire, l'activation d'enzymes et l'augmentation de l'excitabilité neuromusculaire. (Espitalier J., 2010) (Hammoudi R., 2015).

Le zinc (Zn) intervient dans des activités enzymatiques et dans la croissance et l'immunité. Dans le corps humain, Il se localise au niveau de la peau, des cheveux et du foie. Le zinc prévient l'anémie et la cicatrisation des plaies. (Espitalier J., 2010). Le sélénium (Se) fait partie d'un constituant d'une enzyme. Son rôle intracellulaire antioxydant est similaire à celui de la vitamine E. D'ailleurs, le sélénium renforce l'activité de la vitamine E. Ainsi, il est doté d'un pouvoir anticancéreux et anti-âge. Les aliments riches en protéines constituent les meilleures sources en sélénium (viandes, poissons et autres produits de la mer, ail, noix et champignons) (Sébastien D., 2009). L'iode (I) intervient dans la composition des hormones thyroïdiennes. Son apport suffisant prévient le goitre. Il est souvent ajouté au sel

(Sébastien D., 2009). Le sodium (Na) maintient la pression osmotique (équilibre hydrique). La régulation de l'équilibre acido-basique et l'activation d'enzyme (comme l'amylase) font partie de ses fonctions. Il est à consommer avec modération car l'excès en sodium entraîne l'hypertension. (Sébastien D., 2009).

CONCLUSION

La présente étude suggère une formulation des fines herbes sous une forme homogène composée de quatre variétés des plantes aromatiques. Deux mélanges ont été sélectionnés et leurs apports en micronutriments et en protéino-énergétiques permettent de couvrir les besoins nutritionnels des catégories de personnes vulnérables et de briser le cercle vicieux de la malnutrition intensifié par le COVID-19. Après séchage par étuvage à 60°C pendant 24h, suivi de broyage des mélanges, les méthodes et la technique de détection des minéraux par fluorescence X ont été réalisées. Afin d'approfondir les recherches sur l'origine des autres éléments indésirables dans le mélange des fines herbes, une étude des facteurs extrinsèques des plantes peut être envisagée. Une évaluation de formulation de produits comme bio fortifiant des produits alimentaires destinés pour les enfants de moins de cinq ans contribuera à confirmer son importance sur l'amélioration de la nutrition humaine. Cette recherche permettrait également d'effectuer des études sur les méthodes d'isolement des matières actives issues d'autres plantes culinaires en se basant sur la méthode obtenue. La présente recherche a montré que la fluorescence X en réflexion totale est une technique adéquate pour déterminer les éléments minéraux majeurs et en traces contenus dans des plantes culinaires. La comparaison avec les mesures effectuées par la méthode EDXRF a montré un bon accord des résultats. En bref, la fluorescence X en réflexion totale a fourni des informations fiables pour l'analyse élémentaire des végétaux telles que plantes culinaires ou fines herbes.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Deppenweiler A. (2014). Le glutamate monosodique comme exhausteur de goût : confiance ou méfiance ? Sciences pharmaceutiques. Thèse pour l'obtention du Diplôme d'état de docteur en pharmacie. Université Victor Segalen Bordeaux 2, 2014. 119p.
- 2) Espitalier J. (2010). La myrtille (*Vaccinium myrtillus*) : Botanique, chimie et intérêts thérapeutiques. Thèse de doctorat d'Etat en Pharmacie. Université Henri Poincaré - Nancy 1, 2010. 111p.
- 3) Hammoudi R. (2015). Activités biologiques de quelques métabolites secondaires extraits de quelques plantes médicinales du Sahara méridional algérien. Thèse doctorale ès sciences en biologie. Université Kasdi Merbah-Ouargla Algérie, 2015.22(1), 239-247p.

- 4) Latham M. (2001). La Nutrition dans les Pays en Voie de Développement, Edité par FAO en 2001, Rome, Italie, ISBN 92-5-203818-3. 515p.
- 5) Leyden D. E. (1990). Energy-dispersive X-ray spectrometry. Spectroscopy, John Wiley & Sons, Ltd., 1990. Volume 28, Issue 3, 173-177p.
- 6) Morris B. (2003). Bio-functional Legumes with nutraceutical, pharmaceutical, and Industrial Uses. Economic Botany, 2003. 57(2), 254-261p.
- 7) Naouel O. (2015). Etude chimique et biologique des huiles essentielles de coriandre, de fenouil, et persil. Faculté des Sciences de la Nature et de la vie. Thèse de doctorat, Chimie organique, Oran1. Université d'Oran1, 2015. 239p.
- 8) ONN & WFP. (2016). Fill the Nutrient Gap Madagascar : Full Report, s.l. : Office National de Nutrition ; World Food Programme, 2016. 74p.
- 9) Iserin P, Ybert E, Marcella A. (2001). Larousse encyclopédie des plantes médicinales, Identifications, préparations, soins. Montparnasse, Juin 2001. 335p. ISBN : 2-03-560252-1.
- 10) Reynaud J. (2010). Cours de botanique (première partie & troisième partie) 2009-2010. 234 p et 244p.
- 11) Didier S. (2009). Menthe verte *Mentha spicata*. Faculté libre des sciences et technologie, 2009. L3 SVB. 16p.
- 12) Zeghad N. (2012). Evaluation de l'activité antibactérienne de deux plantes médicinales *Thymus vulgaris*, *Rosmarinus officinalis*. Biologie. Editions universitaires européennes. 21/06/2012. 136p.

WEBOGRAPHIE

- 1) CREAPHARMA (2020). Romarin. Dernière modification 01/08/2018. [En ligne] disponible sur <https://www.creapharma.ch>. Consulté le 12 Novembre 2020.
- 2) APRIFEL (2019). Coriandre. Avril 2009. [En ligne] disponible sur <http://www.aprifel.com> Consulté le 09 Novembre 2020.
- 3) WIKIPEDIA (2018). Gombo. Modification le 26/08/2018. [En ligne] disponible sur <https://fr.m.wikipedia.org>. Consulté en 28 Novembre 2020.
- 4) APRIFEL (2017). Céleri branche 2017. [En ligne] disponible sur <http://www.aprifel.com>. Consulté en Novembre 2020.
- 5) WIKIPEDIA (2017). Basilic. Modification en 19/11/2017. [En ligne] disponible sur <https://fr.m.wikipedia.org>. Consulté en Octobre 2020.
- 6) APRIFEL (2017). Menthe. Ciquial 2017. [En ligne] disponible sur <http://www.aprifel.com> Consulté en Octobre 2020.

- 7) APRIFEL (2017). Thym. Ciqual 2017. [En ligne] disponible sur <http://www.aprifel.com>. Consulté en Octobre 2020.
- 8) Anonyme. (2017). Gombo-fruit. 01/05/2017. [En ligne] disponible sur <https://www.index-glycemique.fr>. Consulté le 12 Novembre 2020.
- 9) APRIFEL (2013) Persil. 2013. [En ligne] disponible sur <http://www.aprifel.com> Consulté le 22 Novembre 2020.
- 10) Santé canada. (2010). Fiche Canadien sur les éléments nutritifs. Modification en 2020-02-19 [En ligne] disponible sur <http://www.i-dietetique.com/composition-nutritionnelle>. Consulte le 06 Juin 2020.
- 11) EPSIC (1999). Sels minéraux. AE/25sels. Doc [En ligne] disponible sur <http://www.epsic.ch/branches/chimie/denrees/25sels.pdf>. Consulté en Octobre 2020.

POTENTIALITE DES BIOCOMPOSITES A RENFORT FIBRES VEGETALES A MADAGASCAR

par

BINGUIRA Kelly⁽¹⁾, RAHELIARILALAO Bienvenue⁽²⁾

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

(2) Professeur, Ecole Doctorale Ingénierie et Géoscience, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA),
Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Des bois d'œuvre de 163 530 m³ ont été produits à Madagascar en 2017, représentant des contraintes non négligeables sur l'environnement. Toutefois, la Grande Ile possède une immense potentialité en fibres végétales comme les fibres de bambou, de sisal, de raphia, les fibres issues de la bourre ou de rachis de coco. Par ailleurs, des fibres peuvent être incorporées dans une résine pour obtenir des matériaux composites appelés biocomposites pouvant être utilisés comme matériaux alternatifs aux matériaux bois. Le présent article a pour objectifs d'extraire les fibres non disponibles sur le marché et d'étudier les performances mécaniques de ces biocomposites. Ces fibres végétales, majoritairement sous formes fibrillaires ou composées à savoir fibrillaire et tissu, sont alors mélangées à raison de 10%, 15%, 20%, 25% et 30% en volume avec le polyester insaturé orthophtalique puis comprimées pendant 1h30min avant de subir l'essai de flexion à 3 points. Parmi ces biocomposites, ceux renforcés par les fibres de bambou et de sisal ont montré des résultats remarquables et d'une manière générale la résistance à la flexion augmente proportionnellement avec le taux en renfort. Des résultats obtenus sur les biocomposites à renfort composé ont montré des résultats similaires aux taux en renfort de 25% et de 30% des 2 fibres précédentes. Ainsi, les biocomposites à renfort fibres de bambou ou de sisal ou renfort composé peuvent être choisis en fonction de l'abondance des fibres et de leurs renouvellements pour être un substitut viable aux bois.

Mots clés : Bambou, Biocomposite, Coco, Polyester insaturé, Rachis, Raphia, Sisal, Fibres végétales, Madagascar

ABSTRACT

Sawlog of 163 530m³ were produced in Madagascar into 2017 representing considerable constraints on the environment. However, the Island possesses a tremendous vegetable fiber potentiality like sisal, bamboo fiber, raffia, coir or fibers from coconut rachis. It seems that fibers can be mixed with resin to obtain composite materials called biocomposite being able to be used as alternate materials to wood. This manuscript aims to extract fibers nonavailable commercially and to study the mechanical performances of these biocomposites. These vegetable fibers, essentially fibrillary or composed by fibrilla and fabric, are then mixed at a rate of 10%, 15%, 20%, 25% and 30% in volume with an orthophtalic unsaturated polyester then compressed during 1h30min before undergoing the 3 points flexural test. Among these biocomposites, those reinforced by sisal and bamboo fibers showed remarkable results and generally the flexural strength increases proportionally with the rate in reinforcement. Results obtained on the biocomposites with compound reinforcement showed results similar to the rates in reinforcement of 25% and 30% of the two previous fibers. Thus, the biocomposites with reinforcement bamboo fibers or sisal or compound reinforcement can be selected according to the abundance of fibers and their renewals to be a viable substitute to wood.

Keywords : Bamboo, biocomposite, coir, unsaturated polyester, rachis, raffia, sisal, Vegetable fiber, Madagascar

INTRODUCTION

Selon la FAO, Madagascar produit une quantité de bois d'œuvre estimée à 163 530 m³ en 2017, des fibres de sisal de 17 488 tonnes répartis sur 14 011 ha, des cocotiers avec une production de 73 737 tonnes sur 33 171 ha en 2018. Par ailleurs, la Grande Ile possède une trentaine d'espèces de bambou réparties sur 1 123 694 ha en 2017 (Tsinghua University, et *al.*, 2018). Plusieurs méthodes permettent d'extraire les fibres végétales des plantes à fibres essentiellement chimique ou mécanique comme le rouissage, l'utilisation de solution de NaOH, l'explosion vapeur. (Omid, et *al.*, 2018). La combinaison entre la méthode chimique et mécanique peut être également envisagée comme dans les travaux de Zakikhani et *al.* (2014) Ces fibres extraites ou dérivées directement de la plante à fibres peuvent être chimiquement traitées avec le NaOH pour des concentrations jusqu'à 7% (Kim, et *al.*, 2013), physiquement ou thermiquement pour améliorer l'interface fibre-matrice. Des concentrations plus élevées peuvent altérer la qualité des fibres. (Rao, et *al.*, 2007) les plantes à fibre peuvent ne subir que peu de variation avant leur imprégnation par une matrice comme les lamelles de bambou. La matrice est faite de résines classées en 3 grandes catégories thermoplastiques ou thermodurcissables ou encore élastomères. De nombreuses recherches ont utilisé le polyester insaturé comme matrice. (Monteiro, et *al.*, 2014 ;

Omid, et al., 2018 ; Manalo, et al., 2013 ; Jain, et al., 1993). Des taux en renfort jusqu'à 30% sont généralement utilisés (Monteiro, et al., 2014) pour des procédés de mise en œuvre variés comme le moulage par compression, le moulage par injection, le moulage par extrusion, etc. (Deshpande, et al., 2000). Cependant des formulations en renfort plus élevées peuvent être notifiées jusqu'à 60% ou encore 70% en volume (Das, et al., 2009 ; Jain, et al., 1993) Il semble que les biocomposites comme les matériaux composites ont des propriétés qui peuvent être modifiées à volonté pour atteindre des propriétés cibles. Le présent article a pour objectif d'identifier les fibres que Madagascar possède, d'étudier leurs performances mécaniques après leurs transformations en biocomposites ainsi que d'évaluer le taux volumique en renfort nécessaire pour égaler les propriétés à la flexion d'un bois dur.

MATERIELS ET METHODES

Matières premières

Acquisition

La matrice polyester insaturé orthophtalique et le catalyseur peroxyde de méthyl-éthyle-cétone (PMec) ont été achetés au sein de la société Madagascar Chimie Industries.

Le bois utilisé pour la comparaison est du type parquet en palissandre d'épaisseur 10mm dont la résistance à la rupture est de 109,7MPa et la déformation en surface 3,1%. (Communication personnelle)

Les fibres de raphia et les fibres de sisal ont été achetées sur le marché. Le dendrocalamus giganteus et le bambusa vulgaris ont été récoltés à partir d'une plantation. Ils sont âgés de 3 ans environ dont les chaumes utilisés se situent surtout à la base à partir du 3ème chaume. La bourre et le rachis de coco (Photo 1), de couleur marron, sont matures. C'est le dendrocalamus giganteus qui a été utilisé pour la fabrication manuelle de tissus à partir des éclisses en bambou.

L'origine de chaque matière première est consignée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Origine des matières premières

Matière première	Origine
<i>Bambusa vulgaris (BV)</i>	Fanandrana – Toamasina
<i>Dendrocalamus giganteus (DG)</i>	
Coco	Toamasina
Sisal	Soavinandriana – Itasy
Raphia	Toamasina

Rachis de coco (Rc)	Toamasina
Parquet en palissandre	Antananarivo
Polyester insaturé orthophtalique (PI)	Antananarivo

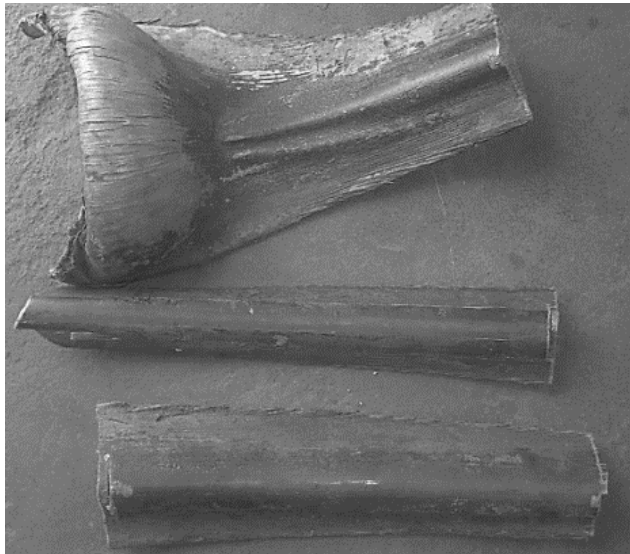


Photo 1 : Rachis de coco

Extraction et préparation des fibres

L'entre-nœud des 2 espèces de bambou a été enlevé avec une scie sauteuse. Chaque partie de la plante, d'où les fibres ont été extraites, a été écorcée. Les rachis de coco ainsi que les entre-nœuds ont été divisés en lamelle pour une meilleure imprégnation (Communication personnelle). Ces procédures sont identiques à ceux d'Omid et al. Ces fibres ont été immergées dans une solution de soude à concentration minimale et à un temps minimal. La concentration de solution NaOH qui a été choisie est le minimum possible de façon à ce que la délignification soit possible.

La concentration de 3% pour une durée de 24h a été retenue après des expériences préliminaires. Ces expériences menées sur des bâtonnets de bambou utilisaient des concentrations de 1%, 3% et 6% pour des durées d'immersion de 8h, 12h, 16h et 20h sur des lamelles de bambou dont la longueur est celle du chaume, la largeur 0,8cm et l'épaisseur celle du chaume ont montré que l'imprégnation complète de ces derniers s'est faite pour une concentration de 3% pour une durée de 20h (Communication personnelle). Les masses volumiques des fibres extraites déterminées par la méthode pycnométrique sont récapitulées et comparées avec celles de la bibliographie dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Masses volumiques des fibres

Fibres		Traitement alcalin	Masse volumique [g/cm ³]	Référence
Bambou	<i>BV</i>	3%	1,345	Communication personnelle
	<i>DG</i>	3%	1,337	
	-	-	0,8 – 1,4	(Zakikhani, et <i>al.</i> , 2014) (Rao, et <i>al.</i> , 2007)
	-	-	0,910	(Prasad, et <i>al.</i> ,2011)
Coco		3%	1,092	Communication personnelle
		-	1,4	(Jayabal, et <i>al.</i> , 2011)
		-	1,150	(Prasad, et <i>al.</i> , 2011)
Sisal		-	1,539	Communication personnelle
		-	1,450	(Prasad, et <i>al.</i> ,2011)
		-	1,450	(Sreekumar, et <i>al.</i> , 2007)
		-	1,26	(Sydenstricker, et <i>al.</i> , 2003)
Sisal traité		3%	1,689	Communication personnelle
		2%	1,19	(Sydenstricker, et <i>al.</i> ,2003)
		10%	1,16	
Raphia		-	0,303	Communication personnelle
Raphia traité		3%	0,987	
Rachis de coco		3%	1,799	

Les opérations de broyage, de cardage, de neutralisation avec l'acide acétique et de séchage à l'air libre ont complété le processus d'extraction.

A partir de la formulation 20% en volume, des tissus ont été insérés dans le biocomposites pour obtenir un renfort composé. Deux types de tissus ont été élaborés à partir des éclisses de bambou, à savoir des tissus unidirectionnels et des tissus satins dont les caractéristiques sont données dans le Tableau 3. Les éclisses ont comme longueur celle du chaume, la largeur entre 0,7 et 1 cm et comme épaisseur 0,6 à 1,2mm. Les séquences d'empilement sont sommairement présentées dans le Tableau 4.

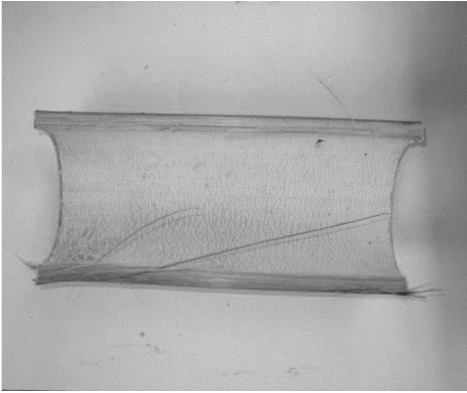


Photo 2 : Chaume à entre-nœud enlevé



Photo 3 : Bambou en bâtonnet



Photo 4 : Tissu unidirectionnel

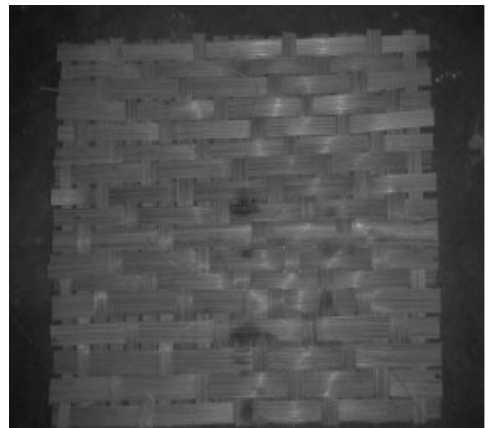


Photo 5 : Tissu satin

Tableau 3 : Masse surfacique des tissus utilisés

Plante à fibre	Etat du renfort	Masse surfacique [g/m ²]
<i>Dendrocalamus giganteus</i>	Tissus UD	438
	Tissus satin	869

Tableau 4 : Structure des renforts composés

Désignation	Composites	Structure	Architecture
Co1u	3 couches	Sisal-armure unidirectionnelle-Sisal	0°/90°/0°
Co2s		Sisal-armure satin-Sisal	
Co3u	5 couches	Sisal-3 armures unidirectionnelles-Sisal	0°/90°/0°/90°/0°

Préparations des composites

Traitement des fibres

Les fibres disponibles sur le marché et les tissus mis en œuvre sont éventuellement traités par la même solution et à la même concentration à savoir 3% mais pour une durée de 1h. Les fibres précédemment extraites ainsi que les fibres traitées sont lavées avec de l'acide acétique avant d'être séchées pour 48h à l'air ambiant.

Formulations étudiées et mise en œuvre

Les renforts sont disposés dans un moule préalablement enduit d'un agent de démoulage, la résine catalysée à 2% avec du PMec, selon les indications du fournisseur, y est ensuite versée avant de presser l'ensemble à l'aide d'une tige filetée.

Des biocomposites de taux volumiques 10%, 15%, 20%, 25% et 30% ont été mis en œuvre mais dont les formes de renfort sont diverses.

La compression a été maintenue durant 1h30 même si une durée plus courte peut être adoptée comme le temps d'imprégnation. (Deshpande, *et al.*, 2000 ; Phani Sushma, *et al.*, 2018)

Les biocomposites ainsi mis en œuvre ont subi une post-cuisson de 50°C en 5h pour atteindre des performances optimales.

Caractérisation

Rendement en fibres extraites

Le pourcentage de fibres extraites r est évalué par la relation :

$$r = \frac{m_f}{m_p} [\%]$$

m_f : masse de fibres sèche [g]

m_p : masse de plante à fibre sèche [g]

Flexion des biocomposites

Les essais de flexion à 3 points ont été menés suivant la norme DIN ISO 14 125. Les éprouvettes pour la flexion à 3 points ont 200mm comme longueur, 30mm comme largeur et 7mm comme épaisseur. La distance entre les appuis est de 140mm et les rayons R1 et R2 sont identiques à savoir 10mm. Chaque formulation a été étudiée avec 5 éprouvettes.

La contrainte à la rupture est alors obtenue par la relation :

$$\sigma = 1,5 \frac{FL}{bh^2}$$

La déformation en surface est donnée par :

$$\varepsilon = 6 \frac{wh}{L^2}$$

Où L est la distance entre les appuis, F la charge maximale, b la largeur, h l'épaisseur et w le déplacement.

RESULTATS

Rendement en fibres extraites relativement faible

Les quantités de fibres de coco issues de la bourre et du rachis varient respectivement de 12,4 à 12,8% et de 7,4 à 14,2%. Pour les fibres de bambou, ces quantités sont 29,5 à 36,5% pour le *bambusa vulgaris* et 22,5 à 26% pour le *dendrocalamus giganteus*.

Tableau 5 : Rendement en fibres extraites

Fibre		Rendement [%]	Mode d'extraction		Référence
			Solution	Procédé	
Coco	Nanocellulose	23,4	Alcalisation	-	(Abraham, et al., 2013)
	Fibres longues	12,4-12,8	Alcalisation	Manuelle	Communication personnelle
	Rachis de coco	7,4-14,2	Alcalisation	Manuelle	Données personnelles
Bambou	<i>Moso bamboo</i>	64	-	Explosion vapeur	(Kim, et al., 2013)
		70	Alcalisation	Compression	

Fibres longues de <i>Bambusa vulgaris</i>	29,5-36,9	Alcalisation	Laminage	Communication personnelle
Fibres longues de <i>Dendrocalamus giganteus</i>	22,5-26	Alcalisation	Laminage	Communication personnelle

Variation des contraintes à la rupture quel que soit le type de renfort utilisé

Augmentation des contraintes à la rupture des biocomposites avec le taux de renfort

Les biocomposites renforcés de fibres de sisal, de *bambusa vulgaris*, de *dendrocalamus giganteus* et de sisal traité, présentent sensiblement la même allure avec des performances légèrement supérieures pour ceux du *dendrocalamus giganteus*. Les valeurs maximales sont obtenues pour le taux de 30% en fibre et se situent aux environs de 200MPa pour les trois premiers types de renfort. Les biocomposites à renfort raphia présentent des contraintes à la rupture inférieures à celle du polyester insaturé non renforcé qui est de 42,3MPa. Il en est de même pour ceux renforcés de fibres raphia traité et de coco pour des taux inférieurs à 20%. Les biocomposites à renfort fibres de BV, de DG, de sisal et de sisal traité, qui sont les plus performants, égalisent les performances du bois témoin à partir du taux volumique de 20% dont la contrainte à la rupture est de 110MPa environ.

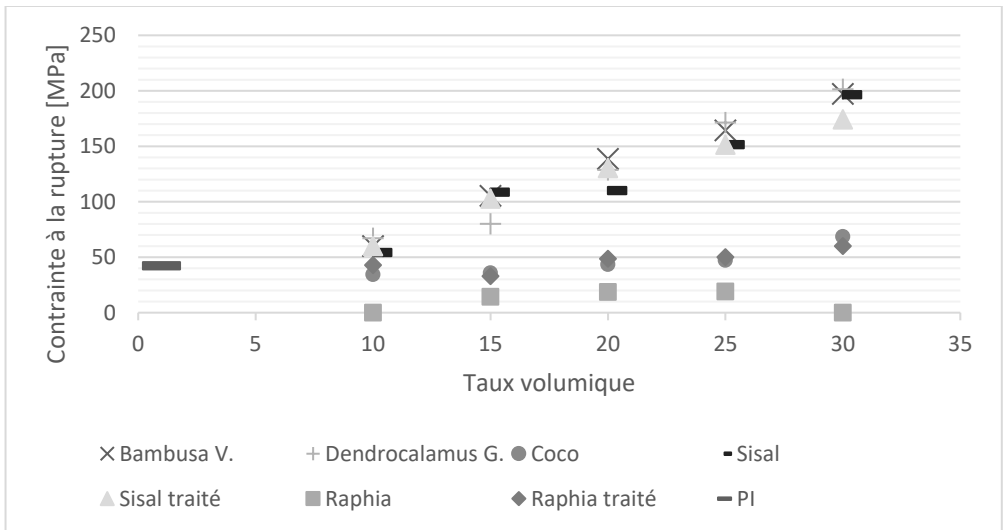


Figure 1 : Contraintes à la rupture des biocomposites à renfort fibres longues

Variation de la contrainte à la rupture en fonction du type d'armure utilisé

Les biocomposites à renfort composés présentent une valeur maximale de contraintes à la rupture avec l'utilisation du tissu satin à raison de 184,3MPa. Ces biocomposites, formés à partir de 20% de fibres de sisal et de tissus, ont des contraintes à la rupture supérieures à celles du biocomposite à 20% de fibres de sisal seules avec 110MPa. Tous ces biocomposites ont également des performances dépassant celle du palissandre.

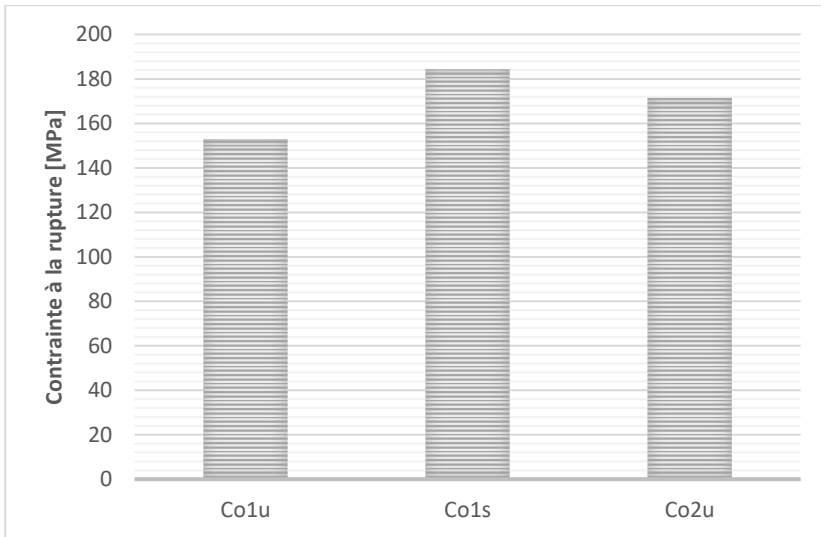


Figure 2 : Contrainte à la rupture des biocomposites à renfort composé ou hybride

Variation de la déformation en surface en fonction du renfort

Performances remarquables des biocomposites à renfort fibres de bambusa vulgaris, de coco et de sisal

L'ajout de renfort a généralement pour effet d'augmenter la déformation en surface par rapport au polyester insaturé pure à 2,2%. La plupart des biocomposites ont des déformations en surface supérieure à ce dernier sauf pour les biocomposites à renfort fibres de raphia. Les biocomposites à renfort fibres de coco montrent des performances remarquables. Leurs déformations en surface augmentent avec le taux en renfort pour une valeur maximale de 11,66% pour 30% de renfort.

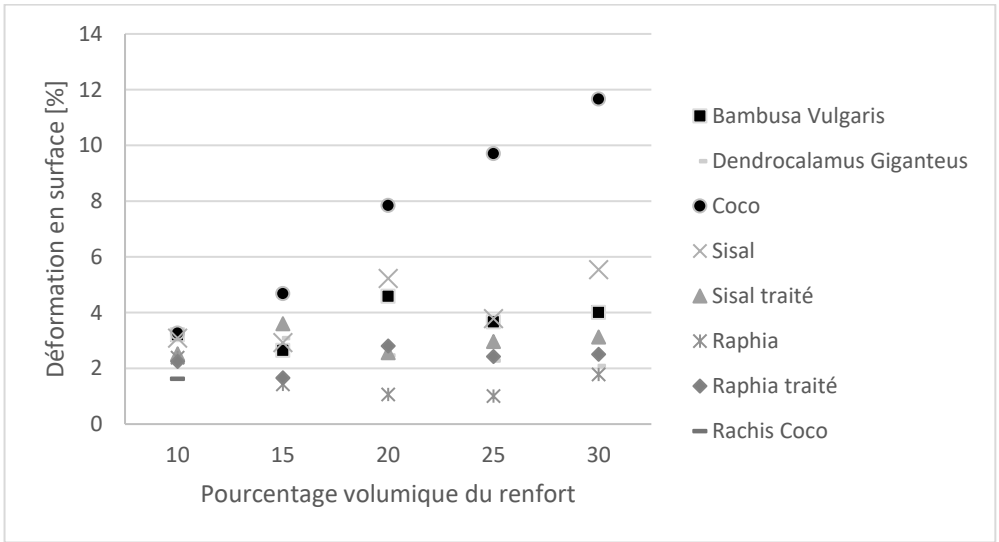


Figure 3 : Déformation à la surface des biocomposites à renforts fibrillaire

Déformation en surface des biocomposites à renfort composé supérieure à celle du bois

Les déformations en surface des biocomposites, renforcés d'un tissu unidirectionnel et d'un tissu satin en plus des fibres de sisal à 20%, respectivement de 4,4% et de 4,3%, sont inférieures à celle du biocomposite renforcé de fibres de sisal seules à 20% avec une valeur de 5,22%. Le biocomposite renforcé de 3 tissus unidirectionnels avec les fibres de sisal montre une déformation en surface maximale en raison de 9,6%. Tous les biocomposites à renfort composé ont une déformation en surface supérieure au bois témoin se trouvant aux environs de 3%.

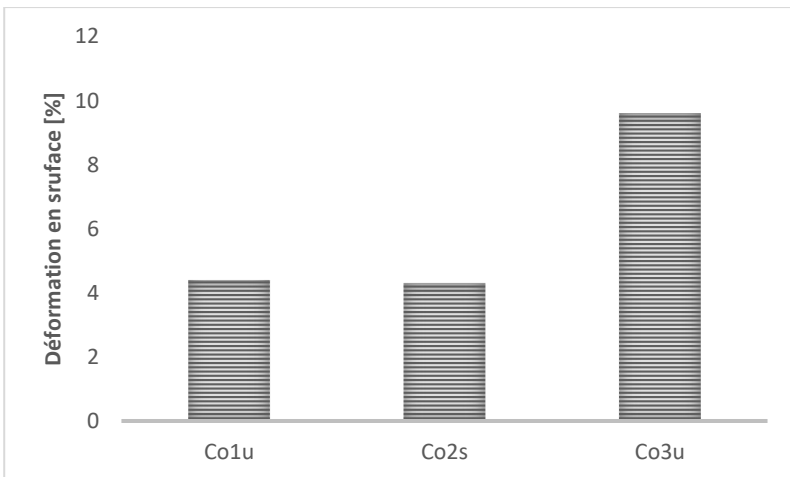


Figure 4 : Déformation en surface des biocomposites à renfort composé

DISCUSSION

Rendement en fibre

Le rachis de coco contient le moins de fibre car la plupart des éléments éliminés ne sont pas des matières cellulosiques. L'ensemble des rendements en fibres du présent travail est relativement faible par rapport à ceux des autres auteurs (Abraham, et *al.*, 2013 ; Kim, et *al.*, 2013). Les fibres obtenues sont des fibres longues. Ce faible rendement peut s'expliquer par l'opération de cardage. En effet, l'opération de cardage avec un peigne élimine la plupart des fibres non tenues à l'extrémité.

Variation des contraintes à la rupture quel que soit le type de renfort utilisé

Augmentation des contraintes à la rupture des biocomposites avec le taux de renfort

Les fibres de BV, de DG, de sisal et de sisal traité ont à peu près la même allure. C'est-à-dire que leurs contraintes à la rupture augmentent proportionnellement par rapport aux taux en renfort.

Les fibres de coco, de raphia traité ont une tendance linéaire mais avec une pente moins prononcée. Les fibres de raphia ont des valeurs de contrainte à la rupture les plus faibles. Ceci peut s'expliquer par une mauvaise imprégnation de ces fibres qui sont des fibres rubanées.

D'une manière générale, en comparant les fibres traitées et les fibres non traitées, les performances mécaniques des fibres traitées au NaOH sont améliorées. Les travaux effectués par Das et Chakraborty ont, en effet, montré que la contrainte à la rupture en flexion des lattes de bambou augmente proportionnellement avec la concentration de NaOH pour une valeur optimale de 15% (Das, et *al.*, 2009). Des résultats similaires ont été trouvés pour une concentration optimale de 5% sur des éprouvettes soumises en traction (Kim, et *al.*, 2013). Le traitement des fibres de bambou avec une solution alcaline à 3% pendant 24h permettait d'obtenir des résistances à la flexion optimales (Omid, et *al.*, 2018).

Das et *al.*, (2009) ont trouvé que le traitement alcalin améliore la mouillabilité des fibres et permet à la résine de pénétrer plus en profondeur sur des lamelles de bambou à cause des changements sur la topographie de la structure des fibres.

Les valeurs de contrainte de la rupture des deux espèces de bambou pour un taux volumiques en renfort de 25% (164,3 MPa pour BV et 171,4MPa pour DG) sont conformes à celles trouvées par d'autres auteurs. Deshpande et *al.* ont trouvé 75 à 175MPa, mais en tenant compte des diamètres des fibres (Deshpande, et *al.*, 2000).

Pour un taux en renfort de 15% et de 20% en volume correspondant à 14,4% et 19% en masse, la résistance à la flexion des fibres de coco de 35 MPa à 40MPa est restée inférieure à celle trouvée par Rout et *al.* pour un taux en renfort de 17% en

masse qui est de 60MPa. Cela peut s'expliquer par la différence entre la concentration de la solution alcaline qui est de 5% pour Rout et *al.* Une autre raison à cette différence est l'utilisation d'un accélérateur à 1% en masse durant le moulage par Rout et *al.* (2001) Pour des taux volumiques en renfort de 15% et 25% correspondant respectivement à des taux massiques de 19% et 29%, les résistances à la flexion des biocomposites renforcés de fibre de coco sont respectivement 35,7MPa et 47,14MPa et sont proches des résultats trouvés dans d'autres travaux de recherche à savoir 38,5MPa et 34,8MPa pour des taux massiques respectives de 20% et 30% (Jayabal, et *al.*, 2011).

Pour les biocomposites à renfort fibres de sisal non traité, les contraintes à la rupture augmente pour les taux volumiques de 10% à 30% pour des valeurs minimales de 54,26MPa et maximales de 196,425MPa. Sreekumar et *al.*,2007 ont trouvé pour leur part une valeur minimale de 52MPa pour 24% en volume et une valeur maximale de 68MPa pour 42% en volume de fibres de sisal. Toutefois, on ne peut pas comparer les résultats de ces 2 travaux car la longueur de fibres dans le présent travail est de 200mm et 30mm pour Sreekumar et *al.* (2007)

Ne présentant qu'une contrainte de rupture à la flexion supérieure à celle de polyester insaturé qu'à partir de 20% en volume, les fibres de raphia traitées sont parmi les fibres présentant de faible performance mécanique. On note que les fibres de coco comme renfort incorporées dans la matrice polyester présentent à peu près la même tendance.

Les fibres issues du rachis de coco, en comparant les biocomposites renforcés à 10%, ont des performances comparables à celles des fibres de sisal et des fibres de *Bambusa Vulgaris*.

Variation de la contrainte à la rupture en fonction du type d'armure utilisé

Pour les stratifiés à renfort composé, seules les couches sollicitées contribuent à la résistance en flexion du biocomposite, à savoir les couches orientées à 0°. Puisque l'armure satin possède deux directions 0° et 90°, la différence entre la résistance à la flexion entre les composites [0°*sisal*/90°*latte de bambou satin*/0°*sisal*] et [0°*sisal*/90°*latte de bambou unid.*/0°*latte de bambou unid.*/90°*latte de bambou unid.*/0°*sisal*] avec l'armure unidirectionnelle orientée à 0° est seulement de 7% environ. Des résultats similaires ont été trouvés pour des biocomposites à renfort lattes de bambou et à matrice diglycidyl ether de bisphénol type A (Araldite LY 556) [0°/0°/0°/0°/0°], [0°/45°/0°/45°/0°] et [0°/90°/0°/90°/0°] pour des valeurs moyennes de la résistance à la flexion respectives de 128,4MPa, 68,28MPa et 105,74MPa (Verma, et *al.*, 2011)

Après avoir menés des investigations sur biocomposites à renfort éclisses de bambou, Sofyan Djamil *et al* ont constaté que c'est le biocomposite dont la séquence

d'empilement est de $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$ qui a la résistance à la rupture à la flexion la plus élevée à raison de $47 \pm 1,21\text{MPa}$ par rapport à des biocomposites $[0^\circ/45^\circ/0^\circ]$ et $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$.

Variation de la déformation en surface en fonction du renfort

Les biocomposites à renfort fibres de coco montrent des déformations à la surface exceptionnelles puisque leurs déformations peuvent atteindre presque 12% pour un taux en renfort de 30% en volume. Les composites présentent des déformations à la surface entre 1% et 6% pour les taux volumiques de 10 à 30%.

Les biocomposites à renfort composés montrent des contraintes à la rupture supérieures à celle du bois témoin dont la plus petite valeur de déformation en surface est de 4% environ.

Les biocomposites à renfort composé dont l'empilement est de $[0^\circ_{\text{sisal}}/90^\circ_{\text{latte de bambou unid.}}/0^\circ_{\text{latte de bambou unid.}}/90^\circ_{\text{latte de bambou unid.}}/0^\circ_{\text{sisal}}]$ montrent la déformation en surface la plus élevée à raison de 10% environ parmi les biocomposites à renfort composé.

En comparant ces résultats des biocomposites à renfort composé avec ceux d'autres chercheurs, on constate que les déformations à la surface des biocomposites à base d'éclisses de bambou dont les séquences d'empilement sont $[0^\circ/0^\circ/0^\circ]$, $[0^\circ/45^\circ/0^\circ]$ et $[0^\circ/90^\circ/0^\circ]$ mis en œuvre par Djamil et al. (2020) sont nettement supérieures. Pour le premier type de biocomposite, les séquences sont identiques mais la différence réside dans la nature des renforts. Dans le cas présent, il s'agit d'un renfort composé ou encore un renfort hybride formé par des fibres de sisal et des éclisses de bambou. Ce seraient donc les éclisses de bambou qui contribuent le plus à l'augmentation de la déformation en surface (Djamil, et al., 2020).

CONCLUSION

La présente recherche a pour intérêt de promouvoir le domaine des fibres végétales à Madagascar dans le cadre structurel, comme la mise en œuvre de biocomposites. Le travail s'est d'abord focalisé sur l'étude du comportement à la flexion de ces biocomposites pour en déduire les fibres à promouvoir que sont les fibres de bambou *bambusa vulgaris*, *de dendrocalamus giganteus* et les fibres de sisal. En effet, les biocomposites renforcées avec ces fibres égalisent la contrainte à la rupture par flexion du palissandre de 110MPa à partir du taux volumique de 20%. Des biocomposites à renfort hybride formé de fibres de sisal et de tissus de bambou possèdent des contraintes à la rupture dépassant 153MPa. Ces deux types de biocomposites pourraient remplacer le palissandre dans le domaine de l'ébénisterie. Pour évaluer les limites de ces matériaux alternatifs, les propriétés comme l'absorption d'eau ou encore la résistance à la traction ont besoin d'être déterminées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Abraham, Eldho ; Deepa, B. ; Pothen, L. A. ; Cintil, J. ; Thomas, S. ; John, M. J. et Anandjiwala, R. et Narine, S. S. Environmental friendly method for extraction of coir fibre and isolation of nanofibre. In *Carbohydrate Polymers* (2013), 92, pp. 1477-1483.
- 2) Das, Mahuya et Chakraborty, Debabrata. The Effect of Alkalization and Fiber Loading on the Mechanical Properties of Bamboo Fiber Composites, Part 1 : - Polyester Resin Matrix. In *Wiley Periodicals*. (2009), Vol. 112, pp. 489-495.
- 3) Deshpande, Abhijit P., Rao, M. Bhaskar et Rao, C. Lakshmana. Extraction of Bamboo Fibers and Their Use as Reinforcement in Polymeric Composites. In *Journal of Applied Polymer Science*. 2000, Vol. 76, pp. 83-92.
- 4) Djamil, Sofyan ; Suardana, NPG ; Irawan, Agustinus Purna ; Sugita, IKG et Tanujaya, Harto 2020. Flexural properties of bamboo strip composites on lamina configuration. (2020), 852. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*.
- 5) Jain, Seema, Jindal, U. C. et Kumar, Rakesh. Development and fracture mechanism of the bamboo/polyester resin composite. In *Journal of Materials Science Letters*. (1993), Vol. 12, 8.
- 6) Jayabal, S ; Sathiyamurphy, S. ; Loganathan, K T et Kalyanasundaram, S. Effect of soaking time and concentration of NaOH solution on mechanical properties of coir-polyester composites. [éd.] *Indian Academy of Science*. In *Bull. Mater. Sci.* (2011), Vol. 35, 4, pp. 567-574.
- 7) Jayabal, S. et Natarajan, U. Influence of fiber parameters on tensile, flexural, and impact properties of nonwoven coir-polyester composites. In *Int J Adv Manuf Technol*. (2011), pp. 639-648.
- 8) Jayasekara, Chitrangami et Amarasinghe, Nalinie. *Coir - Coconut Cultivation, Extraction and Processing Coir*. [éd.] Jörg Müssig. s.l. : John Wiley & Sons Ltd, (2010). ISBN : 978-0-470-69508-1.
- 9) Kim, Hyojin ; Okubo, Kazuya ; Fujii, Toru et Takemura, Kenichi. Influence of fiber extraction and surface modification on mechanical properties of green composites with bamboo fiber. In *Journal of Adhesion Science and Technology*. (2013), Vol. 27, 12, pp. 1348-1358.
- 10) Manalo, A. C. et Karunasena, W. Mechanical properties of bamboo fiber-polyester composites. [éd.] *Taylor & Francis Group*. In *Materials to Structures*. (2013), pp. 519-524.

- 11) Melkamu, Agernew, Kahsay, Mulu et Tesfay, Abrha Gebregergs. Mechanical and water-absorption properties of sisal fiber (*Agave sisalana*)-reinforced polyester composite. [éd.] Taylor & Francis. In *Natural Fibers*. (2018).
- 12) Monteiro, Sergio Neves ; Margem, Frederico Muylaert ; Martins, Lucas Barboza de Souza ; Loiola, Romulo Leite et Oliveira, Michel Picanço. Tensile strength of polyester matrix composites reinforced with giant bamboo (*dendrocalamus giganteus*) fibers. In *Materials Science Forum*. (2014), Vol. 775-776, pp. 308-313.
- 13) Omid, Nabinejad ; Sujan, Debnath ; Jack, Kai Beh et Mohammad, Yeakub Ali. Mechanical Performance and Moisture Absorption of Unidirectional Bamboo Fiber Polyester Composite. In *Materials Science Forum*. (2018), Vol. 911, pp. 88-94.
- 14) Phani Sushma, I. S., Vasundhar, B. et Jadadeesh Varma, N. V. Fabrication and experimental evaluation of properties with reinforcement of polyester resin with sisal fibre. [éd.] Elsevier Science. In *Materials Today : Proceedings*. (2018), 5, pp. 27081-27087.
- 15) Prasad, A. V. Ratna et Rao, K. Mohana. Mechanical properties of natural fibre reinforced polyester composites sisal and bamboo. In *Materials and Design*. (2011), Vol. 32, pp. 4658-4663.
- 16) Rao, K. Murali Mohan et Rao, K. Mohana. Extraction and tensile properties of natural fibers : Vakka, date and bamboo. In *Composite Structures*. (2007), Vol. 77, pp 288-295
- 17) Rout, J. ; Misra, M. ; Tripathy, S. S. ; Nayak, S. K. et Mohanty, A. K. The influence of fibre treatment on the performance of coir-polyester composites. [éd.] Elsevier Science. In *Composites Science and Technology*. (2001), Vol. 61, 9, pp. 1303-1310.
- 18) Sreekumar, P. A. ; Joseph, Kuruvilla ; Unnikrishnan, G. et Thomas, Sabu. A comparative study on mechanical properties of sisal-leaf fibre-reinforced polyester composite prepared by resin transfer and compression molding techniques. In *Composites Science and Technology*. (2007), Vol. 67, pp. 453-461.
- 19) Sydenstricker, Thais H. D., Mochnaz, Sandro et Amico, Sandro C. Pull-out and other evaluations in sisal-reinforced polyester biocomposites. In *Polymer Testing*. (2003) Vol. 22, pp. 375-380.
- 20) Tsinghua University et International Bamboo and Rattan Organization. Remote Sensing-Based Regional Bamboo Resource Assessment Report of Madagascar. China : s.n., (2018).

- 21) Verma, C. S. et Chariar, V. M. Development of layered bamboo composite and their mechanical properties. In *Composites*. (2011), Vol. 43, pp. 1063-1069.
- 22) Zakikhani, Parnia ; Zahari, R. ; Sultan, M. T. H. et Majid, D. I. Extraction and preparation of bamboo fibre-reinforced composites. In *Materials and Design*. (2014), Vol. 63, pp. 820-828.

TRAITEMENT PAR CRAQUAGE CATALYTIQUE DES DECHETS D'HYDROCARBURES

par

RAKOTO-HARINOSY Manoa H.⁽¹⁾, RASAMIMANANA Faravololona⁽²⁾,
RANDRIANA Nambinina R.⁽¹⁾, RABIBISOA Daniel⁽¹⁾,
RAKOTOSAONA Rijalalaina⁽¹⁾, RATSIMBA Marie H.⁽¹⁾

(1) Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA),
Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Société Vohitra Environnement

RESUME

Madagascar produit annuellement 20 000 tonnes de déchets d'hydrocarbures en moyenne alors que leur gestion et traitement restent encore à explorer. La société AKSAF POWER Ambohimambola recherche des procédés pour traiter ses huiles de vidange et ses résidus de purification d'huile lourde. Les déchets résultant du transport fluvial des produits pétroliers de l'ancienne raffinerie SOLIMA (SOLItany Malagasy) Toamasina sont encore tout simplement stockés, faute de procédés de traitement. L'objectif de cette recherche est de trouver le traitement approprié pour ces déchets. Le traitement par craquage catalytique a été choisi afin d'obtenir des produits de qualité. Un nouvel appareillage a été conçu pour permettre le craquage catalytique, puis la condensation des vapeurs. Les résultats d'analyse ont donné des produits similaires à l'essence et au gasoil. De l'eau et du bitume ont aussi été obtenus après le craquage de certains déchets. Cette étude participe à l'atteinte du douzième Objectif du Développement Durable (ODD) « Consommation et production responsables » car elle peut apporter sa contribution à la valorisation et la diminution des déchets d'hydrocarbures.

Mots clés : Craquage catalytique, Déchet, Hydrocarbure, Distillation, Essence, Gasoil, Madagascar

ABSTRACT

Madagascar produces an average of 20 000 tons of hydrocarbon waste annually, although the management and treatment of this waste has yet to be explored. The society AKSAF POWER Ambohimambola is looking for processes to treat its waste oil and heavy oil purification residues. The waste resulting from the river transport of petroleum products from the former SOLIMA Toamasina refinery is still quite simply

stored, due to the lack of treatment processes. The objective of this research was to find the appropriate treatment for this waste. Catalytic cracking treatment was chosen in order to obtain quality products. New equipment has been designed to allow catalytic cracking and then condensation of the vapors. Analysis results gave products similar to gasoline and diesel. Water and bitumen were also obtained after cracking some wastes. This study contributes to the achievement of the twelfth Objective of Sustainable Development "Responsible consumption and production" because it can make its contribution to the recovery and reduction of hydrocarbon waste.

Keywords : Catalytic cracking, Distillation, Gasoil, Gasoline, Hydrocarbon wastes, Madagascar

INTRODUCTION

Le pétrole, première source d'énergie dans le monde, satisfait 32,57 % des besoins énergétiques et reste la source d'énergie la plus utilisée actuellement. C'est un indicateur important du niveau économique d'un pays (Rossano, 2015). La production, le transport et l'utilisation du pétrole brut et des produits pétroliers génèrent des déchets appelés déchets d'hydrocarbures qui sont très polluants en raison de leurs effets sur la santé et sur l'environnement. A Madagascar, suite à l'évolution de l'importation des hydrocarbures, les déchets sont estimés à plus de 22 280 tonnes par an alors que leur traitement n'est pas encore mis en place (Étude Nationale Madagasikara, 2016). La gestion des déchets d'hydrocarbures n'est pas encore développée à Madagascar. Seules les huiles de vidange sont traitées et les restes sont déversés dans la nature ou stockés. Or, les études de ces déchets classés comme dangereux ont montré qu'ils représentent une menace considérable pour l'environnement ainsi que pour la santé humaine et celle de la faune et de la flore (Le Dorlot, 2000). Comme tout déchet, il existe plusieurs types de déchets d'hydrocarbures (Liu, 2015). Ces déchets peuvent-être éliminés, traités ou valorisés de plusieurs manières, en particulier par le craquage catalytique qui est en plein essor. Dans l'hypothèse que ces déchets d'hydrocarbures pourraient être transformés en carburants et que parmi les procédés existants pour le traitement des déchets d'hydrocarbures, le craquage catalytique donnerait des carburants de haute qualité, l'objectif du présent travail est de les traiter par craquage catalytique. Quatre types de déchets provenant d'industries de production d'électricité et de raffinerie pétrolière ont été traités dans cette étude : «used oil », «sludge», «slop» et «huile de vidange».

MATERIELS ET METHODES

La méthodologie suivie pour mener cette étude a été divisée en trois grandes étapes : l'analyse des échantillons de déchets d'hydrocarbures, la conception de l'appareillage suivie des essais de traitement, et l'analyse des produits obtenus.

Types de déchets d'hydrocarbure traités

Dans cette recherche, quatre types de déchets ont été traités : «Used oil», «sludge», «Huile de vidange» et «Slop».

Used oil

C'est une huile usagée obtenue après vidange des moteurs électriques de AKSAF POWER, société productrice d'électricité à Madagascar. Ce dernier produit jusqu'à 24 tonnes de ce type de déchets par mois.

Sludge

C'est un autre type de déchets d'hydrocarbures provenant de AKSAF POWER : résidu du traitement de l'huile lourde de Tsimiroro utilisée par la société pour alimenter les moteurs électriques. En effet, AKSAF POWER utilise l'huile lourde de Tsimiroro comme combustible pour les moteurs (Andrianimanana, 2008). AKSAF POWER produit mensuellement 24 tonnes de ce type de résidu d'hydrocarbures.

Huile de vidange

L'huile de vidange concernée dans cette étude est celle de la société JIRAMA (Jiro sy RAno Malagasy). Elle est de la même nature que le « used oil », mais la JIRAMA utilise le DISOLA comme huile lubrifiante des moteurs électriques. A titre d'exemple, la station JIRAMA d'Ambatondrazaka, produit à elle seule 2 400 litres de ce type de déchets par mois.

Slop

Le « Slop » est un type de déchet d'hydrocarbures résultant du transport fluvial du pétrole brut ou des produits pétroliers. À Madagascar, l'ancienne raffinerie SOLIMA à Toamasina avait produit 8000 m³ de ce déchet qui sont depuis stockés à Toamasina dans de grandes cuves sans couvercle. Ce type de déchet est alors soumis à toutes les intempéries et à la poussière.

Analyse des échantillons des déchets d'hydrocarbure

Dans le but de comprendre le comportement des différents déchets, divers paramètres physico-chimiques ont été analysés dans les laboratoires de l'OMNIS Madagascar (Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques) :

- viscosité cinématique à 50°C : les matériels qui ont été utilisés sont constitués essentiellement par un bain thermostatique muni d'un thermomètre, d'un tube viscosimètre et d'un chronomètre ;
- densité à 25°C, mesurée après les différents pesages : pycnomètre à vide, pycnomètre avec l'échantillon, pycnomètre avec l'échantillon et l'eau distillée (méthode ASTM D 1298) ;

- point d'éclair : c'est la température minimale à laquelle il faut porter la prise d'essai pour que les vapeurs émises s'allument momentanément en présence d'une flamme, dans les conditions normalisées. L'appareillage qui a été utilisé lors de cette étude est appelé PENSKEY-MARTENS ;
- teneur en eau des sédiments : la méthode qui a été utilisée est la centrifugation ou BSW (Base Sédiment Water). Le matériel comprend une centrifugeuse avec un bain chauffant. Le toluène est le réactif utilisé ;
- résidu CONRADSON : une masse connue du produit à examiner a été introduite dans un creuset convenable et a subi la combustion et la pyrolyse. Après refroidissement, le résidu obtenu a été pesé ;
- SARA (Saturés, Aromatiques, Résines, Asphaltènes) : détermination de la quantité de ces 4 composés, par la précipitation des asphaltènes puis la CCM (Chromatographie en Couche Mince).

Conception de l'appareillage

Pour le traitement par craquage catalytique des déchets d'hydrocarbures, un appareillage a été conçu avec des matériaux résistants au choc thermique et à la contrainte mécanique.

L'appareillage est composé des éléments suivants :

- Le bouilleur : réservoir en acier inoxydable, épais de 2 ou 3 mm dont la capacité est de 7 litres, muni d'un manomètre et d'une sonde de la température ;
- Le système de condensation : échangeur tubulaire simple, en acier inoxydable avec une épaisseur de 1 mm, permettant la circulation à contre-courant ;
- Le Système de chauffage : réchaud à gaz butane comme source de chaleur ;
- Le Système d'isolation thermique : moule cylindrique contenant une couche de polyuréthane pour minimiser la perte de chaleur ;
- Le Thermocouple K permettant de mesurer les températures de -200°C à 1350°C avec amplificateur MAX31855 pour la conversion de la mesure analogique en signal numérique ;
- La colonne du catalyseur en acier inoxydable. Elle comporte deux compartiments, l'un est la partie où est introduit le catalyseur et l'autre sert à chauffer la colonne. Le but du chauffage est d'éviter le reflux des vapeurs d'hydrocarbures craquées. En tenant compte du débit volumique de la vapeur, le volume du catalyseur est 0,37 litres ;
- Le système de refroidissement d'eau à circuit fermé, comprend un radiateur, un ventilateur et une pompe pour assurer la circulation de l'eau.

La photo 1 montre l'appareillage conçu.

Colonne du catalyseur



Photo 1 : Appareillage pour le craquage catalytique des déchets d'hydrocarbures

Essais de traitement

Les étapes de traitement qui ont été suivies sont résumées dans la Figure 1.

Pour obtenir un produit plus clair, la filtration a été nécessaire. Dans le cas de la présente étude, un papier filtre de 7 μ ma été utilisé, avec une pompe sous vide pour accélérer la vitesse de filtration.

Les différents essais de traitement qui ont été menés sont résumés dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Les essais de traitement

Désignation	ESSAI N°1	ESSAI N°2	ESSAI N°3	ESSAI N°4
Produit à traiter	Used oil AKSAF POWER	Sludge AKSAF POWER	Huile vidange JIRAMA	SLOP
Volume de l'alimentation (L)	4	4	-	-
Masse de l'alimentation (Kg)	3,860	3,6	2,9	3,9
Masse du catalyseur utilisé (Kg)	0,33	0,33	0,6	0,33
Masse du résidu (Kg)	0,299	2,2	-	-
Durée de distillation (Heure)	8	6	8	6
Masse du gaz butane utilisé (Kg)	1,422	0,7	0,8	1,302

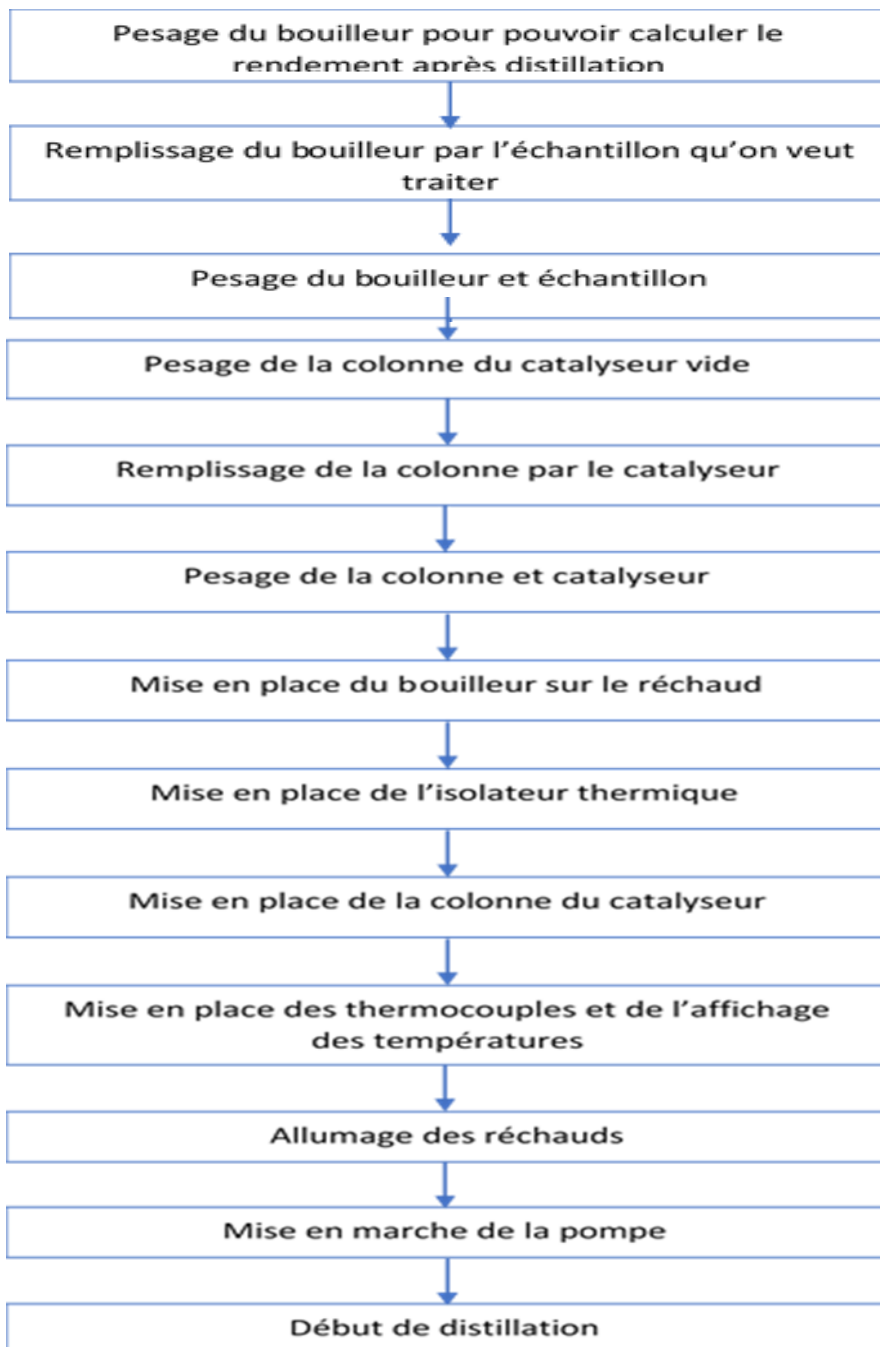


Figure 1 : Mode opératoire des essais de traitement des déchets

Analyse des produits obtenus

Les résultats des analyses proviennent du laboratoire Chimie Madagascar conformément aux normes internationales ASTM (Tableau 2).

Tableau 2 : Normes ASTM

Paramètres	Normes
Densité	ASTM D 1298
Distillation	ASTM D 86
Point initial	
Distillation à 365°C, vol %	
Point final	
Teneur en eau	ASTM D 95
BSW	ASTM D 96
Viscosité	ASTM D 445
Point d'éclair	ASTM D 3278
Teneur en Soufre	ASTM D 2784
Vapor Pressur Reid at 37.8°C	ASTM D 323
Comptage des particules	ISO 4407

RESULTATS

Résultats d'analyse des déchets d'hydrocarbure

Les résultats d'analyse des échantillons sont donnés dans le Tableau 3.

Les densités

Pour le « usedoil » et l'huile de vidange, les densités correspondent bien à la classe des huiles usagées tandis que celles de « Sludge » et « Slop » dépassent 1. Ceci est dû à la forte présence de sédiments dans ces échantillons qui entraînent l'augmentation de leurs masses volumiques car les sédiments sont des impuretés comme des sables ou des métaux lourds.

Les viscosités

Les viscosités de « used oil » et « huile de vidange » sont presque les mêmes que celles des huiles moteurs usagées, ces échantillons peuvent se coller à la température ambiante. Pour le « sludge », il a une viscosité très élevée, donc très visqueux. Le « sludge » nécessite un préchauffage pour être collé ou manipulé. La viscosité du « slop »

est quasiment impossible à déterminer car il se présente presque sous forme solide, aussi il a été nécessaire de le préchauffer avant sa manipulation.

Tableau 3 : Les résultats d'analyse des échantillons

Paramètres	Échantillons							
	Used Oil		Sludge		Huile de Vidange		Slop	
Viscosité Cinématique à 50°C (cst)	123,349		531,1296		150		-	
Densité à 25°C	0,9799		1,0392		0,915		1,0085	
Point d'éclair (°C)	>143		>105		>145		>100	
Teneur en eau (%)	<0,025		<0,025		Trace		2%	
Teneur en sédiment (%)	0		5		0		4	
Résidu CONRADSON (%)	7,907		14,641		5,32		13,105	
SARA (%)	Saturés	21,5	Saturés	17,6	Saturés	19,7	Saturés	17,5
	Aromatiques	27,2	Aromatiques	30,4	Aromatiques	47	Aromatiques	12,3
	Résines	35,6	Résines	23,2	Résines	29,7	Résines	16,3
	Asphaltènes	15,7	Asphaltènes	29,8	Asphaltènes	3,57	Asphaltènes	53,9

Le Point d'éclair

Les vapeurs libérées par l'échantillon « slop » ont explosé lors de l'application d'une flamme à une température <100°C ; l'échantillon « sludge » à moins de 105°C, l'échantillon « usedoil » à moins de 143°C et l'huile de vidange à moins de 145°C. Tout ceci a montré que leur manipulation n'était pas très dangereuse vis-à-vis de l'inflammabilité, car leurs points d'éclair sont tous supérieurs à 100°C, néanmoins il a toujours fallu être prudent lors de la manipulation.

La teneur en sédiments

Les échantillons « used oil » et « huile de vidange » n'ont pas renfermé de sédiments tandis que les « sludge » et « slop » ont contenu respectivement 5% et 4%. Pour le « sludge », ceci est dû à son origine qui est celle de l'huile lourde de Tsimiroro qui renferme jusqu'à 1,666% de sédiments. Les sédiments qui ont été retrouvés dans le « slop », proviennent du fait qu'il a été stocké à l'air libre d'où les poussières et autres impuretés. Ces valeurs importantes en sédiments ont augmenté leur masse volumique d'où des densités très élevées.

Le résidu CONRADSON

D'après le résidu CONRADSON, il est apparu que les échantillons « slop » et « sludge » ont une teneur en métaux lourds élevée.

Séparation par familles d'hydrocarbures : Saturés, Aromatiques, Résines, Asphaltènes (S.A.R.A)

Les échantillons « sludge » et « slop » ont montré une teneur en asphaltènes très élevée augmentant ainsi leur viscosité. D'ores et déjà, il est envisageable que ces échantillons auront tendance à former du bitume après distillation. L'huile de vidange a été très intéressante car elle a présenté jusqu'à 46% d'hydrocarbures aromatiques. La teneur en hydrocarbures saturés était presque la même pour les 4 échantillons.

Résultats du craquage catalytique de « Used Oil »

Deux phases ont été mises en évidence. Sur la base de leur température d'évaporation, il apparaît que la première phase était de l'essence avec un rendement de 26%, et la deuxième du gasoil de rendement 71,45%.

Résultats d'analyse de l'essence E1

Théoriquement, l'intervalle de température de la première phase a pu être comparée à celle de l'essence sans plomb, mais un peu plus élevé. Aussi, ce sont les paramètres de spécification de l'essence qui ont servi à la caractérisation de la première phase. Les résultats d'analyse de l'essence E1 sont donnés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Résultats d'analyse de l'essence E1

Paramètres	Unités	Méthode de test	Essence E1
Aspect			Clair, absence d'eau et de particule
Densité	Kg/l	ASTM D 1298	0,790
Distillation			
Point initial			72,5
5%			80,3
10%			86,3
15%			92,1
20%	°C	ASTM D 86	98,6
30%			102,4
40%			115,4
50%			140,2
60%			147,2
70%			151,9

80%			163,7
85%			178,5
90%			198,5
95%			209,1
Point final			240,1
Vapor Pressure, Reid at 37,8°C	KPa		88,5
Teneur en eau	% Vol	ASTM D 95	0,002
BSW		ASTM D 96	0,008
Viscosité	Cst	ASTM D 445	4,2
Teneur en Soufre	ppm	ASTM D 2784	116,8
Comptage des particules	Nb	ISO 4407	0

Résultats d'analyse du gasoil G1

Les résultats d'analyse du gasoil G1 sont donnés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Résultats d'analyse du gasoil G1

Paramètres	Unités	Méthode de test	Gasoil G1
Aspect			Clair, absence d'eau ni particule
Densité	Kg/l	ASTM D 1298	0,830
Distillation		ASTM D 86	
Point initial	°C		162,3
Distillé à 365°C	Vol %		96,5
Point final	°C		289,4
Point d'éclair	°C	ASTM D 3278	48
Teneur en eau	% Vol	ASTM D 95	0,002
BSW		ASTM D 96	0,008
Viscosité	Cst	ASTM D 445	4,2
Teneur en Soufre	ppm	ASTM D 2784	116,8
Pouvoir Calorifique inférieur	Kcal/kg	ASTM D 24	10234
Comptage des particules	Nb	ISO 4407	0

Résultats du craquage catalytique de « Sludge »

Trois produits ont été obtenus lors de la distillation catalytique de l'échantillon « sludge » :

- l'eau, de rendement 23,28 % ;

- un liquide de couleur marron jaunâtre, considéré comme du Gasoil, compte tenu de sa température d'ébullition, noté G2, de rendement 16,62 % ;

- un solide se présentant comme un bitume, de rendement 60 % ;

Les résultats d'analyse du Gasoil G2 sont donnés dans le tableau 6.

Tableau 6 : Résultats d'analyse du Gasoil G2

Paramètres	Unités	Méthode de test	Gasoil G2
Densité à 15°C	Kg/l	ASTM D 1298	0,835
Distillation		ASTM D 86	
Point initial	°C		168,4
Distillé à 365°C	Vol %		96
Point final	°C		280,5
Point d'éclair	°C	ASTM D 3278	50
Teneur en eau	% Vol	ASTM D 95	0,12
BSW		ASTM D 96	0,190
Viscosité	Cst	ASTM D 445	7,1
Teneur en Soufre	ppm	ASTM D 2784	586,5
Pouvoir Calorifique inférieur	Kcal/kg	ASTM D 24	10016
Comptage des particules	Nb	ISO 4407	14

Résultats du craquage catalytique de l'«Huile de vidange»

Un produit très clair de couleur vert jaunâtre dont la température d'ébullition est comprise dans l'intervalle de l'ébullition d'essence a été obtenu après craquage catalytique de l'huile de vidange. Il a été noté essence E3, de rendement 94,18 %. Les résultats d'analyse de cette essence E3 sont donnés dans le tableau 7.

Tableau 7 : Résultats d'analyse de l'essence E3

Paramètres	Unités	Méthode de test	Essence E3
Aspect			Clair, absence d'eau ni particule
Densité	Kg/l	ASTM D 1298	0,782
Distillation			
Point initial			42,3
5%			55,9
10%			68,4
15%			73,7
20%			79,1
30%			85,0
40%			90,2
50%	°C	ASTM D 86	119,6
60%			126,8
70%			132,0
80%			141,5
85%			158,2
90%			163,4
95%			175,1
Point final			185,0
Vapor Pressure, Reid at 37.8°C	KPa		84,9
Teneur en eau	% Vol	ASTM D 95	0,06
BSW		ASTM D 96	0,01
Viscosité	Cst	ASTM D 445	3,1
Teneur en Soufre	ppm	ASTM D 2784	189,14
Comptage des particules	Nb	ISO 4407	0

Résultats du craquage catalytique de «Slop»

Comme pour le « sludge », trois types de produits ont été obtenus : l'eau de rendement 51,73%, un liquide de couleur marron clair de rendement 26,36 % ayant les caractéristiques du gasoil G4, et un solide qui fond avec la température : le bitume de rendement 21,9 %. Les résultats d'analyse du Gasoil G4 sont donnés dans le Tableau 8.

Tableau 8 : Résultats d'analyse du Gasoil G4

Paramètres	Unités	Méthode de test	Gasoil G4
Densité à 15°C	Kg/l	ASTM D 1298	0,845
Distillation		ASTM D 86	
Point initial	°C		174,3
Distillé à 365°C	Vol %		96,7
Point final	°C		298,6
Point d'éclair	°C	ASTM D 3278	53,5
Teneur en eau	% Vol	ASTM D 95	0,25
BSW		ASTM D 96	0,34
Viscosité	Cst	ASTM D 445	6,5
Teneur en Soufre	ppm	ASTM D 2784	586,9
Pouvoir Calorifique inférieur	Kcal/kg	ASTM D 24	10002
Comptage des particules	Nb	ISO 4407	10

DISCUSSIONS

Discussion sur la méthode

Parmi les procédés existants pour le traitement des déchets d'hydrocarbures, le craquage catalytique a été choisi car il donne des carburants de haute qualité. La centrifugation permet juste de séparer l'eau des hydrocarbures : ce n'est qu'une opération unitaire dans le traitement (Peuker U. et Stahl W., 2014). L'incinération permet l'élimination mais présente des risques de pollution et de rendement énergétique très faible (Christelle Hatik, 2015). Le procédé le plus proche du craquage catalytique était la distillation sous vide mais elle n'a pas permis d'obtenir la qualité recherchée en carburants produits. La distillation azéotropique hétérogène a présenté un rendement de séparation eau-HC élevé mais a nécessité une deuxième distillation pour avoir des carburants, donc un coût de revient important. De plus, ce procédé a besoin de l'extractant d'eau, ce qui s'ajoute également au coût déjà élevé du processus (Lucena E. et *al.*, 2003). D'autre part, le procédé par craquage catalytique a permis d'obtenir des carburants commercialisables.

Discussion sur les résultats

Le Tableau 9 montre la comparaison des paramètres physico-chimiques des essences obtenues avec les normes des hydrocarbures appliquées à Madagascar.

Tableau 9 : Comparaison des paramètres des essences obtenues avec les normes à Madagascar

Paramètres	Unités	Spécifications malagasy	Essence E1	Essence E3
Densité	Kg/l	0,71-0,785	0,790*	0,782
Distillation	°C			
Point initial		36-40	72,5*	42,3*
5%			80,3	55,9
10%		65 max	86,3*	68,4*
15%			92,1	73,7
20%			98,6	79,1
30%			102,4	85,0
40%			115,4	90,2
50%		115max	140,2*	119,6*
60%			147,2	126,8
70%			151,9	132,0
80%			163,7	141,5
85%			178,5	158,2
90%		185 max	198,5*	163,4
95%			209,1	175,1
Point final		215 max	240,1*	185,0
Vapor Pressure, Reid at 37.8°C	KPa	45-90	88,5	84,9
Teneur en eau	% Vol	0,05	0,002	0,04
BSW		0,01	0,008	0,01
Viscosité	Cst	1,6-5,6	4,2	3,1
Teneur en Soufre	ppm	200 ppm max	116,8	189,14
Comptage des particules	Nb	-	0	0

Pour les gasoils, le Tableau 10 compare les paramètres physico-chimiques avec les normes des hydrocarbures appliquées à Madagascar

Tableau 10 : Comparaison des paramètres des gasoils obtenus avec les normes à Madagascar

Paramètres	Unités	Spécifications malagasy	Gasoil G1	Gasoil G2	Gasoil G4
Densité à 15°C	Kg/l	0,810-0,890	0,830	0,835	0,845
Distillation					
Point initial	°C	180-200	162,3*	168,4*	174,3*
Distillé à 365°C	Vol %	90min	96,5	96	96,7
Point final	°C	385max	289,4	280,5	298,6
Point d'éclair	°C	55min	48*	50*	53,5*

Teneur en eau	% Vol	0,05max	0,002	0,12*	0,25*
BSW		0,01max	0,008	0,190*	0,34*
Viscosité	Cst	1,5-5,6	4,2	7,1	6,5
Teneur en Soufre	ppm	500 ppm max	116,8	586,5*	586,9*
Pouvoir Calorifique inférieur	Kcal/kg	Min 9500	10234	10016	10002
Comptage des particules	Nb	-	0	14	10

La comparaison des résultats avec les normes appliquées à Madagascar, a permis de constater que, les valeurs des caractéristiques des essences obtenues se rapprochent des valeurs admissibles à Madagascar, à l'exception des valeurs de distillation qui dépassent les normes. Ceci est dû à la présence d'une quantité significative de gasoil dans le produit, ce qui le rend un peu lourd par rapport à l'essence normale (Bouderhem, 2011). Pour l'essence obtenue à partir de l'échantillon E1, la densité, le point initial et le point final dépassent les normes, c'est la présence de gasoil dans l'essence qui provoque ces effets.

Pour les gasoils obtenus, la meilleure qualité de gasoil a été obtenue par la distillation du premier échantillon, seulement, le point initial et le point d'éclair ont dépassé les normes des hydrocarbures appliquées à Madagascar et ce, à cause de la présence d'essence dans les gasoils obtenus.

Les essences obtenues peuvent être utilisées dans des moteurs simples comme les groupes électrogènes, motopompes, etc. mais aussi dans des chaudières ou four à combustibles. Elles ne sont pas adaptées à des moteurs compliqués comme les automobiles ou les motos à cause de la présence de gasoil. Le gasoil G1 est aussi utilisable pour les moteurs diesel des motoculteurs ou des groupes électrogènes diesel. Par contre, les gasoils issus des deuxièmes et troisièmes essais ne sont utilisables que dans les chaudières ou fours, à cause de la présence d'eau et de sédiments qui peuvent abîmer les moteurs.

CONCLUSION

L'intérêt de ce du présent travail a été d'apporter des solutions pour l'utilisation des déchets d'hydrocarbures. Un appareil permettant la distillation catalytique de ces déchets a été conçu et le processus de traitement a été mis au point. Le contrôle de la température a été très important dans le cas de la distillation des déchets d'huile. En outre, le temps est un paramètre non négligeable, tant dans la conception de l'appareil que lors d'essais réalisés en laboratoire. La distillation catalytique de quatre

échantillons de déchets d'hydrocarbures a fourni les huiles « Used Oil, Sludge, Huile de Vidange et Slop », de l'eau, de l'essence, du gasoil et du bitume. L'analyse au laboratoire des distillats a montré que 80% des paramètres des essences obtenues respectent les normes, 63% pour les gasoils obtenus. Ces essences peuvent être utilisées pour les groupes électrogènes, motopompes, les chaudières ou four à combustibles. Ces gasoils sont, également, utilisables pour les groupes électrogènes diesel, les chaudières ou les fours. Les résultats des essais effectués sont satisfaisants en rendement, et permettraient, après optimisation, de mettre ce projet à l'échelle pilote pour avoir un meilleur rendement et réaliser des productions dans le futur. Des optimisations plus poussées sur des systèmes de détermination plus précise de la température de distillation seraient nécessaires pour éviter le mélange du gasoil avec l'essence et ce, pour élargir le domaine d'application de ces derniers.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Andrianimanana J. S. (2008). Contribution à l'étude des huiles lourdes de Tsimiroro: caractéristiques physicochimiques et essai de valorisation. Mémoire de fin d'études pour l'obtention de Diplôme d'Etudes Approfondies de Chimie Appliquée à l'Industrie et à l'Environnement. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, 71 pages.
- 2) Boudershem A. (2011). Utilisation des souches bactériennes telluriques autochtones dans la biodétection et la biorémédiation des sols pollués par les hydrocarbures. Université Kasdi Merbah-Ouargla, Département des Sciences de la Nature et de la Vie, 91 pages.
- 3) Etude nationale Madagasikara (2016). Annuaire des Statistiques Environnementales sous le cadre pour le développement des statistiques sur l'environnement. CDSE, 125 p.
- 4) Haddoum S., Selmi E. H., Chitour C. E. (2014). Elaboration des catalyseurs à base de bentonite et de kieselguhr pour le craquage catalytique des coupes pétrolières. In Comptes rendus Chimie Vol. 17, 7- 8. Elsevier-Science, Disponible sur DOI 10.1016 / j. crci.2014.03.017.
- 5) Hatik C. (2015). Proposition de scénarios de gestion raisonnée des déchets en vue de leur valorisation énergétique. Thèse de doctorat en Environnement et Génie Urbain Université de La Réunion, 404 pages.
- 6) LeDorlot E. (2000). Les déchets dangereux : histoire, gestion et prévention. In Natures Sciences Sociétés 8 : 92-93. EDP Sciences, Disponible sur DOI 10. 1016.
- 7) LiuHua Wei, YAO Tian Ju (2015). Usage Urban sludge to closed mine reclamation and slope treatment. In Recherches sur les matériaux avancés, vol 1049-1050, 300-

303, Disponible sur <http://doi.org/10.4028/www.scientific.net%2Famr.1049-1050.300>.

- 8) Lucena E., Verdun P., Aurelle Y. et Secq A. (2003). Nouveau procédé de valorisation des «slops» de raffineries et déchets huileux par distillation hétéroazéotropique. In *Oil & Gas Science and Technology– Rev. IFP*, Vol. 58, No. 3, 360 pages, Éditions Technip.
- 9) Peuker U., Stahl W. (2014). Mechanical-thermal dewatering applying steam centrifugation. In *Génie chimique et technologie* : 25, 368-373. DOI 10.1002, Ed. JohnWiley et Fils.
- 10) Rossano J. (2015). Pétrole et produits pétroliers en Grande-Bretagne. In *Annales de Géographie*, 74 : 335-339. Armand Colin.

ETUDE DE L'ELIMINATION DES BACTERIES DE L'EAU PAR FILTRATION SUR POUZZOLANE

par

RAKOTONDRAZAKA Fenosoa S.⁽¹⁾, RATSIMBA Marie H.⁽¹⁾,
RAZANAJAO Jules M.⁽¹⁾, RANAIVOSON Sahondra O.⁽¹⁾,
RAKOTOSAONA Rijalalaina⁽¹⁾

(1) Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA),
Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Madagascar dispose de plusieurs gisements de pouzzolane, si bien que son utilisation en traitement des eaux, comme matière filtrante devient très fréquente, car elle contribue à l'élimination des bactéries de l'eau. L'objectif de la présente étude est de vérifier cette propriété tout en cherchant, au préalable, de nouveaux traitements pour ce matériau afin d'améliorer son efficacité. Des essais de traitement avec l'eau de surface du Lac Mandrozeza ont été effectués en variant le type de filtres : pouzzolane activée thermiquement, pouzzolane non activée, pouzzolane macérée au préalable avec des bactéries, et combinaisons de chacune de ces variantes de pouzzolane avec le sable. Pour chaque filtration, le volume d'eau utilisée et l'épaisseur du filtre sont gardés les mêmes. L'eau brute et les eaux filtrées subissent ensuite des analyses bactériologiques. Les quatre germes tests indicateurs de la potabilité de l'eau sont analysés par la méthode de filtration sur membrane suivie de culture bactérienne: coliformes totaux, Escherichia Coli, Entérocoques intestinaux et Clostridium sulfito-réducteurs. Les analyses ont montré que le filtre bicouche constitué par la pouzzolane macérée et le sable est très efficace : les coliformes totaux sont éliminés à 97,85 %, et les trois autres germes sont éliminés à 100%. La pouzzolane est alors une matière filtrante efficace dans l'élimination des bactéries de l'eau, pouvant contribuer à l'atteinte du sixième Objectif du Développement Durable (ODD) « Eau propre et assainissement ».

Mots clés : Bactéries, Traitement des eaux, Filtration, Pouzzolane activée, Pouzzolane macérée, Madagascar

ABSTRACT

Madagascar has many deposits of pozzolan so that its use in water treatment, as a filtering material, is becoming very frequent, assuming that it contributes to the elimination of bacteria from the water. The objective of this study is to verify this property while seeking new treatments for this material in order to improve its efficiency. Treatment tests with surface water from Mandrozeza Lake were carried out by varying the type of filters : thermally activated pozzolan, non-activated pozzolan, pozzolan previously macerated with bacteria, and combinations of each of these pozzolana variants with sand. For each filtration, the volume of water used and the thickness of the filter are kept the same. The raw water and filtered water are then subjected to bacteriological analyses. The four test germs indicative of the potability of the water are analysed by the membrane filtration method followed by bacterial culture : total coliforms, *Escherichia Coli*, intestinal enterococci and *Clostridium sulphito-reducing* bacteria. The analyses showed that the two-layer filter consisting of macerated pozzolan and sand is very efficient : total coliforms are eliminated at 97,85%, and the three other germs are eliminated at 100%. The pozzolan is then an effective filtering material in the elimination of bacteria from the water, which can contribute to the achievement of the sixth sustainable development objective "Clean water and sanitation".

Keywords : Activated pozzolan, Bacteria, Filtration, Macerated pozzolan, Water treatment, Madagascar

INTRODUCTION

L'eau est l'une des ressources naturelles les plus indispensables à l'humanité et à tout être vivant. Tout en étant précieuse, sa qualité est délicate et son cycle est très long (Tricart J., 2016). Or, à l'état naturel, elle n'est pas pure, elle peut contenir des algues, des pollens, des virus, des bactéries qu'il faut éviter pour rester en bonne santé (Takahisa H., 2016). Les eaux de surface sont les plus sensibles. La problématique de cette étude est l'élimination des bactéries de l'eau. La filtration sur la pouzzolane a été choisie car c'est une roche volcanique poreuse très disponible à Madagascar. Plusieurs études ont déjà été réalisées sur le sujet, comme celle de Haney B. J. et Steimle S. E. en 2016 ou encore celle de Sylvere N. K. et *al.*, 2018. En 2016, Andriananja H. a étudié l'efficacité du traitement biologique des eaux usées avec de la pouzzolane brute. En 2018, cette même auteure a essayé de filtrer les eaux usées de peinture à travers de la pouzzolane activée chimiquement et celle activée thermiquement. Dans la présente étude, notre objectif est de filtrer l'eau de surface avec différents types de pouzzolane ayant subi des traitements au préalable, en supposant que ceux-ci puissent améliorer l'élimination des bactéries de l'eau.

MATERIELS ET METHODES

Cadre d'étude

Le Lac Mandroseza à Antananarivo est la zone de prélèvement. Jusqu'en 1913, ce lac constitue une source d'eau naturelle issue du fond, après, il est devenu artificiel, alimenté par les eaux de ruissellement des bassins versants avoisinants et par pompage des eaux de la rivière d'Ikopa, à partir du barrage de dérivation au Sud-Est du lac. Il est utilisé par la société JIRAMA (Jiro sy RAno MAlagasy) comme ressource d'approvisionnement en eau potable de la ville d'Antananarivo. La JIRAMA est une société étatique chargée de la distribution de l'eau et de l'électricité à Madagascar.

Ce lac est situé entre les quartiers de Tsiadana, Mandroseza, Ankatso et Ambohipo, dans la zone Sud-Est de la Commune urbaine d'Antananarivo à environ 5 km du centre-ville. Il est de forme ovale, 900 m de longueur maximale et 485m de largeur maximale. Il contient environ de 1 400 000 m³ d'eau sur une superficie de 47 ha avec une profondeur moyenne de 3 m.

Dans la présente étude, les échantillons ont été prélevés pendant la période hivernale où les êtres vivants aquatiques sont, en général, en repos (avril à juin à Madagascar).



Photo 1 : Carte de localisation du Lac Mandroseza [JIRAMA Mandroseza]

Méthodologie

La méthode de recherche peut être divisée en trois grandes étapes :

- Préparation de la matière filtrante : traitements au préalable des pouzzolanes et conception du système de filtration ;
- Essais de filtration ;
- Analyse des eaux brutes et des eaux filtrées.

Préparation des matières filtrantes

a) *Prétraitement des pouzzolanes*

Au cours de cette étude, trois types de pouzzolane ont été préparés :

1er type : la pouzzolane activée thermiquement

2ème type : la pouzzolane brute

3ème type : la pouzzolane sur laquelle des bactéries ont été cultivées au préalable par macération dans de l'eau de rinçage des fruits et légumes.

Pour ces trois types de pouzzolane, les étapes de préparation sont les mêmes :

Broyage : pour rendre plus petite la granulométrie du matériau. Cette étape permet aussi d'augmenter la surface spécifique et le diamètre des pores de la pouzzolane, ce qui pourrait améliorer la qualité de la filtration ;

Tamisage : pour classer la granulométrie des pouzzolanes ;

Traitement spécifique des pouzzolanes broyées et tamisées, on procède, soit à :

- l'activation thermique : cela consiste à favoriser la formation des masses poreuses de la pouzzolane par traitement thermique à 350°C. Pour cette étape, la pouzzolane broyée a été placée dans un four de calcination de laboratoire à 350°C pendant six heures.

- la macération : la pouzzolane broyée a été macérée pendant 24 heures dans l'eau de rinçage des fruits et légumes dans le but de former, au préalable, une couche des bactéries à la surface de la pouzzolane.

b) *Conception du système de filtration*

Au cours de l'étude, différents types de colonne de filtration de 8 cm de diamètre ont été conçus :

- colonne de filtration de poudre de pouzzolane activée thermiquement, de 20cm d'épaisseur ;

- colonne de filtration de poudre de pouzzolane brute, de 20cm d'épaisseur ;

- colonne de filtration de poudre de pouzzolane macérée, de 20cm d'épaisseur ;
- colonne de filtration de poudre de pouzzolane activée et de sable, de 20cm d'épaisseur
- colonne de filtration de poudre de pouzzolane non activée et de sable, de 20cm d'épaisseur ;
- colonne de filtration de poudre de pouzzolane macérée et de sable, de 20cm d'épaisseur.

Pour chaque filtre utilisé, le volume d'eau brute à traiter est fixé à 500 ml.

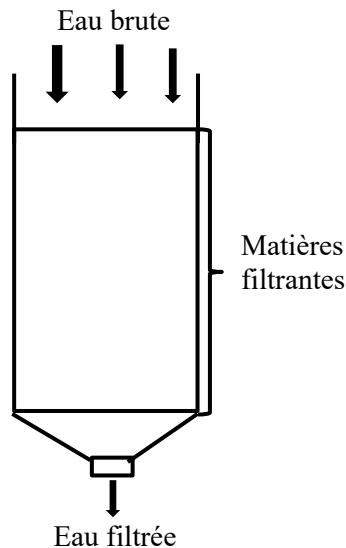


Figure 1 : Schéma de la colonne de filtration

Essais de filtration

Au cours de cette étude, trois séries d'essai de filtration ont été effectuées.

a) *Première série d'essais de filtration : détermination de la granulométrie optimale de la pouzzolane*

La pouzzolane broyée, tamisée, activée à 350°C a été divisée en trois classes de diamètres :

$$800\mu\text{m} < D < 0,4\text{mm}$$

$$250\mu\text{m} < D < 800\mu\text{m}$$

$$100\mu\text{m} < D < 250\mu\text{m}$$

Chaque classe est ensuite utilisée une à une comme couche filtrante.

b) Deuxième série d'essais de filtration

Le but de cette deuxième série d'essais de filtration est de déterminer le type de pouzzolane le plus efficace dans l'élimination des bactéries : pouzzolane activée thermiquement ou pouzzolane brute non activée ou pouzzolane macérée.

c) Troisième série d'essais de filtration

Dans cette série, différents types de filtres ont été utilisés avec une alternation de couches de sable et de pouzzolane, comprenant de bas en haut :

- sable 7cm + pouzzolane activée thermiquement 6 cm + sable 3 cm + pouzzolane activée 4 cm d'épaisseur ;
- sable 7cm + pouzzolane brute 6 cm + sable 3 cm + pouzzolane brute 4 cm d'épaisseur ;
- sable 7cm + pouzzolane macérée 6 cm + sable 3 cm + pouzzolane macérée 4 cm d'épaisseur ;
- sable 20 cm d'épaisseur.

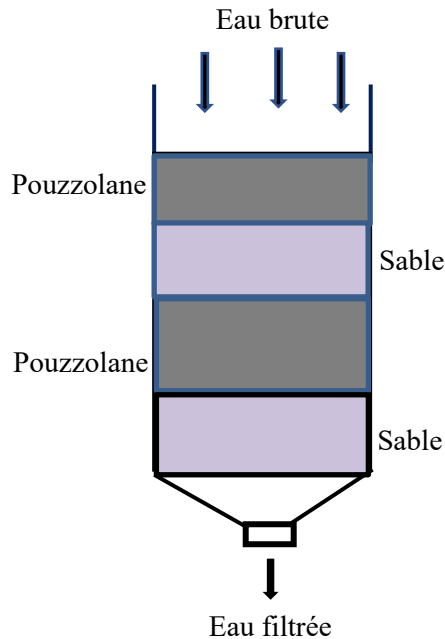


Figure 2 : Colonne filtrante de la troisième série d'essais de filtration

Analyses bactériologiques des eaux

Toutes les analyses bactériologiques des eaux brutes et filtrées ont été effectuées auprès du Laboratoire Qualité Eau de la JIRAMA Mandroseza.

La méthode par filtration sur membrane suivie de culture bactérienne a été utilisée lors de cette analyse. Les quatre germes test de la potabilité de l'eau sont analysés : Coliformes totaux (CT), *Escherichia coli* (EC), Entérocoques intestinaux (EI) et *Clostridium sulfito-réducteurs* (ASR).

a) *Analyse des germes coliformes totaux, Escherichia coli et entérocoques intestinaux*

L'échantillon de 100ml était filtré sur une membrane filtrante placée dans une rampe de filtration. Après filtration, la membrane est placée dans le milieu de culture à 37°C pendant 24 heures dans l'incubateur pour les Coliformes totaux, à 44°C pendant 24 heures pour l'*Escherichia coli* et à 37°C pendant 48 heures pour les Entérocoques intestinaux. (Dégremont, 1989). La présence de ces germes dans l'eau est identifiée par :

- Colonie jaune pour la présence de coliforme totaux ;
- Colonie jaune halo jaune pour la présence de l'*Escherichia coli* ;
- Colonie rouge violacée pour la présence de l'Entérocoque.



Photo 2 : Absence et présence de Coliformes totaux et d'*Escherichia coli*

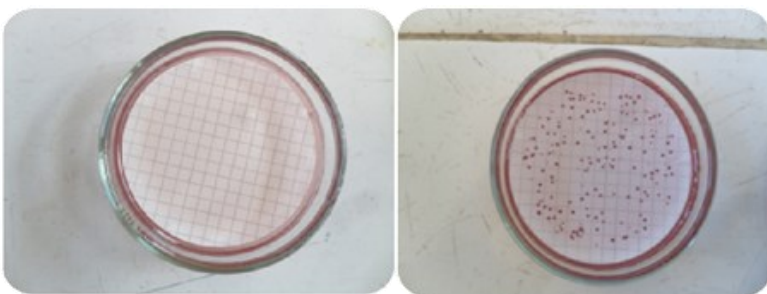


Photo 3 : Absence et présence des Entérocoques

b) *Analyse des germes anaérobies sulfito-réducteurs*

Un échantillon d'eau de 100ml est versé dans un tube à essai chauffé dans un bain marie à 79°C pendant 15 minutes. Puis, il est placé immédiatement dans un bain d'eau froide. Ensuite, 20ml de milieu de Diennert et Guillard est ajouté dans cet échantillon

et le tube est bouchonné. Après, le mélange est agité jusqu'à homogénéisation totale et enfin, il est incubé à 37°C pendant 24 heures (Dégremont, 1989).

La présence de ces germes est identifiée par des colonies noires dans le tube à essai et l'eau dans ce tube devient tout noir si ces germes sont indénombrables.

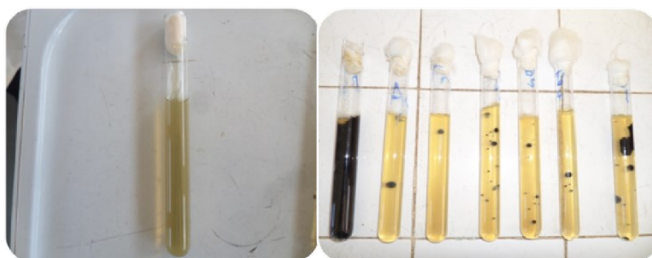


Photo 4 : Absence et présence des anaérobies sulfito-réducteurs

RESULTATS ET DISCUSSION

Résultats d'analyse bactériologique de l'eau brute du Lac Mandrozeza

Le Tableau 1 ci-dessous montre les résultats d'analyse des paramètres bactériologiques de l'eau brute du lac.

Tableau 1 : Résultat des analyses bactériologiques de l'eau brute du lac

Date de prélèvement	Bactéries	Nombres
09/04/2018	CT	$2,3 \cdot 10^2$
	EC	$0,4 \cdot 10^2$
	EI	$2 \cdot 10^2$
	ASR	Indénombrable
07/05/2018	CT	$7,5 \cdot 10^2$
	EI	$0,4 \cdot 10^2$
	EC	$1,8 \cdot 10^2$
	ASR	Indénombrable
04/06/2018	CT	$9,3 \cdot 10^2$
	EI	$0,4 \cdot 10^2$
	EC	$3,6 \cdot 10^2$
	ASR	Indénombrable

Le *CT* et l'*ASR* sont les bactéries les plus abondantes dans l'eau du Lac Mandrozeza. Elles proviennent des matières fécales humaines et animales, des matières organiques en voie de putréfaction et des tellures. Tout ceci est causé par le pompage du fleuve de l'Ikopa pour alimenter le lac. Ce fleuve est pollué par les différentes activités humaines (lessivage, déchets, débris organiques, ...), par les rejets

des eaux usées des villages qui s'infiltrent dans le lac et par les rejets des eaux usées des industries environnantes.

Les *CT* sont les bactéries plus difficiles à éliminer, tandis que les *ASR* sont les plus faciles. Cette difficulté peut être à l'origine des saletés que nous avons rencontrées durant la filtration et durant l'analyse. L'on pourrait, également, imaginer que l'épaisseur de la couche n'est pas suffisante à la capture de *CT*.

Détermination de la granulométrie optimale

Le Tableau 2 suivant montre les résultats d'analyse des paramètres organoleptiques et bactériologiques de l'eau filtrée, à travers les trois classes de granulométrie de la pouzzolane activée.

Tableau 2 : Résultats de la première série d'essais de filtration

Paramètres	Eau brute	Filtre 1	Filtre 2	Filtre 3	Abattement du traitement (%)		
					F1	F2	F3
Aspect	Peu trouble	Clair	Clair	Clair	Efficace	Efficace	Efficace
Odeur	Absent	Absent	Absent	Absent	Efficace	Efficace	Efficace
Couleur	Jaune	Aucune	Aucune	Aucune	Efficace	Efficace	Efficace
CT	$2,3 \cdot 10^2$	$1,2 \cdot 10^2$	$0,8 \cdot 10^2$	$0,5 \cdot 10^2$	47,83	65,22	78,26
EC	$0,4 \cdot 10^2$	$0,3 \cdot 10^2$	$0,26 \cdot 10^2$	$0,15 \cdot 10^2$	25	35	62,5
EI	$2 \cdot 10^2$	$1,4 \cdot 10^2$	$0,93 \cdot 10^2$	$0,7 \cdot 10^2$	30	53,5	65
ASR	Indénombrable	$2 \cdot 10^0$	$2 \cdot 10^0$	$3 \cdot 10^0$	99,98	99,98	99,97
<i>Filtre 1 : pouzzolane activée $800\mu\text{m} < D < 0,4\text{mm}$</i> <i>Filtre 2 : pouzzolane activée $250\mu\text{m} < D < 800\mu\text{m}$</i> <i>Filtre 3 : pouzzolane activée $100\mu\text{m} < D < 250\mu\text{m}$</i>							

Sur les trois granulométries, compte tenu des taux d'abattement des bactéries après filtration, l'on peut dire que le filtre N°3 : $100\mu\text{m} < D < 250\mu\text{m}$ est le plus efficace au niveau de l'élimination des bactéries. Cette granulométrie est en accord avec celle utilisée par Andriananja H. lors des essais de filtration des eaux usées avec la pouzzolane (Andriananja, 2018). Lorsque le diamètre de la pouzzolane est petit, la vitesse de la filtration est faible, c'est-à-dire le débit est faible. Le temps de contact entre les matériaux filtrants et l'eau du lac à filtrer est plus long, ce qui renforce encore l'efficacité du filtre. Plus la taille des poudres de la pouzzolane est grande, plus il y aura beaucoup d'espace libre, la vitesse d'écoulement est alors élevée. Cette augmentation de la vitesse provoque une augmentation du débit de filtration, et les bactéries sont peu éliminées. En effet, elles n'ont pas beaucoup de temps pour

rejoindre les pores, elles atteignent immédiatement les espaces libres sur les matières filtrantes et suivent l'écoulement de l'eau à filtrer.

Avec la granulométrie optimale, le taux d'abattement de bactéries est à 78,26% pour le *CT*, 62,5% pour l'*EC*, 65% pour l'*EI* et 99,97 pour l'*ASR*.

Comparaison de l'efficacité des trois types de pouzzolane

Tableau 3 : Comparaison de l'efficacité des trois types de pouzzolane

Paramètres	F3		F4		F5		Abattement du traitement (%)		
	Eau brute	Eau filtrée	Eau brute	Eau filtrée	Eau brute	Eau filtrée	F3	F4	F5
Aspect	Peu trouble	Clair	Peu trouble	Peu trouble	Peu trouble	Clair	Efficace	Efficace	Efficace
Odeur	Absente	Absente	Absente	Absente	Absente	Absente	Efficace	Efficace	Efficace
Couleur	Jaune	Aucune	Jaune	Jaune claire	Jaune	Aucune	Efficace	Efficace	Efficace
CT	$2,3.10^2$	$0,5.10^2$	$7,5.10^2$	$0,8.10^2$	$7,5.10^2$	$0,4.10^2$	78,26	89,33	94,67
EC	$0,4.10^2$	$0,15.10^2$	$0,4.10^2$	$0,1.10^2$	$0,4.10^2$	-	62,5	75	100
EI	2.10^2	$0,7.10^2$	$1,8.10^2$	$0,52.10^2$	$1,8.10^2$	$0,2.10^2$	65	71,11	88,89
ASR	in	3.10^0	in	2	in	-	99,97	99,99	100

Filtre 3 pouzzolane activée, Filtre 4 : pouzzolane brute, Filtre 5 : pouzzolane macérée. La granulométrie de la pouzzolane de ces filtres est celle qui est optimale : $100\mu\text{m} < D < 250\mu\text{m}$

D'après ce tableau, les taux d'élimination des bactéries, en utilisant le filtre à pouzzolane macérée de bactéries, sont plus importants (94,67% de *CT*, 100% de *EC*, 88,89% de *EI* et 100% de *ASR*) par rapport à ceux de pouzzolane brute et de pouzzolane activée thermiquement. Si les pouzzolanes contiennent des bactéries avant de faire la filtration, son aptitude d'adsorption des bactéries augmente. La multitude de colonies bactériennes supportées par les pouzzolanes fournit un important pouvoir de filtration.

La capacité de rétention des bactéries de la pouzzolane activée thermiquement, est inférieure à celle de pouzzolane brute. Cela pourrait être dû à l'insuffisance de la température d'activation, car la température d'activation était de 350°C, alors que ce sont les températures entre 550°C à 980°C qui provoquent la formation des masses poreuses dans les pouzzolanes. Toutefois, les études de Andriananja H. ont,

également, montré cette inefficacité de la pouzzolane activée thermiquement par rapport à celle activée chimiquement (Andriananja H., 2018).

Résultats de la filtration avec les filtres bicouches (sable + pouzzolane) et monocouches (sable)

Le Tableau 4 suivant donne les résultats d'analyses des eaux filtrées à travers la pouzzolane et le sable.

Tableau 4 : Résultats d'analyse des eaux issues des filtres bi-couches

Paramètres	Eau brute	Eau filtrée avec				Rendement de traitement (%)			
		F6	F7	F8	F9	F6	F7	F8	F9
Aspect	Trouble	Clair	Clair	Clair	Clair	Efficace	Efficace	Efficace	Efficace
Couleur	Jaune	Incolore	Incolore	Incolore	Incolore	Efficace	Efficace	Efficace	Efficace
Odeur	Inodore	Inodore	Inodore	Inodore	Inodore	Efficace	Efficace	Efficace	Efficace
CT	$9,3.10^2$	24	26	2	20	97,42	97,21	99,79	97,85
EC	$0,4.10^2$	0	0	0	0	100	100	100	100
EI	$3,6.10^2$	0	0	0	0	100	100	100	100
ASR	in	0	0	0	0	100	100	100	100

N.B. : Filtre F6 : Pouzzolane activée + sable, Filtre F7 : Pouzzolane brute + sable, Filtre F8 : Pouzzolane macérée + sable, Filtre F9 : sable. La granulométrie de la pouzzolane de ces filtres est celle qui est optimale : $100\mu\text{m} < D < 250\mu\text{m}$

Selon les résultats d'analyses bactériologiques de l'eau de lac pour chaque filtre représenté par le tableau ci-dessus, nous constatons que la filtration est plus efficace si le filtre à pouzzolane est combiné avec le sable. En effet, la présence de sable dans la matière filtrante diminue la surface libre entre les matières filtrantes. Le sable prolonge, donc, le temps de contact de ces dernières avec l'eau de lac à filtrer, et ce, selon les lois de filtration dans les études antérieures (Brunhes et Bernard, 1907). Par conséquent, l'aptitude des matières filtrantes à capter les bactéries devient importante et le débit de la filtration devient faible.

Pour l'utilisation de filtre à sable, l'on observe que les taux d'élimination des bactéries sont moins importants par rapport à l'utilisation de filtre bicouche : pouzzolane + sable car la présence de la pouzzolane augmente la porosité des filtres.

Selon la norme des bactéries ($CT=0$, $EC=0$, $EI=0$, $ASR<20$) recommandée par l'OMS, nous pouvons en déduire que le filtre bicouche : sable + pouzzolane macérée, est le plus efficace.

Paramètres de filtration

Le Tableau 5 ci-dessous montre les débits de la filtration pour chaque filtre, afin de connaître le rendement de la filtration.

Tableau 5 : Paramètres de la filtration

Paramètres de la filtration	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9
Aspect de l'eau filtrée	Clair	Clair	Clair	Clair	Clair	Clair	Clair	Clair	Clair
Volume d'eau filtrée (ml)	500	500	500	500	500	500	500	500	500
Durée de la filtration	5min 40 s	7min 5s	10min 15s	11min	11min 30s	20min 25s	21min	20min 10s	18min 15s
Débit de la filtration (l/h)	5,29	4,23	2,93	2,73	2,61	1,47	1,43	1,49	1,64

Les données de ce tableau montrent que :

- la granulométrie de la pouzzolane joue un rôle important dans le débit de filtration. La filtration est rapide en cas de granulométrie élevée, mais la qualité de filtration, c'est-à-dire le taux d'élimination des bactéries, n'est pas satisfaisante. C'est le cas de Filtre F1 : pouzzolane activée $800\mu\text{m} < D < 0,4\text{mm}$ (voir Tableau 2). La qualité de la filtration est meilleure en cas de faible granulométrie. Ceci concorde bien avec les autres études de filtration de l'eau de surface comme celle de Disa-Disa P. et *al.* en 2014.

- la filtration est meilleure en cas de diminution de sa vitesse, surtout quand la pouzzolane est utilisée avec le sable. C'est le cas du filtre bi-couche F8 : pouzzolane macérée de granulométrie $100\mu\text{m} < D < 250\mu\text{m}$ et sable, c'est le filtre le plus efficace dans l'élimination des bactéries de l'eau.

CONCLUSION

Le monde a besoin de solution pour résoudre le problème d'élimination des bactéries dans l'eau de surface. L'intérêt du présent travail est d'étudier l'efficacité de la filtration sur pouzzolane en traitant au préalable ce matériau qui est facilement disponible à Madagascar. Le premier essai de filtration de l'eau de Lac Mandroseza a permis de savoir que la granulométrie requise pour la pouzzolane pour avoir une bonne élimination des bactéries est comprise entre $100\mu\text{m}$ et $250\mu\text{m}$. Le deuxième essai de traitement a montré que cette élimination de bactéries devient importante en cas

d'utilisation de pouzzolane préalablement macérée des bactéries. D'après le troisième essai, la qualité de filtration est encore améliorée en cas d'utilisation simultanée de ce type de filtre avec du sable. Toutefois, cette étude étant portée sur les eaux de surface, reste connaître, le comportement de la pouzzolane avec les autres types d'eau : naturelle ou eaux usées. La présente étude se limite au processus de filtration et aux analyses des paramètres bactériologiques. L'analyse physico-chimique des eaux traitées par filtration sur pouzzolane, l'entretien de ce filtre comme le procédé de lavage à contre-courant ainsi que l'utilisation de la pouzzolane en d'autres procédés de traitement des eaux pourront faire l'objet de recherche future.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Andriananja H. (2016). Etude de l'efficacité du traitement biologique des eaux usées avec de la pouzzolane. Mémoire de fin d'études en vue l'obtention du diplôme de Licence en Génie des Procédés Chimiques et Industriels. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 51 p.
- 2) Andriananja H. (2018). Etude de l'efficacité des filtres à base de pouzzolane pour le traitement des eaux usées. Mémoire de fin d'études en vue l'obtention du diplôme de Master, titre Ingénieur en Génie des Procédés Chimiques et Industriels. Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, 74 p.
- 3) Brunhes et Bernard (1907). Les lois de la filtration à travers des colonnes de sable, et les lois de Ohm. In Journal de Physique Théorique et appliquée. Vol. 6, 1, 194-201, DOI <http://doi.org/10.1051/jphysstap:019070060019401>
- 4) CNEAGR, (2006). Etude de qualité des eaux naturelles. Manuel d'adduction d'Eau Potable dans les milieux ruraux. Tome I, 100p.
- 5) DEGREMONT, (1989), Mémento technique de l'eau. Edition du cinquantenaire, 9ème édition Tome 1 et 2.
- 6) Disa-Disa P. et al (2014). Traitement des eaux de consommation par filtration lente sur sable à plusieurs étapes. In Revue sciences de l'eau Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 27 (3), 259–268. <https://doi.org/10.7202/1027809ar>.
- 7) Haney B. J. et Steimle S.E. (2016). Filtration de l'eau, Approvisionnement en eau potable par filtration ascendante (procédé L'Eau Claire). In American Water Works Association. Vol. 66, 10.2307 / 41266975.
- 8) Sylvere N. K. et al. (2017) Évaluation de la durée d'inoculation d'un biofiltre granulaire de pouzzolane à partir des souches indigènes de bactéries et de levures isolées d'effluent d'industrie de caoutchouc. In Revue de sciences de l'eau, vol. 29, 10.7202/1035714ar.

- 9) Takahisa H. (2016), Étude des matières en suspension dans l'eau naturelle. In Bulletin de la société chimique du Japon, vol. 23, 216-219, 10.1246/bcsj.23.216, Société chimique du Japon.
- 10) Tricart J. (2016). L'eau, ressource précieuse, trop souvent malmenée. In Annales de Géographie, vol. 101, 686-691, 10.2307 / 23453709, Armand Colin.

FORMULATION D'UNE SOUPE BIO-FORTIFIEE DESTINEE AUX FEMMES ENCEINTES DE L'ITASY

par

RATIARIMANANJATOVO Narindra⁽¹⁾, RAFALIMANANTSOA Jules⁽¹⁾,
RANDRIAMANANTENA Andrin'iranto⁽¹⁾, RASOAZANANY Elise⁽²⁾,
LETSARA Rokiman^(1,3), RAKOTONDRAJAO Mampananirina F.⁽¹⁾,
ROBIJAONA R. Baholy⁽¹⁾

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

(2) Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires, Université d'Antananarivo, Madagascar

(3) Département FLORE, Parc Botanique et Zoologique de Tsimbazaza (PBZT), Antananarivo, Madagascar

RESUME

Madagascar est classé quatrième sur le taux de malnutrition chronique à l'échelle mondiale. L'Agenda 2030 pour le développement durable engage tous les gouvernements à agir en faveur de changements universels et intégrés permettant d'éradiquer la faim et la malnutrition d'ici 2030 (ODD 2). Afin de briser le cercle vicieux de la malnutrition chronique il faudra agir surtout durant les 1 000 premiers jours de l'enfant. Il est essentiel de prendre en charge les rations alimentaires de la femme enceinte, car la bonne nutrition de la mère se reflète dans la nutrition de son enfant. Nous avons élaboré une soupe bio-fortifiée afin de compenser les déficits en termes de besoins en micronutriments et protéino-énergétique des femmes enceintes de la région Itasy. Cette étude a été le fruit de la comparaison des 11 études provenant de différents pays. Ce produit tient la première place en tant que source de calcium, de phosphore, de potassium, de manganèse, de zinc et de cuivre. Elle tient la seconde place en considérant l'apport protéique et ferrique et la troisième place en tant que source de magnésium. Lors du screening phytochimique, nous avons noté la présence d'alcaloïdes, de stéroïdes, de flavonoïdes, de leucoanthocyanes, d'anthocyanes et de tanins de type catéchique. Ces facteurs anti-nutritionnels sont des composés végétaux qui réduisent la capacité du corps à absorber les nutriments essentiels. Ils seront éliminés lors de la cuisson. L'échantillon de produit analysé est propre et sain à la consommation humaine d'après ses caractères microbiologiques.

Mots-clés : Bio-fortifiée, Femmes enceintes, Malnutrition chronique, Micronutriments, *Moringa oleifera*

ABSTRACT

Globally, Madagascar is ranked fourth in the rate of chronic malnutrition. The 2030 Agenda for Sustainable Development commits all governments to take action for universal and integrated change to end hunger and malnutrition by 2030 (SDG 2). In order to break the vicious circle of chronic malnutrition, it will be necessary to act especially during the first 1000 days of the child. It is essential to take care of the food rations of the pregnant woman because the good nutrition of the mother is reflected in the nutrition of her child. We have developed a bio-fortified soup to compensate deficits in terms of micronutrients and protein-energy needs for pregnant women of the Itasy region. This study was compared to 11 studies from different countries. This product ranks first as a source of calcium, phosphorus, potassium, manganese, zinc and copper. It takes second place considering protein and iron intake and third place as a source of magnesium. During the phytochemical screening, we noted the presence of alkaloids, steroids, flavonoids, leucoanthocyanins, anthocyanins and catechin-type tannins. These anti-nutritional factors are plant compounds that reduce the body's ability to absorb essential nutrients. They will be removed during cooking. The product sample analyzed is clean and safe for human consumption based on its microbiological characteristics.

Keywords : Bio-fortified, Chronic malnutrition, Micronutrients, *Moringa oleifera*, Pregnant women

INTRODUCTION

Selon la banque mondiale, près d'un enfant sur deux souffre de malnutrition chronique. La Grande Ile est classée quatrième sur le taux de malnutrition chronique à l'échelle mondiale (La Banque Mondiale, 2020). Selon les résultats de l'Enquête par Grappes à Indicateurs Multiples ou Multiple Indicators Cluster Survey (MICS) réalisée en 2018, 42 % des enfants de moins de 5 ans souffrent de malnutrition chronique (MCIS, 2018). Cette malnutrition figure parmi les premières causes de mortalité des enfants. De plus, la crise sociale et économique mondiale sans précédent déclenchée par la pandémie COVID-19 pose de graves risques pour l'état nutritionnel et la survie des jeunes enfants dans les pays à faible revenu et à revenu intermédiaire. Ce qui ne fera qu'accroître ces taux de malnutrition (Haedey D. *et al.*, 2020).

L'Agenda 2030 pour le développement durable engage tous les gouvernements à agir en faveur de changements universels et intégrés permettant d'éradiquer la faim et la malnutrition d'ici 2030 (ODD 2). La période comprise entre le début de la grossesse et les 24 premiers mois de la vie d'un enfant constitue une fenêtre d'opportunité unique dans le cycle de vie pour lutter efficacement contre la malnutrition à court et à long terme (UNICEF, 2019).

L'enfant, pendant ses 1000 premiers jours, est au centre des préoccupations dans la lutte contre toute forme de malnutrition (Martorell R., 2017). La qualité du capital humain de demain dépendra de l'efficacité des soins durant cette période. La mère, dans son rôle de nourrice et protectrice, est également la cible des interventions. La bonne nutrition de la mère se reflète dans celle de son enfant. Dans ce cas, la nutrition des femmes pendant la grossesse est essentielle, car elle conditionne la croissance du fœtus et du nourrisson ainsi que le bon déroulement de la grossesse (PAM, 2015). La grossesse est une condition physiologique exigeante sur le plan nutritionnel. Trois conditions semblent nécessaires au bon développement de cette étape. D'abord une mère devrait être bien nourrie afin de subvenir aux besoins de son fœtus, à ses propres besoins et préparer son corps à l'allaitement maternel. Ensuite, il faudrait une transmission efficace des nutriments entre la mère et le fœtus. Il est aussi nécessaire que le fœtus soit capable d'utiliser les nutriments reçus (Kominiarek M., 2016 ; Koletzko B. *et al.*, 2019).

Chaque femme enceinte doit consommer quotidiennement des aliments de tous les groupes alimentaires et à chaque repas pour fournir au corps tous les nutriments dont il a besoin. Aucun aliment n'est complet. La combinaison d'aliments de différents groupes seule peut assurer un équilibre alimentaire optimal (Skerrett P. J. & Willett W. C., 2012).

Selon une étude de laboratoire menée dans divers pays, les femmes enceintes mal nourries peuvent favoriser le développement du diabète de type 2 chez leurs enfants (Guendouze M., 2005 ; HKI, 2002). En tant que tel, le régime alimentaire des femmes enceintes est d'une grande importance pour prévenir la malnutrition chronique de nos générations futures.

Parmi les régions de Madagascar, l'Itasy présente une particularité sur le plan nutritionnel. En effet, malgré le potentiel, les bonnes conditions et la forte production agricole de cette localité, la malnutrition chronique des enfants de moins de 5 ans y a encore atteint un taux de 31% en 2019 (ONN, 2019). Ces enfants auront de grandes probabilités de devenir des adultes, parmi lesquels il y aura des femmes, victimes de malnutrition. On peut alors constater que malgré la disponibilité des sources de nourriture, la malnutrition peut exister.

Quant aux femmes enceintes de l'Itasy, le taux de malnutrition aigüe modérée est de 36%, le taux de malnutrition aigüe sévère est de 4%, ce qui fait un totale de 40% comme taux de malnutrition aigüe globale (ORN Itasy, 2019). Ces femmes enceintes donneront naissance à de futures victimes de malnutrition chronique et cela engendrera une boucle infinie si l'on ne réagit pas efficacement.

Dans ce contexte, pour contribuer à la rupture de ce cercle vicieux, cette étude vise à améliorer l'alimentation des femmes enceintes de la région Itasy. Faisant suite

aux travaux effectués par Randrantoarimbola L. et *al.* (2018), l'objectif spécifique consiste en la formulation d'un complément alimentaire à partir de matières premières disponibles dans la région afin de compléter les besoins nutritionnels pendant la grossesse.

Nous commencerons par voir la liste des ingrédients et leur mode de préparation. La caractérisation du produit à travers différentes analyses effectuées sera ensuite présentée avant une discussion générale sur les résultats obtenus.

MATERIELS ET METHODES

Les matières premières et leurs vertus

Le brocoli (Brassica oleracea L.)

Le brocoli fournit des nutriments qui préviennent le problème de la constipation. La présence des fibres, des acides gras et des vitamines régule la tension artérielle et abaisse le mauvais cholestérol. Il peut protéger les vaisseaux sanguins contre les dommages et réguler la pression artérielle. Il contient du fer et de l'acide folique, qui aident à prévenir l'anémie (Latté K. P. et *al.*, 2011 ; Vasanthi H. R. et *al.*, 2009). Le brocoli permet la multiplication cellulaire, la constitution du système nerveux et la moelle épinière du fœtus au premier trimestre, en raison de la vitamine B9 présent qu'il contient. Le brocoli est considéré comme l'un des aliments qui fournissent le plus la vitamine C. Ce dernier permet l'absorption du fer (Gbolo B. Z. et *al.*, 2017 ; Mbemba F., 2013).

L'épinard (Spinacia oleracea L.)

L'épinard est connu pour être un légume qui facilite la digestion, c'est pourquoi il est surnommé « le balai de l'estomac ». C'est l'un des aliments les plus riches en antioxydants protecteurs (vitamines A, C et E) qui aident notre corps à combattre les radicaux libres en excès, et l'un des meilleures plantes anticancéreuses en raison de sa forte teneur en antioxydants et de sa teneur en fibres massives et protectrices (Roberts J.L. ; Moreau R., 2016). L'épinard fournit au corps un apport non négligeable en magnésium. Il a également l'un des niveaux les plus élevés en acide folique ou vitamine B9, ce qui est très utile pour les femmes enceintes chez qui une carence en folates peut provoquer un avortement ou des malformations congénitales chez l'enfant. Le fer aide à avoir un appétit normal. Il aide également au transport de l'oxygène à travers le corps. Ceci est important pendant la grossesse en raison de l'approvisionnement supplémentaire de sang nécessaire pour transporter les nutriments au bébé à travers le placenta (Mbemba F., 2013 ; Shohag M. J. I. et *al.*, 2011).

La banane plantain (Musa paradisiaca L.)

Son faible taux de glucose aide à maintenir l'équilibre gastro-intestinal, la banane plantain est un bon remède pour arrêter la diarrhée chronique chez les enfants et les nourrissons. Elle réduit la probabilité d'avoir de l'ulcère. Elle peut jouer le rôle d'un aliment glucidique de base dans l'alimentation, fournissant un supplément l'énergie selon le besoin (Alvarez-Acosta T. et al., 2009 ; Goel R. K. et al., 2001). Le potassium est très important pendant la grossesse, et la banane plantain, qui en est très riche, est une bonne source. Le folate est très important pendant la grossesse pour la croissance de nouvelles cellules et de nouveaux gènes (Mosso K. et al., 1990).

Le haricot rouge (Phaseolus vulgaris L.)

Les haricots verts renferment une quantité impressionnante de pigments antioxydants appelés flavonoïdes, ces composés ralentissent, par un effet de synergie, la croissance des cellules cancéreuses. Les fibres solubles contenues dans les haricots aideraient à abaisser le taux de mauvais cholestérol. De plus, il est prouvé qu'elles réduisent l'inflammation et la tension artérielle, ce qui est excellent pour le cœur. La vitamine C est un antioxydant puissant qui contribue à l'absorption du fer et intervient dans la fabrication du collagène, protéine essentielle pour le bon fonctionnement du cartilage. (Gbolo B.Z. et al., 2017 ; Mbemba F., 2013)

Les haricots rouges augmentent la teneur en fer. Une femme enceinte a besoin d'un supplément de fer afin de fabriquer les globules rouges du bébé en pleine croissance (Delahaye M. D., 2015). Les haricots peuvent aider en reconstituant les niveaux d'hémoglobine du corps de la femme enceinte. Cela aide à éliminer la carence en fer et favorise le développement cognitif du bébé. De plus, le fer contenu dans les haricots rouges favorise le développement du fœtus (Milman N., 2011).

Les haricots contiennent environ 8 acides aminés essentiels qui peuvent préparer des protéines dans le corps de la femme enceinte. Les protéines créées par ces acides aminés formeront aussi les éléments constitutifs des cellules du corps du bébé (Manta-Vogli, P. D. et al., 2020 ; Shehzad, A. et al., 2015).

Le Moringa (Moringa oleifera Lam.)

Le *Moringa* aide les patients diabétiques à contrôler leur glycémie (Divi S. M. et al., 2012). Il est recommandé comme complément nutritionnel, car il aide à digérer les aliments en apportant les minéraux qui facilitent la digestion (Upadhyay P. et al., 2015). Cela aidera le corps à absorber tous les nutriments de la nourriture. Il augmente le niveau d'antioxydants ; il contient environ 46 antioxydants qui aident les cellules à neutraliser les radicaux. Ces antioxydants sont également impliqués dans la prévention des dommages cellulaires, la voie commune du cancer, du vieillissement et de diverses maladies (Sreelatha S. et al., 2011 ; Suphachai C., 2014). Les feuilles de *Moringa* ont des bienfaits sur les maladies suivantes : diabète, cancer, goutte, plaies, maux de tête,

fièvre, maux de gorge, bronchite, infections des yeux et des oreilles, etc. (Sreelatha S. et *al.*, 2011 ; Suphachai C., 2014). Les femmes qui consommaient des feuilles de *Moringa* produisaient deux fois plus de lait comme ceux qui ne l'ont pas fait. Le fer, nécessaire à la croissance fœtale et à la formation du placenta, est également présent dans ces feuilles (Asiedu-Gyekye I. J. et *al.*, 2014 ; Ijarotin O.S. et *al.*, 2013 ; TFL, 2005).

Des études ont démontré l'efficacité de l'ajout du *Moringa oleifera* afin d'augmenter la teneur en protéines, fer, zinc, calcium, fibres alimentaires, vitamines C et D et β -carotène (Dachana K. et *al.*, 2010 ; Farzana T., 2017 ; Harimalala N. et *al.*, 2015 ; Randrialala M.F., 2019 ; Razanajaona M.M.A., 2010).

Le Tilapia (Oreochromismossambicus Peters 1852 : Cichlidae)

Des études ont montré un effet protecteur de la consommation de poisson contre les maladies cardiovasculaires. Cet effet est dû à la présence d'acides gras oméga-3 dans la chair de poisson. Les oméga-3 ont des propriétés anti-inflammatoires. Ils agissent comme des précurseurs de messagers chimiques qui favorisent le bon fonctionnement des systèmes immunitaire, circulatoire et hormonal. Ils sont essentiels pour le développement du cerveau et de la rétine de l'œil. Le poisson est une source de protéines animales, riche en phosphore, et apporte des oligo-éléments : zinc, cuivre, iode, sélénium et fluor. Il contient également des vitamines A et D. Pendant la grossesse, le tilapia est une excellente source de nutriments pour la mère ou le fœtus en particulier, en termes de protéines-vitamines D et B12 (EUFIC, 2009).

La coquille d'œuf

Une coquille d'œuf est une enveloppe minéralisée externe plus ou moins résistante recouvrant les œufs amniotiques. Secrétée par la glande coquillière de l'oviducte, elle est composée de carbonates et de phosphates de calcium et de magnésium. Elle permet les échanges gazeux respiratoires à travers ses pores, mais limite la pénétration des microbes tout en augmentant la résistance aux chocs et à l'écrasement.

Hassam (2015) a proposé une formulation de biscuits préparés à partir de farine de blé et enrichis en calcium grâce à l'addition de coquille d'œuf de poule. Les résultats obtenus indiquent que l'ajout de poudre de coquille d'œuf à 3, 6 et 9 % permet d'augmenter la teneur en calcium du produit à 607,33, 1378,11 et 2175,23 mg/100 g (Hassam N.M., 2015).

L'étude d'Oguido et al. (1995) a montré que le pourcentage et le taux d'absorption du calcium étaient plus élevés pour la coquille d'œuf que pour le lait (Oguido A.K. et *al.*, 1995).

La coquille d'œuf peut donc être une source de calcium pour la femme en gestation. Elle sera également une source de minéraux pour le futur squelette de l'embryon.

Préparation des ingrédients

Préparation du Moringa

- 1) Décapage des feuilles : Le décapage des feuilles consiste à retirer les folioles de leurs pétioles. À ce stade, les feuilles malades ou endommagées sont enlevées.
- 2) Lavage : Les feuillettes sont lavés dans une cuve avec de l'eau potable pour enlever la poussière. Les feuillettes sont ensuite lavés à nouveau avec une solution saline à 1% pendant 3 à 5 minutes pour les débarrasser de germes. Enfin, ils sont à nouveau lavés à l'eau claire. Ils sont alors prêts à être séchés.
- 3) Séchage solaire : Les feuillettes sont étalés et exposés au soleil pendant 18 heures.
- 4) Concassage : Les folioles bien séchées, de couleur foncée, sont ensuite écrasées avec un mortier de pilon pour faire une poudre.

Il existe également la méthode de pré-cuisson pour le brocoli, le plantain, les haricots rouges et le tilapia.

Préparation du brocoli

- 1) Lavage : après la récolte, le brocoli est lavé à l'eau potable et à l'eau de Javel pour être purifié.
- 2) Préparation : les extrémités de la tige principale sont retirées et le bouquet est coupé juste en dessous de la couronne.
- 3) Pré-cuisson : le brocoli est placé dans un panier et est précuit à la vapeur, sans couvercle pendant cinq minutes.

Préparation des bananes plantains

- 1) Épluchage et préparation : La banane verte est épluchée manuellement puis elle est coupée en tranches d'environ 1 cm d'épaisseur.
- 2) Cuisson : la banane plantain pelé est mis dans une casserole avec de l'eau bouillie à 40° et cuit jusqu'à ce qu'elle soit tendre.

Préparation du haricot rouge

- 1) Lavage : les haricots frais sont lavés à l'eau claire. Ceux qui sont détériorés sont alors supprimés.
- 2) Préparation : les haricots sont cuits avec de l'eau potable pendant 25 minutes à feu doux.

Après les avoir refroidis, le tégument des haricots est enlevé à la main.

Traitement du «Tilapia»

- 1) Préparation : le poisson est lavé ; ses écailles et viscères sont enlevés. Les poissons sont lavés une seconde fois.
- 2) Salage et cuisson : Les poissons sont saupoudrés de sel. Les poissons sont cuits à feu doux dans une casserole pendant environ 10 minutes. Ils sont ensuite séchés à l'air libre sous le soleil pendant 18 heures pour absorber l'humidité. Puis ils sont écrasés à l'aide d'un mortier et pilon avant d'être tamisé.

Traitement des coquilles d'œufs

Pour les coquilles d'œufs, après lavage, elles sont séchées au soleil pendant 6 heures. Puis la peau intérieure des coquilles est décollée. Ensuite, les coquilles sont écrasées à l'aide d'un pilon et mortier. Dans le but de les rendre digestibles, quelques gouttes de jus de citron sont ajoutées aux coquilles pour en extraire le calcium.

Détermination de la composition biochimique de la soupe

La composition biochimique de la soupe en macroéléments organiques (glucides, lipides, protéines) et minéraux (calcium, magnésium, phosphore, potassium, ...) et les microéléments (fer, cuivre, ...) ainsi que la teneur en eau et matières sèches ont été déterminés selon les méthodes standard (Gbolo B. Z. et *al.*, 2017 ; Bukatuka F. C. et *al.*, 2016 ; Mbemba F., 2013).

La méthode de détermination des éléments minéraux par Fluorescence X présente des avantages. L'analyse par spectrométrie de fluorescence X est robuste, combinant haute précision et exactitude avec une préparation d'échantillons simple et rapide. Elle fournit des informations qualitatives et quantitatives sur un échantillon. L'analyse effectuée par cette méthode est multi-élémentaire : la quasi-totalité des éléments est analysée à l'exception des éléments très légers. Elle présente également quelques inconvénients. La fluorescence X est en général moins sensible que les méthodes de spectrométrie atomique.

Des criblages phytochimiques en vue de la détermination des familles chimiques et des analyses microbiologiques ont également été effectués.

RESULTATS

Résultats des analyses en macronutriments et micronutriments

Le Tableau 1 montre les résultats d'analyse de la soupe par rapport aux besoins de la femme enceinte.

Pour 100 g de soupe, les nutriments existants sont les suivants :

Tableau 1 : Résultats d'analyses des compositions chimiques de la soupe

Constituants	Besoins énergétiques et besoins en macronutriments			Pour 100g de matière sèche (MS) de la soupe	Pourcentage par rapport aux besoins journaliers d'une femme enceinte		
	1er trim	2e trim	3e trim		1er trim	2e trim	3e trim
Humidité (%)				11,04			
Calories (kcal)	2 403	2 743	2 855	328,74	13,68	11,98	11,51
Protéines(g)	46	71	71	26,05	56,63	36,69	36,69
Lipides(g)	30	30	30	5,62	18,73	18,73	18,73
Cendres (g)				13,35			
Glucides(g)	175	175	175	43,49	24,85	24,85	24,85
Fibres(g)	28	28	28		-	-	-
Amidon				20,86			
	Besoins en minéraux par catégories d'âges				Besoins en minéraux par catégories d'âges		
Minéraux	≤18	19-30	31-50	-	≤18	19-30	31-50
Ca (mg)	1 300	1 000	1 000	2 300	176,92	230	230
Mg (mg)	400	350	350	91,10	22,78	26,03	26,03
P (mg)	1 250	700	700	482,70	38,62	68,96	68,96
K (mg)	4 700	4 700	4 700	1 900	40,43	40,43	40,43
Fe (mg)	27	27	27	18,58	68,81	68,81	68,81
Na (mg)	1 500	1 500	1 500	412	27,47	27,47	27,47
Mn (mg)	2	2	2	11,73	586,50	586,50	586,50
Zn (mg)	12	11	11	5,03	41,92	45,73	45,73
Cl (mg)	2 300	2 300	2 300	9 472	411,83	411,83	411,83
Cu (µg)	1 000	1 000	1 000	960	96	96	96
F (µg)	3	3	3		-	-	-
I (µg)	220	220	220		-	-	-
Se (µg)	60	60	60	<10	<16,67	<16,67	<16,67
Cr (µg)	29	30	30	360	1 241,38	1 200	1 200
Mb (µg)	50	50	50		-	-	-

Les Tableaux 02 et 03 nous permettront de comparer l'humidité, les calories, les protéines, les lipides, les glucides ainsi que les taux de cendres et minéraux de différents échantillons étudiés concernant des aliments destinés aux femmes enceintes et des aliments qui ont été enrichis en *Moringa oleifera*.

Tableau 2 : Humidité, calories, protéines, lipides et glucides des différents échantillons étudiés

Auteurs	Humidité %	Calories (kcal)	Protéines (g)	Lipides (g)	Glucides (g)	Nature de l'échantillon
Auteur	11,04	328,74	26,05	5,62	43,49	Soupe de légumes et fruit en poudre destiné aux femmes enceintes à base de <i>Moringa oleifera</i> (Haricot rouge)
Randrantoarimbola et al. (2020)	7,50	205,00	27,10	2,30	38,20	Soupe de légumes et fruit en poudre destiné aux femmes enceintes à base de <i>Moringa oleifera</i> (Haricot blanc)
Ratiarimananjatovo et al. (2020)	33,70	303,30	10,00	8,50	46,70	Gâteau de riz enrichi destiné aux femmes enceintes
Boateng et al. (2019)		413,26	18,29	8,94	64,91	Complément alimentaire enrichi en <i>Moringa oleifera</i> (Maïs, Soja, Feuille de <i>Moringa</i> en poudre)
Avensu et al. (2019)	4,00	577,12	11,68	44,33	32,88	Biscuits enrichis de larves de charançon du palmier (<i>Rhynchophorus phoenicis Fabricius</i>) fabriqué à partir de la patate douce à chair orange destiné aux femmes enceintes
Randrialala (2019)	60,80		18,92	10,20	55,31	Gâteau de manioc enrichi aux feuilles <i>Moringa oleifera</i> fraîches
Farzana et al. (2017)	2,83	337,42	16,05	4,22	58,81	Soupe de légumes en poudre complétée avec de la farine de soja, champignon et feuille de <i>Moringa oleifera</i>
Harimalala et al. (2014)	9,40	54,34	8,60	1,21	78,17	Pâtes de tamarin enrichies à 30 % de poudre de feuilles de <i>Moringa oleifera</i>

Auteurs	Humidité %	Calories (kcal)	Protéines (g)	Lipides (g)	Glucides (g)	Nature de l'échantillon
Harimalala et al. (2014)	3,40	371,80	10,24	1,34	76,87	Pâtes de banane enrichies à 30 % de poudre de feuilles de <i>Moringa oleifera</i>
Andrianirina (2012)	5,91	352,24	3,16		84,90	Nectars de fruits et de chips de pommes de terre au <i>Moringa oleifera</i>
Dachana (2010)			12,80	14,60		Biscuits enrichis en feuilles de <i>Moringa oleifera</i> Lam séchées
Razanajaona (2010)	39,20	390,03	7,20	0,23	89,79	Pâte de banane enrichie en poudre d'Ananambo
Razanajaona (2010)	24,89	397,54	2,84	0,25	95,98	Pâte de goyave enrichie en poudre d'Ananambo
Razafindrakoto (2010)	11,70	369,74	6,60	10,50		Barres de céréales au <i>Moringa oleifera</i> à l'ananas séché
Razafindrakoto (2010)	13,60	379,24	6,50	9,40		Barres de céréales au <i>Moringa oleifera</i> à la banane séchée

Tableau 3 : Teneur en cendres et minéraux des différents échantillons étudiés

Auteurs	Cendres (g)	Ca (mg)	Mg (mg)	P (mg)	K (mg)	Fe (mg)	Na (mg)	Mn (mg)	Zn (mg)	Cu (µg)
Auteur	13,35	2 300	91,10	482,70	1 900	18,58	412,00	11,73	5,03	960
Randrantoarimbola et al. (2020)		2 003	368	204	1 324	28,20				570
Ratiarimananjatovo et al. (2020)	0,90	16,30	37,60			1,90				
Boateng et al. (2019)	2,78					10,81				
Avensu et al. (2019)	2,10	41,29				10,12			2,47	
Randrialala (2019)	13,01									
Farzana et al. (2017)	16,48				288,85	3,82	2 425,10	2,06	3,70	
Harimalala et al. (2014)	2,62									
Harimalala et al. (2014)	4,15									
Andrianirina (2012)										
Dachana (2010)	1,80	369,20				6,23				
Razanajaona (2010)	2,78	161,30	93,54		1051,37					
Razanajaona (2010)	0,93	179,74	10,84		340,97					
Razafindrakoto (2010)										

Lors de l'analyse de la soupe, nous avons pu identifier 23 éléments chimiques dont le Mg (91,1 mg/100g MS) ; Ca (2300 mg/100 g MS) ; K (1900 mg/100 g de MS) ; P (482,7 mg/100 g de MS) ; Cu (960 mg/100 g MS) ; Fe (18,58 mg/100 g MS) ; Zn (5,03 mg/100 g MS) ; Mn ((11,73 mg/100 g MS) ; Na (412 mg/100 g MS). Comparés aux différentes études effectuées (Tableau 03) sur le sujet le complément alimentaire élaboré tient la première place en considérant le taux de calcium, phosphore, potassium, manganèse, zinc et cuivre. Elle tient la seconde place en considérant le taux de fer et sodium. Elle tient la troisième place en considérant le taux de magnésium.

Résultats des criblages phytochimiques

Le Tableau 04 récapitule les différents résultats lors des criblages des facteurs antinutritionnels.

Tableau 4 : Tableau récapitulatif des facteurs antinutritionnels

Facteurs antinutritionnels	Résultats	Conclusions
Alcaloïdes	+++	Présence d'Alcaloïdes
Triterpènes et Stéroïdes	+	Absence de Triterpènes et présence de Stéroïdes
Flavonoïdes et Leucoanthocyanes	+++	Présence de Flavonoïdes, Leucoanthocyanane
Tanins et Polyphénols	++	Présence de Polyphénols : Tanins de type catéchique
Saponosides	-	Absences des Saponosides

- : Absent ; + : Faible ; ++ : Moyenne ; +++ : Très abondantes

Lors du screening phytochimique, nous avons noté la présence des Alcaloïdes, de Stéroïdes, de Flavonoïdes, de Leucoanthocyanes, Anthocyanes et Tanins de type catéchique dans l'échantillon.

Résultats des analyses microbiologiques

Les résultats des analyses microbiologiques qui ont été effectuées à l'Agence de contrôle de la sécurité sanitaire et de la qualité des denrées alimentaires sont regroupés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Caractères microbiologiques de soupe

	Résultats	Critères
Staphylocoque coagulas +	<1	1,0.102 UFC/g
Escherichia Coli	20	10 UFC/g
Bacillus cereus	<1	1,0.103 UFC/g
Levures	70	1,0.103 UFC/g
<i>Salmonella sp</i>	Absence	Absence dans 25g

Source : ACSQDA

L'échantillon de produit est acceptable par ses caractères microbiologiques. L'échantillon de produit analysé est propre et sain à la consommation humaine d'après l'analyse effectuée auprès de l'ACSQDA. Notons que l'analyse a été faite un mois après la préparation du produit.

DISCUSSION

Le complément alimentaire concocté est élaboré à partir de produits disponibles localement. La fabrication peut alors se faire soi-même au sein du foyer. Cependant, à cause de difficultés financières actuellement rencontrées qui sont accentuées par la pandémie COVID-19, les femmes enceintes qui travaillent n'auront pas le temps de préparer le potage. Il serait donc intéressant de mettre en place des systèmes de transformations locaux pour assurer la disponibilité des produits finis.

La formulation s'est faite de façon à obtenir un produit protéino-énergétique avec d'environ 45-40 % de glucides, 25-30 % de protéines et 30 % de lipides.

L'apport énergétique et lipidique du complément est assez faible par contre l'apport protéique est considérable et couvre 56,63% des besoins journaliers d'une femme enceinte. L'apport glucidique apporté par l'aliment est assez moyen (24,85 % des besoins journaliers d'une femme enceinte). Les quantités de glucides et protéines respectent les proportions des besoins quotidiennes en nutriments. Le complément est cependant pauvre en lipides. Les matières premières utilisées ne sont pas très riches en lipides. Le taux d'humidité de la soupe est légèrement supérieur à 10 %. Ce résultat a été obtenu lors de l'analyse effectuée au CNRE deux mois après l'analyse qui a été effectuée à l'ACSQDA qui a donné un taux d'humidité de 8,9 %. Il y a eu une variation de 2,14 % durant deux mois de stockage. Les micro-organismes ne peuvent pas se développer lorsque la teneur en humidité est inférieure à 8 %. D'autre part, lorsque l'humidité est supérieure à 18 %, certains micro-organismes peuvent être reproduits progressivement.

Dans les cas les plus favorables, les limites de détection sont de quelques ppm. Le domaine de linéarité de la fluorescence s'étend de 0,01 à 100%. L'analyse des éléments de faible numéro atomique est difficile à cause du phénomène Auger. On a constaté la présence de facteurs anti-nutritionnels dans l'échantillon. Les Alcaloïdes, Flavonoïdes et Leucoanthocyanes sont abondants. De faibles quantités de Tanins et Polyphénols sont également détectées. La soupe est fabriquée principalement par des produits végétaux, d'où la présence de facteurs anti-nutritionnels dans l'échantillon. La précuisson s'avère alors être nécessaire. Chaque matière première utilisée a son propre temps de cuisson, d'où la nécessité du prétraitement de certains d'entre-eux. Une soupe précuite est facilement préparée. La préparation se fait alors très facilement avec une durée de 5 mn environ à feux doux.

Les Bonnes Pratiques d'Hygiène et les Bonnes Pratiques de Fabrication sont importantes dans la production de la soupe afin que le produit ne présente aucun danger pour le consommateur. L'un des points qui méritent plus d'attention est la sécurité sanitaire des consommateurs. Dans un premier temps, le local et les plans de travail doivent être propres. Lors de la préparation, le local doit être peu ou pas ventilé pour éviter l'impact de germes pathogènes. L'hygiène corporelle en particulier les mains de l'opérateur lors du décorticage doivent être exemptes de polluants pour éviter la contamination initiale des matières premières avant l'ébullition. En effet, une bonne matière première donne un bon produit. Les ustensiles utilisés doivent être lavables, imputrescibles, résistants. Ils doivent être nettoyés et désinfectés au début et à la fin des opérations. Pour les Bonnes Pratiques de Fabrication, les mélanges conditionnés dans un emballage spécial (emballage n'ayant pas des effets nocifs avec les produits) peuvent être gardés dans un milieu ambiant pendant 2 ou trois mois. La soupe déshydratée a une longue durée de conservation à cause des paramètres physico-chimiques des produits bien considérés (activités de l'eau, propriétés microbiologiques, homogénéité des mélanges et l'emballage de conditionnement). Lors de la préparation de l'échantillon, les Bonnes Pratiques d'Hygiène et les Bonnes Pratiques de Fabrication ont été respectées afin d'obtenir un produit propre et sain à la consommation humaine. C'est ainsi que le complément a été jugé acceptable par ses caractères microbiologiques.

CONCLUSION

Cette étude a été menée dans le but de pallier les carences protéino-énergétiques et en micronutriments afin de briser le cercle vicieux de la malnutrition qu'est le cycle intergénérationnel de la malnutrition accentué par la pandémie mondiale COVID-19. Face à une telle situation, la formulation des compléments alimentaires à base de produits localement disponibles sera un atout de notre investigation. Les mélanges du complément alimentaire regroupent les produits d'origine végétale, les produits carnés et les sous-produits d'œufs sans additifs alimentaires. Les ingrédients ont été traités préalablement afin d'éliminer les facteurs antinutritionnels dans les produits et de faciliter la préparation du complément. La proportion de chaque ingrédient de la soupe déshydratée est de 30% de légumes à feuilles, 36% de légumineuse, 16% de chair de poisson et 4% de coquille d'œuf. D'après l'analyse de la composition par spectrométrie de fluorescence X à énergie dispersive (EDXRF), le mélange contient divers minéraux tels que le Mg (91,1 mg/100g MS) ; Ca (2300 mg/100 g MS) ; K (1900 mg/100 g de MS) ; P (482,7 mg/100 g de MS) ; Cu (960 mg/100 g MS) ; Fe (18,58 mg/100 g MS) ; Zn (5,03 mg/100 g MS) ; Mn ((11,73 mg/100 g MS) ; Na (412 mg/100 g MS). En outre, le produit est composé de glucides (43,49 g/100 g MS), de graisses (5,62 g/100 g MS) et de protéines (26,05 g/100 g MS). Sa valeur énergétique est de 328,74kcal pour 100g de MS. Cette formulation a été comparée à 11 études provenant de pays différents. Ce produit tient la première place en tant que source de calcium, de phosphore, de potassium, de manganèse, de zinc et de cuivre. Elle tient la seconde place en considérant l'apport protéique et ferrique et la troisième place en tant que source de magnésium. L'échantillon de produit est acceptable par ses caractères microbiologiques. L'échantillon de produit analysé est propre et sain à la consommation humaine d'après l'analyse effectuée auprès de l'ACSQDA. Notons que l'analyse a été faite un mois après la préparation du produit. Ce complément alimentaire est destiné aux femmes en gestation vivant dans des pays en voie de développement tel que Madagascar, plus particulièrement de la région Itasy.

Remerciements

Les auteurs sont redevables à l'Office National de la Nutrition (ONN-Madagascar), le Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE-Madagascar), l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar) et l'Université de Gbadolite (République Démocratique du Congo) pour leurs assistances techniques.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Alvarez-Acosta, T., Leon, C., Acasta-Gonzalez, V., Porro-Soto, H., Cluet-Rodriguez, I., Rossell, M.R. et al. (2009). Beneficial role of green plantain (*Musa paradisiaca*) in the management of persistent diarrhea : a prospective randomized trial. *J. Am. Coll. Nutr.* 28(2) : 169-76.
- 2) Andrianirina, T.I. (2012). Utilisation des feuilles de *Moringa oléifera* pour l'amélioration de la qualité nutritionnelle de nectars de fruits et de chips de pommes de terre. Mémoire d'ingénieurat Spécialisation Industries Agricoles et Alimentaires, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université D'Antananarivo
- 3) Asiedu-Gyekye, I.J., Frimpong, M., Awortwe, C., Antwi, D.A., Nyarko, A.K. (2014). Micro and Macro-elemental composition and safety evaluation of the nutraceutical *Moringa oleifera* leaves. In *J. Toxicol.* 2014 : 1-13.
- 4) Ayensu, J., Lutterodt, H., Annan, R.A., Edusei, A., Loh, S.P. (2019). Nutritional composition and acceptability of biscuits fortified with palm weevil larvae (*Rhynchophorus phoenicis* Fabricius) and orange-fleshed sweet potato among pregnant women. In *Food Sci Nutr.* 7 :1807–1815.
- 5) Banque Mondiale (2020). La Banque mondiale à Madagascar : Madagascar - Vue d'ensemble <https://www.banquemondiale.org/fr/country/madagascar/overview>
- 6) Boateng, L., Quarpong, W., Ohemeng, A., Asante, M., Steiner-Asiedu, M. (2018). Effect of complementary food with *Moringa oleifera* leaf powder on hemoglobin concentration and growth of infants in the Eastern Region of Ghana. In *Food & Nutrition.* 7(1) : 302-311.
- 6) Bukatuka, F.C., Ngombe, K.N., Mutwale, K.P., Moni, B.M., Makengo, K.G., Pambu, L. A., et al. (2016). Bioactivity and nutritional values of some *Dioscorea* species traditionally used as medicinal foods in Bandundu, DR Congo. In *European Journal of Medicinal Plants.* 14 (1) : 1-11.
- 7) Dachana, K., Rajiv, J., Indrani, D. & Prakash, J. (2010), Effect Of Dried *Moringa* (*Moringa oleifera* Lam) Leaves On Rheological, Microstructural, Nutritional, Textural And Organoleptic Characteristics Of Cookies. In *Journal Of Food Quality.* 33 : 660-677.
- 8) Delahaye, M.D. (2015). *Le livre de bord de la future maman.* Paris : Hachette Livre.
- 9) Divi, S.M., Bellamkonda, R., Dasireddy, S.K. (2012). Evaluation of antidiabetic and antihyperlipedemic potential of aqueous extract of *Moringa oleifera* in fructose fed insulin resistant and STZ induced diabetic Wistar rats : A comparative study, *Asian J.Pharm. In Clin. Res.* 5 : 67–72.

- 11) European Food Information Council (Eufic, 2009). Les graisses saturées sous la loupe. <http://www.eufic.org/article/fr/nutrition/graisses/artid/Graisses-saturees-loupe/>.
- 12) Farzana, T., Mohajan, S., Saha, T., Houssain, Md.N., Haque, Md.Z. (2017). Formulation and nutritional evaluation of a healthy vegetable soup powder supplemented with soy flour, mushroom, and moringa leaf. In *Food Science & Nutrition*. 5(4) : 911-920.
- 13) Gbolo, B.Z., Asambo, L.S., Bongo, G.N., Tshibangu, D.S.T., Kasali, F.M., Memvanga, P.B. et al. (2017). Bioactivity and Chemical Analysis of Drepanoalpa: An Anti-Sickle Cell Anemia Poly-Herbal Formula from Congo-Kinshasa. In *American J. Phytomedicine & Clinical Therapeutic*. 5 :1.
- 14) Goel, R.K., Sairam, K., Rao, C.V. (2001). Role of gastric antioxidant and anti-Helicobacter pylori activities in antiulcerogenic activity of plantain banana (*Musa sapientamvar, paradisiaca*). In *Indian J. Exp. Biol.* 39(7) : 719-722.
- 15) Guendouze, M. (2005). Diabète Gestationnel. www.solimed.net.
- 16) Harimalala Andriambelo, N., Rasoarahona, F. Razanamparany, J.L. (2014). Nutritional quality of fruit pastes enriched with Moringa oleifera leaves. In *International Journal of Applied Science and Technology*. 4 : 5.
- 17) Hassan, N.M. (2015). Chicken Eggshell Powder as Dietary Calcium Source in Biscuits. In *World Journal of Dairy & Food Sciences*. 10(2) : 199-206, 2015.
- 18) Headey, D., Heidkamp, R., Osendarp, S., Ruel, M., Scott, N., Black, R., Shekar, M., Bouis, H., Flory, A., Haddad, L., Walker, N., Standing Together for Nutrition consortium. (2020). Impacts of COVID-19 on childhood malnutrition and nutrition-related mortality. In *Lancet*. 396(10250) : 519–521
- 19) Helen Keller International HKI. (2002). Module de nutrition pour les élèves de l'Institut de Santé Publique, Ministère de la santé publique et de lutte contre les endémies, République du Niger. www.hki.org.
- 20) Ijarotin, O.S., Adeoti, O.A., Ariyo, O. (2013). Comparative study on nutrient composition phytochemical and functional characteristics of raw, germinated, and fermented Moringa oleifera seed flour. In *Food Sci. Nutr.* 1(6) : 452-463.
- 21) Koletzko, B., Godfrey, K.M., Poston, L., Szajewska, H., Goudoever, J.B.V., Marita, D.W., et al. (2019). Nutrition during pregnancy, lactation and early childhood and its implications for maternal and long-term child health: the early nutrition projects recommendations. In *Annals of Nutrition and Metabolism*. 74 : 93-106.

- 22) Kominiarek, M. (2016). Nutrition Recommendations in Pregnancy and Lactation. In *Medical Clinics of North America*. 100(6) :1199-1215.
- 23) Latté, K.P., Appel, K.E., Lampen, A. (2011). Health benefits and possible risks of broccoli: An overview. In *Food chem. Toxicol.* 49(12) : 3287-309.
- 24) Manta-Vogli, P. D., Schulpis, K. H., Dotsikas, Y., Loukas, Y. L. (2020). The significant role of amino acids during pregnancy: nutritional support. In *The Journal of Maternal-Fetal & Neonatal Medicine*. 33(2) : 334-340.
- 25) Martorell, R. (2017). Improved Nutrition in the first 1000 days and adult human capital and health. In *American Journal of Human Biology*. 29(2) :1-24.
- 26) Mbemba, F. (2013). *Aliments et denrées alimentaires traditionnels du Bandundu en RD Congo : Répertoire et composition en nutriments*. Paris : L'Harmattan.
- 27) Milman, N. (2011). Iron in Pregnancy – How Do We Secure an Appropriate Iron Status in the Mother and Child ? In *Ann Nutr Metab*. 59 : 50–54.

PREDICTION DU POTENTIEL METHANOGENE DE RESIDUS ORGANIQUES ISSUS DE L'ILE DE LA REUNION

par

RABETOKOTANY RARIVOSON Nantenaina⁽¹⁾, THURIES Laurent⁽²⁾,
FARINET Jean-Luc⁽³⁾

- (1) Mention Ingénierie Pétrolière, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Université d'Antananarivo, Madagascar
- (2) UPR Recyclage et Risque, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement - CIRAD La Réunion
- (3) UPR Recyclage et Risque, Centre de Coopération Internationale en Recherche Agronomique pour le Développement - CIRAD Montpellier, France

RESUME

L'augmentation de la production de résidus organiques dans tous les pays, en particulier dans la zone de l'Océan Indien, a été constatée à ce jour. Cependant, ces résidus organiques peuvent être valorisés comme nouvelles sources de biomasses pour la production d'énergie. Le but de notre travail est d'estimer le potentiel méthanogène (BMP) de ces résidus en utilisant leurs caractéristiques chimiques. Quatorze (14) produits ont été ainsi collectés sur l'Ile de la Réunion. D'une part, les mesures des teneurs en matières sèches (MS) et en matières organiques (MO) ont été effectuées en utilisant des protocoles standardisés et d'autre part, le BMP a été déterminé en utilisant un système de test automatique du potentiel méthanogène. Pour la modélisation, des modèles empiriques utilisant la MS et la MO comme prédicteurs issus de la littérature ont été d'abord testés pour prédire le BMP. Ensuite, de nouveaux modèles empiriques en fonction de leurs teneurs mesurées (matières sèches et matières organiques) ont été développés par le biais de régressions linéaires multiples. Le coefficient de détermination R^2 et l'erreur standard de prédiction (SEP) ont été utilisés pour comparer les différentes équations. Une nouvelle corrélation, $BMP = 1,14 \times MS + 2,04 \times MO$ ($R^2 = 0,95$, $SEP = 26,68 \text{ NmlCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{MO}$), a donné des résultats précis qui sont proches des BMP mesurés. Notre approche permettrait ainsi de déterminer le BMP avec la connaissance de caractéristiques facilement mesurables : la MS et la MO des résidus organiques.

Mots clés : Matières Organiques, Matières sèches, Méthanisation, Prédiction, Régression, Valorisation énergétique

ABSTRACT

The increase in the production of organic residues in all countries, especially in the Indian Ocean area, has been noted to date. However, these organic residues (OR) can be recoverable as a new source of biomass for energy production. The aim of our work was to estimate the Biochemical Methane Potential (BMP) of the OR by using their chemical characteristics. Fourteen (14) OR were collected in Réunion Island. On the right hand, measurements of dry matter (DM) and organic matter (OM) contents were carried out by using standardized protocols and on the other hand, the BMP was determined by using an automatic methane potential test system. Firstly, empirical models using DM and OM as predictors from literature were tested to predict BMP. Secondly, new empirical models for BMP as a function of their measured constituents contents (dry matter and organic matter) were developed through multiple linear regressions. The determination coefficient R^2 and the Standard Error Prediction (SEP) were used to compare the different equations. The new correlations using regression method give accurate results that are closer to measured BMP. The new model $BMP = 2.039 OM + 1.140 DM$ ($R^2 = 0.95$, $SEP = 26.68 \text{ NmlCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{OM}$). Our approach would thus allow us to determine the BMP by knowing easily measurable characteristics: the DM and OM of organic residues.

Keywords : Dry Matter, Methanation, Organic Matter, Prediction, Regression, Waste-to-Energy

INTRODUCTION

Aujourd'hui, la demande croissante de la consommation énergétique mondiale et la diminution des réserves d'énergies fossiles ont conduit à la valorisation de la biomasse ou des résidus organiques en tant que nouvelles ressources énergétiques. La biomasse constitue l'ensemble des matières organiques biodégradables et non fossilisées issues des plantes, animaux et microorganismes mais aussi des produits, co-produits, sous-produits et déchets issus de l'agriculture et des industries associées (Demirbas, 2009). Comme valorisations possibles, une valorisation énergétique via des procédés thermochimiques comme la combustion directe ou la cogénération, ou bien via des procédés biochimiques comme la biométhanisation peuvent être citées.

Le test Biochemical Methane Potential (BMP) (Angelidaki et al., 2009) est le test actuellement le plus utilisé pour déterminer le potentiel méthane des déchets. La valeur de potentiel méthane, ou valeur BMP, est la valeur maximale de méthane produit en condition anaérobie, exprimée en $\text{Nml CH}_4 \cdot \text{g}^{-1}$ Matière Organique (MO) ou Matière Volatile (MV). La cinétique de production est également étudiée afin de déterminer la vitesse de biodégradabilité des déchets. Ces valeurs sont utilisées pour évaluer la biodégradabilité anaérobie des déchets, et permettent de dimensionner les réacteurs industriels (Buffiere et al., 2006), mais aussi de contrôler et d'optimiser la production.

Ce test a l'avantage de pouvoir déceler les inhibitions du métabolisme microbien, dues à la présence dans le déchet de composés inhibiteurs, tels que des antibiotiques, des métaux lourds, etc. (Chen et *al.*, 2008 ; Hansen et *al.*, 2004). Il met également en évidence une surcharge ou une adaptation à un type de substrat (Hansen et *al.*, 2004). Ce test BMP consiste à placer une certaine quantité de déchets en présence de micro-organismes en condition anaérobie dans un milieu tamponné et thermostaté (pH entre 6,5 et 7,2, température à 35°C ou 55°C). Plusieurs paramètres sont susceptibles de faire varier la valeur BMP mesurée sur un déchet : les plus importants sont la température (Angelidaki & Sanders, 2004), le pH (Angelidaki & Sanders, 2004 ; Chen et *al.*, 2008), la taille des particules (Angelidaki & Sanders, 2004 ; Palmowski & Müller, 2000) et le ratio inoculum/substrat qui a un effet sur la cinétique et le temps de latence de la réaction et non sur le BMP (Raposo et *al.*, 2011). Toutefois, ce test nécessite une longue période d'expérimentation pouvant aller jusqu'à 60 voire 90 jours (Angelidaki et *al.*, 2009).

Pour cette raison, des méthodes rapides de détermination du BMP semblent être adéquates pour l'estimation de ce potentiel dans les cas de conduite d'études théoriques sans avoir l'accès au test de laboratoire ou encore pour le cas d'études de nouveaux substrats est nécessaires (Kafle & Chen, 2016). Les équations empiriques sont généralement établies à partir des caractéristiques élémentaires (carbone, hydrogène, oxygène, azote), des caractéristiques approximatives (cendres, matières organiques, matières sèches...) ou des caractéristiques biochimiques (soluble, hémicellulose, cellulose, lignine) des résidus organiques (Kafle & Chen, 2016 ; Lesteur, Bellon-Maurel, et *al.*, 2011 ; Rodrigues et *al.*, 2019 ; Schievano et *al.*, 2008).

Dans notre étude, nous nous proposons alors d'évaluer le BMP de 14 résidus organiques de l'Ile de la Réunion (i) en testant des équations trouvées dans la bibliographie, (ii) en développant de nouvelles corrélations via les caractéristiques approximatives comme la matière organique (MO) et la matière sèche (MS) de ces résidus organiques. En effet, ces caractéristiques ont été choisies du fait qu'ils peuvent se mesurer dans presque tous les laboratoires : une simple étuve est nécessaire pour connaître la matière sèche, un four pour la détermination de la matière organique (Schievano et *al.*, 2008). L'objectif de notre travail est d'estimer le BMP de ces biomasses à partir de paramètres facilement mesurables.

MATERIELS ET METHODES

Matières étudiées

Notre étude a porté sur un ensemble de 14 biomasses diverses et variées :

- Issues de l'élevage de volailles : 1 compost de fumier (CFV), 1 fiente (VOLFIEN) et 4 fumiers (VOLFUM-1, VOLFUM-2, VOLFUM-3, VOLFUM-4)

- Issues de l'élevage de porcins : 5 lisiers (LISPRC-1, LISPRC-2, LISPRC-3, LISPRC-4, LISPRC-5)
- Issues de l'élevage de bovins : 2 lisiers (LISBOV-1, LISBOV-2) et 1 fumier (FUMBOV).

Caractérisation des matières étudiées

Pour toutes les matières étudiées, le BMP a été déterminé à partir d'échantillons séchés à 40°C et broyés à 1mm. Un dispositif de mesure du potentiel méthanogène (Automatic Methane Potential Test System II - AMPTS II) est utilisé pour nos déterminations. Pour réaliser un test, il est nécessaire de disposer d'un inoculum (idéalement des souches bactériennes issues d'une installation de méthanisation) et d'un substrat à tester. Les essais ont été effectués sur 3 reliquats pour chaque substrat. Avec les 15 flacons digesteurs on peut ainsi donc inoculer 3 x 4 échantillons dans une série, les 3 autres flacons sont réservés au témoin (inoculum seul). Pour lancer les tests, le ratio MO inoculum/MO substrat est fixé à 3,5/1. En effet, cette valeur du ratio a été adoptée pour avoir un compromis entre le temps de latence, la respiration endogène et le pouvoir tampon du substrat (Angelidaki & Sanders, 2004). Ce choix n'a aucun effet sur la valeur de potentiel méthane (Raposo et al., 2006). Avant chaque essai, il est donc nécessaire d'effectuer un prélèvement de l'inoculum pour déterminer la matière sèche (MS) à 105°C et la teneur en matière organique (MO), il s'agit de la matière volatilisée par séchage de la matière sèche à 550°C pendant au minimum 4 heures. Les mêmes mesures sont réalisées sur le substrat. La quantité de matière organique présente dans cette quantité d'inoculum étant connue, on peut ainsi calculer les quantités de substrat nécessaires pour chaque échantillon afin de respecter le ratio. Ainsi, 400g d'inoculum sont pesés pour les témoins, et 400g d'inoculum + X g de substrat pour les essais. La température d'incubation est de 35°C. Un logiciel fourni avec l'appareil permet de contrôler le test pendant les 30 à 50 jours d'expérimentation. Le test prend fin quand le maximum de production de gaz est atteint : la production journalière est différente de moins de 3% de celle de la veille.

A la fin du test, les données sont traitées dans une feuille de calcul Excel™ (Microsoft Excel, 2010) spécifique suivant le principe suivant : la production de méthane de chaque voie « substrat » est ramenée à la productivité en ml de gaz produit par g de MO du substrat (on soustrait l'inoculum), on moyenne les 3 répétitions si elles sont à ± 20% et à l'aide d'un outil statistique de type XLStat™ (Addinsoft, Paris, France) on modélise la courbe selon la loi exponentielle :

$$B = B_0 \times (1 - e^{-kt}) \quad (\text{Équation 1})$$

avec B = production de méthane en millilitre de CH₄/g de MO,

B₀ = potentiel de production maximum (asymptote de l'exponentielle),

k = coefficient caractérisant la cinétique de la méthanisation, t = temps en jours

La Figure 1 présente des exemples de courbes de cinétique de méthanisation.

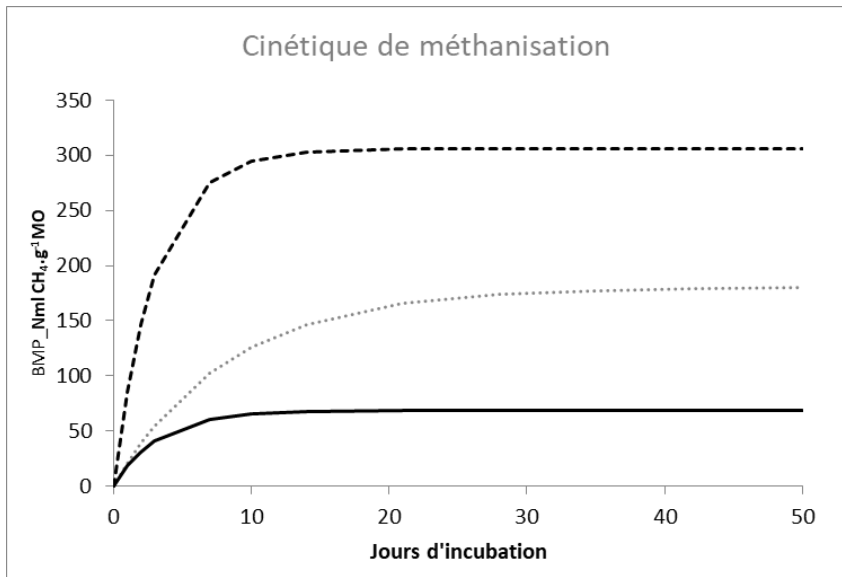


Figure 1 : Exemples de courbes de cinétique de méthanisation obtenues à partir de différents substrats

Prédiction du BMP

Les 2 équations trouvées dans la littérature (LE) qui ont été testées sont regroupées dans le Tableau 1. Ce tableau regroupe essentiellement les équations faisant intervenir la MS ou la MO. Le biais et l'erreur standard de prédiction (SEP) sont calculés pour évaluer les performances de prédiction de ces équations.

De nouvelles équations développées (NE) à partir de régressions linéaires multiples dont les paramètres sont linéaires MS et MO (NE-1 à NE-4) et la combinaison de ces deux paramètres (NE-5 et NE-6) ont été établies.

Tableau 1 : Equations issues de la littérature

Paramètres considérés	Equations de la littérature (LE)	Sources
MO	LE-1 : $BMP = 20,497MO - 1241,534$	(Schievano et <i>al.</i> , 2008)
MS	LE-2 : $BMP = 37,408MS + 57,989$	(Schievano et <i>al.</i> , 2008)

La qualité des régressions est évaluée à travers les paramètres statistiques suivants : le coefficient de régression (R^2), le critère d’Akaike (AIC) (Akaike, 1998), le biais et l’erreur standard (SE). Le meilleur modèle étant celui avec le plus faible AIC et le plus faible SE.

Afin de pouvoir comparer les performances de ces LE et des NE, les calculs des biais et des SEP ont été effectués.

Toutes les procédures de développement des équations ainsi que l’appréciation des paramètres statistiques ont été menées sous R (version 3.4.2)

RESULTATS

Caractéristiques des matières étudiées

La MS des substrats utilisés varie entre 0,96 à 87 % de la matière brute. La plus faible valeur correspond à un lisier de porc tandis que la plus forte correspond à des fientes de volaille (cf. Figure 2). Cette gamme de MS indique que les substrats testés sont à l’état liquide, pâteux ou solide au départ.

Les substrats ont des teneurs en MO de 46,28 à 83,58% de la MS. Le lisier de porc (LISPRC-1) a la plus faible teneur en MO alors que le fumier de volaille (VOLFUM-3) présente la plus forte teneur (cf. Figure 2).

Les BMP mesurés ont varié dans une gamme de 69 à 306 NmlCH₄.g⁻¹MO. La fiente de volaille (VOLFIEN) a un potentiel de production de méthane 4,4 fois plus élevé que le compost de fumier de volaille (CFV). La Figure 3 montre les BMP des 14 matières étudiées

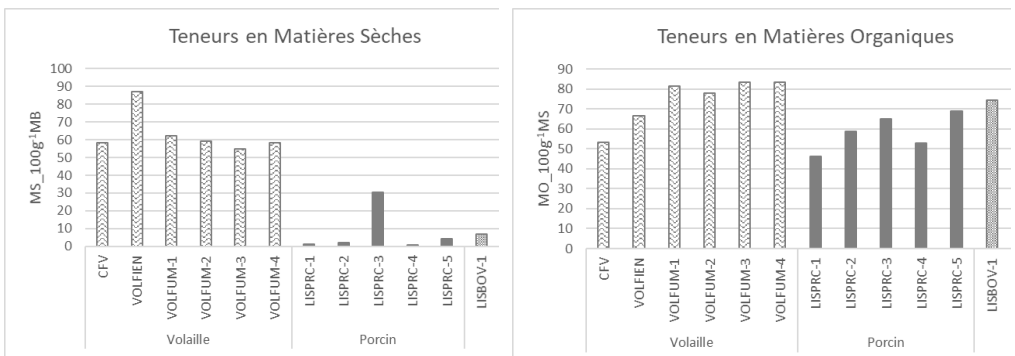


Figure 2 : Teneurs en Matières Sèches et en Matières Organiques des matières étudiées

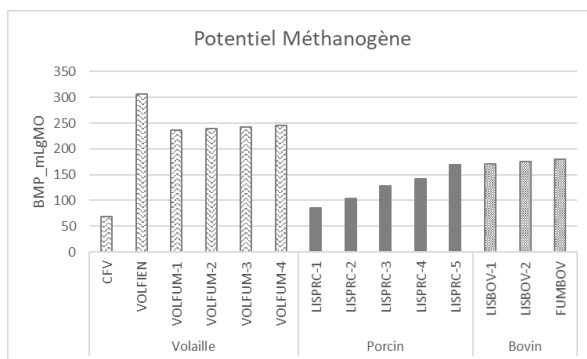


Figure 3 : Potentiel méthanogène des matières étudiées

Prédictions à partir des équations trouvées dans la littérature

Les biais ainsi que les erreurs standard de prédiction (SEP) obtenus à partir des prédictions des valeurs de BMP partant des EL sont respectivement de 8,98 NmlCH₄.g⁻¹MO et 188,34 NmlCH₄.g⁻¹MO pour EL-1 et 1117,04 NmlCH₄.g⁻¹MO et 929,89 NmlCH₄.g⁻¹MO pour EL-2. La Figure 4 représente les graphiques des valeurs mesurées de BMP comparées aux valeurs prédites par les LE.

Les paramètres statistiques permettent de dire que les équations développées présentent de forts biais et de forts SEP.

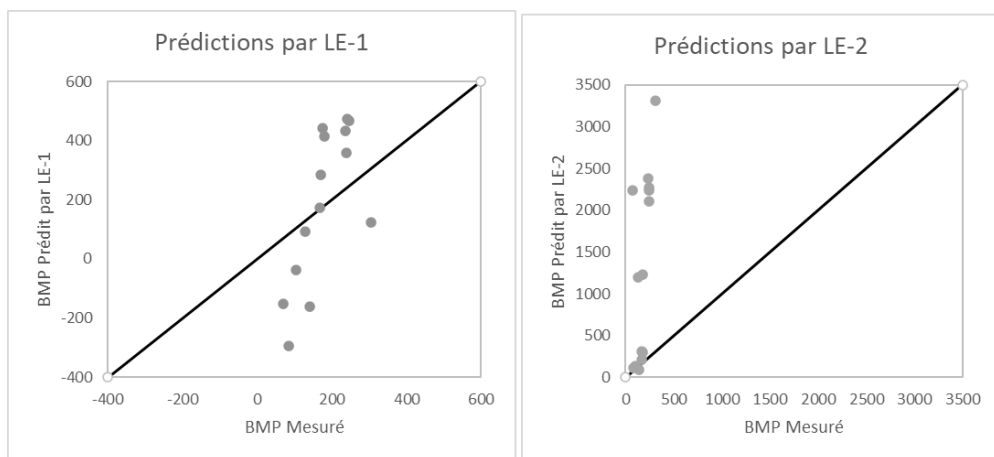


Figure 4 : Prédictions des BMP par les EL

Prédictions à partir des nouvelles équations

En tout, 6 NE pour prédire le BMP ont été établies à partir de nos échantillons. Ces NE sont présentées dans le Tableau 2 avec les paramètres statistiques permettant de comparer leur performance de prédiction. En partant des paramètres uniques, la NE-4 permet d'obtenir des précisions de valeur de BMP avec une SEP de 38,68

$\text{NmlCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{MO}$. La combinaison des deux paramètres a donné NE-6 permet d'avoir la meilleure approche pour prédire le PCS des échantillons étudiés avec un SEP de 26,68 $\text{NmlCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{MO}$.

Tableau 2 : Nouvelles équations de prédiction de BMP

Paramètres	Nouvelles Equations	R ²	p-value	SEP	AIC
MS	NE-1 : $\text{BMP} = 1,54 \times \text{MS} + 127,19$	0,39	$p < 0,1$	37,94	113
MS	NE-2 : $\text{BMP} = 3,74 \times \text{MS}$	0,72	$p < 0,001$	64,01	130
MO	NE-3 : $\text{BMP} = 3,83 \times \text{MO} - 88,59$	0,47	$p < 0,01$	33,78	112
MO	NE-4 : $\text{BMP} = 2,59 \times \text{MO}$	0,93	$p < 0,001$	38,68	111
MS & MO	NE-5 : $\text{BMP} = 1,08 \times \text{MS} - 2,93 \times \text{MO} - 61,38$	0,63	$p < 0,01$	25,36	107
MS & MO	NE-6 : $\text{BMP} = 1,14 \times \text{MS} + 2,04 \times \text{MO}$	0,95	$p < 0,001$	26,68	106

DISCUSSION

Notre étude a montré que la prédiction des valeurs de BMP via les nouvelles équations apporte plus de précisions par rapport aux équations de la littérature. En effet, les EL ont été établies à partir d'échantillons de lisier de porc, de déchets agroindustriels et de la fraction fermentescible d'ordures ménagères qui sont de natures similaires aux matières étudiées ici (Schievano *et al.*, 2008). Les valeurs de SEP rapportées sont proches de celles trouvées par Schievano *et al.* (2008) à partir de modèles basés sur la MO (SEP = 23,5 $\text{NmlCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{MO}$). Les travaux de Lesteur *et al.* (2011) ayant prédit les BMP par la spectrométrie proche infrarouge ont rapporté des SEP semblables à nos résultats (SEP = 28 $\text{NmlCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{MO}$). Des études portant sur la prédiction de BMP de matières animales à partir de la lignine ont montré des valeurs de SEP plus fortes de 90 $\text{NmlCH}_4 \cdot \text{g}^{-1} \text{MO}$ (Triolo *et al.*, 2011). Nos SEP sont ainsi en accord avec les études menées auparavant et montrent que le BMP peut être prédit à partir de caractéristiques facilement accessibles comme la MS et la MO.

CONCLUSION

De simples mesures comme la MS et la MO peuvent devenir des prédicteurs pour les substrats organiques. Afin de rendre le modèle plus robuste, l'intégration d'une plus grande diversité de substrats serait nécessaire. D'autres caractéristiques facilement mesurables doivent également être testées pour développer des étalonnages plus performants.

REFERENCES

- 1) Akaike, H. (1998). Information Theory and an Extension of the Maximum Likelihood Principle. In E. Parzen, K. Tanabe, & G. Kitagawa (Eds.), *Selected Papers of Hirotugu Akaike* (pp. 199–213). https://doi.org/10.1007/978-1-4612-1694-0_15
- 2) Angelidaki, I., Alves, M., Bolzonella, D., Borzacconi, L., Campos, J. L., Guwy, A. J., Kalyuzhnyi, S., Jenicek, P., & van Lier, J. B. (2009). Defining the biomethane potential (BMP) of solid organic wastes and energy crops : a proposed protocol for batch assays. *Water Science and Technology*, 59(5), 927–934. <https://doi.org/10.2166/wst.2009.040>
- 3) Angelidaki, I., & Sanders, W. (2004). Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Re/Views in Environmental Science & Bio/Technology*, 3(2), 117–129. <https://doi.org/10.1007/s11157-004-2502-3>
- 4) Buffiere, P., Loisel, D., Bernet, N., & Delgenes, J.-P. (2006). Towards new indicators for the prediction of solid waste anaerobic digestion properties. *Water Science and Technology*, 53(8), 233–241. <https://doi.org/10.2166/wst.2006.254>
- 5) Chen, Y., Cheng, J. J., & Creamer, K. S. (2008). Inhibition of anaerobic digestion process : a review. *Bioresource Technology*, 99, 4044–4064.
- 6) Demirbas, A. (2009). Political, economic and environmental impacts of biofuels: A review. *Applied Energy*, 86 (Supplement 1 (0)), 108–117.
- 7) Hansen, T. L., Schmidt, J. E., Angelidaki, I., Marca, E., Jansen, J. la C., Mosbæk, H., & Christensen, T. H. (2004). Method for determination of methane potentials of solid organic waste. *Waste Management*, 24(4), 393–400. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6VFR-4BH62J3-1/2/7b677a609e354b117dfd299199f92ada>
- 8) Kafle, G. K., & Chen, L. (2016). Comparison on batch anaerobic digestion of five different livestock manures and prediction of biochemical methane potential (BMP) using different statistical methods. *Waste Management*, 48, 492–502.
- 9) Lesteur, M., Bellon-Maurel, V., Gonzalez, C., Latrille, E., Roger, J. M., Junqua, G., & Steyer, J. P. (2011). Alternative methods for determining anaerobic biodegradability: A review. *Process Biochemistry*, 45(4), 431–440. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6THB-4XVK414-4/2/9a52875d3080664b7407ba18bcffe1b2>
- 10) Lesteur, M., Latrille, E., Maurel, V. B., Roger, J. M., Gonzalez, C., Steyer, J. P., & Junqua, G. (2011). First step towards a fast analytical method for the

determination of Biochemical Methane Potential of solid wastes by near infrared spectroscopy. *Bioresource Technology*, 102(3), 2280–2288.

- 11) Palmowski, L. M., & Müller, J. A. (2000). Influence of the size reduction of organic waste on their anaerobic digestion. *Water Science and Technology*, 41(3), 155–162. <https://doi.org/10.2166/wst.2000.0067>
- 12) Raposo, F., Banks, C. J., Siegart, I., Heaven, S., & Borja, R. (2006). Influence of inoculum to substrate ratio on the biochemical potential of maize in batch test. *Process Biochemistry*, 41, 1444–1450.
- 13) Raposo, F., Fernandez-Cegri, V., De la Rubia, M. A., Borja, R., Béline, F., Cavinato, C., Demirer, G., Fernandez, B., Fernandez-Polanco, M., Frigon, J. C., Ganesh, R., Kaparaju, P., Koubova, J., Méndez, R., Menin, G., Peene, A., Scherer, P., Torrijos, M., Uellendahl, H., Wierinck, I., & de Wilde, V. (2011). Biochemical methane potential (BMP) of solid organic substrates: evaluation of anaerobic biodegradability using data from an international interlaboratory study. *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, 86, 1088–1098.
- 14) Rodrigues, R. P., Rodrigues, D. P., Klepacz-Smolka, A., Martins, R. C., & Quina, M. J. (2019). Comparative analysis of methods and models for predicting biochemical methane potential of various organic substrates. *Science of The Total Environment*, 649, 1599–1608. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2018.08.270>
- 15) Schievano, A., Pognani, M., D'Imporzano, G., & Adani, F. (2008). Predicting anaerobic biogasification potential of ingestates and digestates of a full-scale biogas plant using chemical and biological parameters. *Bioresource Technology*, 99(17), 8112–8117. <http://www.sciencedirect.com/science/article/B6V24-4SCTMW4-8/2/425a2bc5430ff42eb55fe48c20266259>
- 16) Triolo, J. M., Sommer, S. G., Moller, H. B., Weisbjerg, M. R., & Jiang, X. Y. (2011). A new algorithm to characterize biodegradability of biomass during anaerobic digestion : Influence of lignin concentration on methane production potential. *Bioresource Technology*, 102(20), 9395–9402.

CO-DIGESTION DES DECHETS VEGETAUX ET DE FERME D'ELEVAGE

par

RASOLOARIDIMBY Gisèle^(1,2), RARIVOSON Nantenaina V.^(1,2),
MINOARISOA Faratiana H.⁽¹⁾, RAKOTOSAONA Rijalalaina^(2,3)

(1) Mention Ingénierie Pétrolière, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Ecole Doctorale Géotechnologie, Chimie et Ingénierie de Projet (GCIP), Université d'Antananarivo, Madagascar

(3) Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

La méthanisation est une technique proposée pour la valorisation énergétique des déchets agricoles. Les expérimentations réalisées lors de notre recherche visent à valoriser essentiellement des fientes de poules auprès d'un agriculteur venant de la Commune Urbaine d'Imerintsiatosika. Nous avons réalisé des analyses physico-chimiques de la fiente de poules et avons conduit des essais de digestion et de co-digestion dans des biodigesteurs de laboratoire. Des tests d'inflammabilité ont été effectués pour confirmer la présence de gaz. Les résultats issus de notre étude ont montré que la co-digestion de la fiente de poules est plus productrice comparée à sa monodigestion, les co-substrats utilisés étaient de la bouse de vache et de la paille de riz. Les gaz étaient bien inflammables.

Mots clés : Co-digestion, Fiente de poule, Energie propre, Développement durable

ABSTRACT

Anaerobic digestion is an important technique for the energy recovery for agricultural waste. The experiments carried out during this research is to product the poultry waste from a farming in Imerintsiatosika. Firstly, we achieved physico-chemical analyzes of the droppings chicken and conducted an experiment of an aerobic co-digestion in laboratory biodigester. And finally, a flammability test was performed to confirm the presence of gas flammable. The results from our study have shown that the co-digestion of the chicken fee is more producing compared to its monodigestion, the co-substrates used in were: cow dung and rice straw. The gases were flammable.

Keywords : Co-digestion, Potholes, Clean energy, Sustainable development

INTRODUCTION

Pour le développement durable et la préservation de l'environnement, l'énergie renouvelable est devenue l'une des clés majeures de cette perspective. Le taux énergétique dans un pays fait partie de l'un des indicateurs de son développement. À Madagascar, seulement 15% de la population ont accès aux ressources énergétiques électricité (Ministère de l'Energie et de l'hydrocarbure, Euei, 2015). Elle fait partie des pays en voie de développement en insuffisance énergétique dont 80% de la population active vivent en faveur du secteur agricole (Ministère de l'agriculture, de l'agroalimentaire et de la forêt, 2014). Ainsi, pour ne pas dépendre totalement des ressources fossiles qui sont chères surtout dans les pays en voie de développement, pourquoi ne pas valoriser les ressources disponibles à la portée des paysans ? De plus, cette valorisation réduit, voire supprime les soucis énergétiques. Selon Tahri et *al.* (2012), la co-digestion de déchets d'abattoirs et de volailles améliorent le rendement de biogaz, également en co-digérant de la fiente de volaille avec du lisier de porc. Rarivosoa (2005) relevait un meilleur rendement lors de leurs expérimentations, ainsi que Sakouvogui et *al.* (2018) dans leur recherche révèle l'importance de la co-digestion de bouse de vache avec de la fiente de poule. Notre recherche vise à trouver la possibilité de valoriser de la fiente de poule co-digérée avec de la bouse de vache et paille de riz. La question qui se pose est : Est-ce que la co-digestion de fiente de poule et paille de riz, et de bouse de vache produit du Méthane? Quelles seraient les proportions idéales ? Pour pouvoir tenir compte des différents composants de la matière première principale : fiente de poules, des analyses physico-chimiques ont été réalisées au sein du Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE). Ensuite, nous avons expérimenté la co-digestion dans des digesteurs de laboratoires de 4l au sein du Centre National de Recherche Industrielle et Technologique (CNRIT) pour apprécier les différents résultats par digestion tout en vérifiant leur inflammabilité.

MATERIELS ET METHODES

Substrat principal : la fiente de poules

Comme matière principale, nous avons utilisé de la fiente de poules. Celle-ci a été prélevée auprès d'un agriculteur à Imerintsiatosika. La taille de son élevage est constituée de 500 poules pondeuses qui produisent 4 à 5 brouettes de 40 à 50 kg de fiente par semaine. L'alimentation de ces poules est composée de maïs, de la farine de thon, des complexes multivitaminés, et du son de riz.

Pour notre expérimentation, nous avons prélevé 2 500 g de fientes de poules. Une partie de l'échantillon, c'est à dire 250g, a fait l'objet d'analyses physico-chimiques : matières sèches, humidité, carbone organique, azote, DBO₅, protéines, matières organiques, pH, et l'autre partie, 2 250 g, a été utilisés pour la digestion anaérobie.

Co-substrats et leurs caractéristiques

Paille de riz

Les pailles de riz d'une quantité de 375g ont été prélevées dans les rizières aux environs du Campus universitaire de Vontovorona. Ce sont des pailles fraîches collectées durant le mois de Mai, période de la grande récolte à Madagascar. Avant la co-digestion, les pailles ont été découpées afin de faciliter leur digestion. Les caractéristiques physico-chimiques observées dans cette étude sont : le teneur en matière sèche, le teneur en humidité, le carbone organique, l'azote, le rapport C/N, et les matières organiques, les protéines. Ces dernières ont été extraites dans des revues bibliographiques et sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques de la paille de riz extraites dans les bibliographies

Paramètres	Paille de riz	Sources
Teneur en matières sèches (%)	93,32	Gongnet <i>et al.</i> (1997)
Teneur en humidité (%)	6,68	
Carbone organique (%)	45,02	Kitani <i>et al.</i> (1999)
Azote total (%)	0,75	Kitani <i>et al.</i> (1999)
C/N	60,02	
Matières Organiques totales (%)	90,04	C*2
Protéines	4,71	N*6,2

Le fumier de vache

Le fumier de vache a été récolté au sein du campus Vontovorona, d'une quantité de 375g. Les caractéristiques physico-chimiques du fumier de vache ont été recherchées dans des bibliographies, concernant notamment : les matières sèches, l'humidité, le carbone organique, l'azote, le rapport C/N, les protéines, les matières organiques, les DBO₅ et qui sont résumées dans le Tableau 2.

Tableau 2 : Caractéristiques de la bouse de vache extraites d'études bibliographiques

Paramètres	Fumier de vache	Sources
Teneur en matières sèches	15%	Kitani <i>et al.</i> (1999)
Teneur en humidité	85%	

Carbone organique	28,02%	Rabetokotany (2013)
Azote total	2,15%	Rabetokotany (2013)
C/N	14,72	
Protéines	13,43%	N*6,2
Matières Organiques totales	63,3%	C*2
DBO ₅	20,9g.l ⁻¹	Barrington <i>et al.</i> (1997)

Analyses physico-chimiques

Matière sèche

Le pourcentage de matière sèche d'un mélange de substances est la masse après séchage à 105°C et appelée également teneur en solides totaux (ST).

$$MS = \frac{m_{\text{après étuve}}}{m_{\text{brute}}} \times 100$$

Teneur en Matière Sèche

Humidité

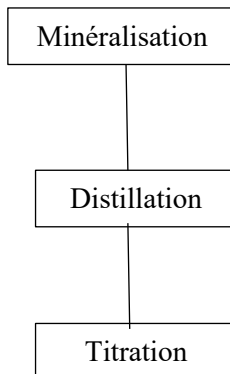
Pour le calcul de la teneur en humidité, la formule appliquée étant :

$$\%Humidité = \frac{m_{\text{brute}} - m_{\text{après étuve}}}{m_{\text{brute}}} \times 100$$

Teneur en humidité

Azote totale

La mesure de la teneur en azote s'est effectuée par la méthode de Kjeldhal.



Etapes de la Méthode Kjeldhal

$$N\% = \frac{V \times n \times 1,4}{\text{prise d'essai}}$$

Calcul de la teneur en Azote

V=volume de la solution de la solution titré H₂SO₄ en millilitre

n=Normalité du H₂SO₄

prise d'essai=masse de l'échantillon en gramme

1,4 = coefficient de proportionnalité de l'azote

Carbone

La mesure de la teneur en carbone consiste à oxyder en excès l'échantillon dans du bichromate de potassium avec du sulfure de dihydrogène concentré.

$$\%C = \frac{0,39}{m_{\text{échantillons}}} [(N_{\text{réd}} V_{\text{réd}}) - (N_{\text{réd}} V_{\text{réd}})]$$

Teneur en Carbone

$m_{\text{échantillons}}$: masse de l'échantillon en gramme

$N_{\text{réducteur}}$: normalité du réducteur

$V_{\text{réducteur}}$: volume du réducteur en millilitre

0,39 = coefficient de proportionnalité du Carbone

DBO₅

La mesure du DBO₅ consiste à diluer l'échantillon dans un milieu de culture avec ensemencement puis incubé pendant 5 jours à l'obscurité, dans une enceinte réglée de ±20°C. Puis mesurer l'oxygène restant après les 5 jours pour apprécier son niveau de dégradation.

Essais de co-digestion

Matériels utilisés

Les expériences ont été réalisées au sein du laboratoire du CNRIT, nous avons effectué trois essais dans des biodigesteurs d'un volume de 4l.

Les matériels utilisés étant : 3 biodigesteurs de 4l, 1 bac d'immersion, trois gazomètres, 1 bac de récupération d'eau, 1 thermostat dont le montage et la disposition sont présentés dans la Photo 1.



Photo 1 : Montage et disposition des matériels au CNRIT

Masse des substrats dans chaque biodigesteur

Les quantités des substrats dans chaque biodigesteur sont récapitulées dans le Tableau 3.

Tableau 3 : Tableau récapitulatif des expériences effectuées au CNRIT

Biodigesteurs	Substrat principal : Fiente de poule (g)	Co-substrat	
		Bouse de vache (g)	Paille de riz (g)
BD N°1	1000	0	0
BD N°2	750	125	125
BD N°3	500	250	250

Conduite de l'expérience

Les expériences ont été réalisées au sein du laboratoire du CNRIT et le déroulement se présente comme suit :

Étape 1 : Le mélange substrat-eau est introduit dans les 3 BD.

Étape 2 : Le bac d'immersion est rempli d'eau afin de réchauffer les BD grâce au thermostat et les biodigesteurs sont posés à l'intérieur. Le thermostat est réglé à $\pm 3/38^{\circ}\text{C}$.

Étape 3 : Le biogaz produit est ensuite recueilli dans les gazomètres, gradués avec du papier millimétré.

Étape 4 : L'eau venant du gazomètre est récupérée dans le bac de récupération en fonction du débit de biogaz produit.

Afin de mener à bien cette expérience, un suivi quotidien à un temps fixe (à midi) de production de biogaz s'impose. Il s'agit ici à enregistrer dans une fiche de production journalière les paramètres à mesurer suivants :

- La hauteur du déplacement de biogaz dans le gazomètre ;
- Le niveau de la température ;
- L'inflammabilité du biogaz produit ;
- Le niveau d'eau dans le bac d'immersion.

Les données obtenues permettent d'apprécier et d'interpréter la productivité en biogaz telle que l'évolution en fonction de chaque proportion, le volume cumulé de la production pendant 25 jours, avec la production moyenne journalière pour comparer leur rendement en biogaz.

Test de gaz

À la fin des expériences, des tests sont à réaliser afin de vérifier l'inflammabilité du biogaz produit, en allumant et en observant la couleur de la flamme, ainsi que l'odeur du gaz par le sens d'odorat.

RESULTATS

Résultats des paramètres physico-chimiques

Les résultats obtenus au sein du Centre National de Recherche sur l'Environnement (CNRE) sont présentés dans le Tableau 4.

Tableau 4 : Résultats des paramètres physico-chimiques réalisés au CNRE

Paramètres	Fientes de poule
Teneur en matières sèches	71,41%
Teneur en humidité	28,59%
Carbone organiques	28,08%
Azote total	4,35%
C/N	6,45
Matières Organiques totales	56,16%
Protéines	27,18%
DBO ₅	24,337mg d'O ₂ .l ⁻¹
pH	7,27

Résultats sur les digestions

Les résultats obtenus au bout de 25 jours, au Centre National de Recherche Industrielle et Technologique (CNRIT), sont récapitulés dans le Tableau 5.

Tableau 5 : Tableau récapitulatif des résultats sur les digestions

Biodigesteur	Substrat principal : Fiente de poule	Co-substrat		Quantité totale de matières organiques apportées	Production de gaz pendant 25 jours	Production moyenne journalière	Production de biogaz par MO par jour
		Bouse de vache	Paille de riz				
BD N°1	1000g	0	0	561,6g	≈0.01 l Très faible		
BD N°2	750g	125g	125g	612,875g	37,06 l	1,48 l.j ⁻¹	0,00241 l.gMO ⁻¹ .j ⁻¹
BD N°3	500g	250g	250g	663,95g	30,27 l	1,21 l.j ⁻¹	0,00182 l.gMO ⁻¹ .j ⁻¹

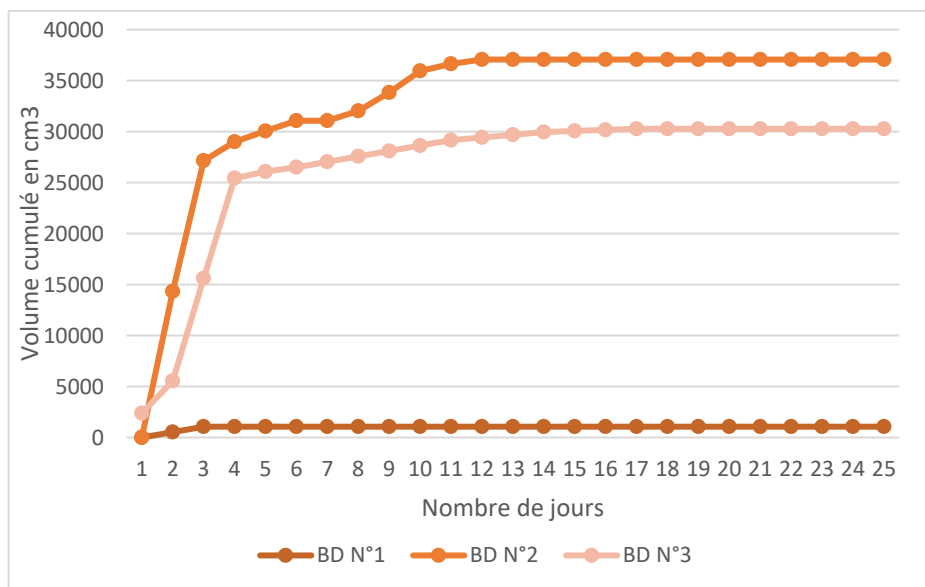


Figure 3 : Courbe du volume cumulé du biogaz

Test d'inflammabilité du gaz

Les résultats du test de flamme sur les deux biodigesteurs N°2 et N°3 étaient bien inflammables, avec un peu d'odeur caractéristiques de CO₂, la flamme étant de couleur bleue et jaune (Photo 2).



Photo 2 : Test d'inflammabilité au CNRIT

DISCUSSION

Caractéristiques des substrats

Durant les expériences effectuées au sein du laboratoire du CNRIT, après calcul, nous avons remarqué que la valorisation de la fiente de volaille est plus intéressante en co-digestion ; pour une quantité de 1 kg de déchets d'après notre expérience, la formule la plus adaptée est de 75% fiente de poule, 12,5% fumier de vache et 12,5% paille de riz. Ici, nous avons utilisé de la paille de riz fraîche car l'expérience s'est déroulée en période de grande récolte dans l'optique également de les valoriser énergétiquement.

Matières Sèches (MS)

La teneur en MS permet de définir si la fermentation est sèche ou humide quand la teneur en matière sèche dépasse les 15% ou 30% minimum de teneur sèche. La teneur en MS du mélange-substrat est de 59,9%, alors le type de fermentation est une digestion sèche.

Carbone et azote

L'azote est le nutriment indispensable après le Carbone. L'azote (N) aide le carbone à se décomposer et c'est l'un des éléments primordiaux favorisant le processus de la Méthanisation. Lors de son hydrolyse, l'Azote est transformé en ammoniac (NH₃) qui se dissocie pour former l'ammonium, alors qu'une concentration excessif d'ammoniac/ammonium a un effet inhibiteur pour la méthanogènes, ce qui induit à considérer le rapport C/N.

Rapport C/N

Le taux de C, N sont dépendants, car si peu d'azote et un taux élevé de carbone, le métabolisme est incomplet, et si beaucoup d'azote et peu de carbone, il y aura un excès d'ammoniac formé, ce qui augmentera le taux de pH et inhibera le processus, voir même l'arrêt total de la méthanisation. Le rapport C/N doit être compris 10-30/1 (Hartig, 2010), ici le rapport de C/N de la fiente de poules seule est de 6,45 et le C/N total est de 14,48. Le rapport C/N permet de juger le degré d'évolution de la matière organique, c'est-à-dire son aptitude à se décomposer plus ou moins rapidement (Tappero, 2017). Comparés aux analyses effectuées au CNRE, dont le rapport C/N =6,45 de la fiente de poules qui est un peu bas, donc l'apport des co-substrats aide à optimiser le mélange durant leur co-digestion.

DBO₅

Le DBO₅ ou la demande biologique d'oxygène en 5 jours permet de savoir comment la matière organique se dégrade et comment son niveau de pollution dans l'eau, le résultat était de 24,337 mg d'O₂.l⁻¹ à 20°C. Ici on a utilisé 313,3 mg d'échantillon pour le DBO₅, en interprétant, la masse de 313,3mg de fiente de poule a besoin de 24,337mg d'O₂ pour pouvoir être dégradé. Ce paramètre permet d'apprécier la vitesse de dégradation, et aussi le niveau de pollution du substrat dans l'eau en cas de déversement dans l'environnement.

Expériences dans les biodigesteurs

BD N°1 : fiente de poules 100%. Pas de résultat. La quantité de gaz était peu satisfaisante d'un volume cumulé de 0,1062 L, cependant quelques hypothèses se présentent :

Hypothèse 1 : il pouvait y avoir une éventuelle fuite, car il y avait une production de gaz au début puis cela s'est arrêtée.

Hypothèse 2 : le changement de température a pu avoir de l'impact sur l'arrêt de la production car notre expérience a été réalisée en hiver.

BD N°2 : fiente de poules 75% et paille +bouse de vache 25% : 37 062,27 cm³ soit 37,062 l : 1,48 l/jour pour un TRH de 25 jours avec une production maximale du 1er au 3ème jour. Au niveau de rendement de gaz, la formule est bien intéressante.

BD N°3 : 50% de fiente de poules, 25% bouse de vache, 25% de paille de riz, le volume de gaz cumulé était de 30,27 L avec 1,21 l/j. Au point de vue de production, la formule appliquée au biodigesteur N°3 est plus stable, mais en rendement elle est basse comparé au BD N°2.

Ce résultat est similaire aux recherches effectuées par Sakouvogui et *al.* (2012), leur condition de production s'est réalisée sous une température de 23°C à 32°C pendant 25 jours dont le volume cumulé était de 35,5 l pour la co-digestion, avec 1,5 kg de substrat : 50% de bouse de vache et 50% de fiente de poule et selon Rarivosoa et *al.* (2005) la co-digestion de fiente de poules conduit à un gaz de meilleure qualité.

De même, durant les expériences effectuées par Ahmed et *al.* (2012), la production de gaz optimale se présentait avec de la co-digestion de 75% de déchets de volailles et 25% de déchets d'abattoirs durant leur recherche d'amélioration de rendement de biogaz, avec 760ml de gaz inflammables dans un bain marie de 35°C±2 dans un BD de 1L avec 16g de MS de substrats.

Donc, la proportion de 75% de fiente de poule avec 12,5% de bouse de vache, et de 12,5% de paille de riz semble plus intéressante.

Le test de flamme

La couleur jaune et bleue de la flamme indique que la combustion était incomplète. Le CO₂ n'est pas inflammable tandis que le méthane l'est.

CONCLUSION

Le présent travail a pour objectif de montrer un aspect de la valorisation énergétique de la fiente de poules par co-digestion avec de la bouse de vache et de la paille de riz.

D'après cette recherche la co-digestion est possible et faisable techniquement. Elle présente une meilleure opportunité pour les fermiers ; pour préserver les patrimoines forestiers, pour atténuer l'utilisation excessive des charbons de bois, plus particulièrement à Madagascar.

Ce travail de recherche a permis de trouver :

- Les caractéristiques physico-chimiques de la fiente de poules au laboratoire dont les valeurs sont les suivantes : *matière sèche* : 83,41%, *teneur en humidité*: 16,58%, *carbone organique* : 28,08%, *azote total* : 4,35%, C/N : 6,45 ; DBO₅: 24,337mg d'O₂.l⁻¹, *matières organiques totaux* : 56,16%, *protéines* : 27,18%, pH : 7,27.
- La meilleure formulation pour 1000g de substrat lors des différentes expérimentations de la co-digestion correspond à 75% pour le substrat principal en fiente de poule et 25% pour les co-substrats dont 12,5% pour la paille et 12,5% pour la bouse de vache, le volume cumulé pendant un temps de rétention de 25 jours était de 37,06 l de biogaz, avec une production moyenne de 1,48 l/j de gaz dont 0,00241 l.gMO⁻¹ par jour avec un meilleur rendement en biogaz.
- On a procédé à un test du gaz, il a bien été inflammable.

Cette recherche est à la fois qualitative et quantitative. Elle prend en compte trois dimensions que pèsent sur le développement durable : enjeux économique, environnementale et sociale. Cependant, cette recherche offre une possibilité de valoriser les déchets de volailles en co-digestion avec du paille de riz et de bouse de vache afin de bénéficier davantage le secteur agricole. Autres sujets de recherche pourraient s'ouvrir comme la valorisation de bouse de vache comme substrat principale co-digérée avec d'autres résidus d'agricultures et/ou de fiente.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Barrington, B., Masse, D., Laguem, C., Fortier, M., & Cotier, D. (1997). Les fumiers de bovins laitiers: une ressource qui se gère. 36p.
- 2) Ferrer M., (2018). Capitalisation des secteurs Biogaz et Foyers Améliorés à Madagascar. In Etc Terra Rongead : 215p.
- 3) Gongnet, G.P, Fadiga, S. & Cisse, M. (1997). Amélioration de la valeur alimentaire de la paille de riz par le traitement à l'urée et la complémentation en céréales chez le mouton Peulh sénégalais. *Tropicultura*. 6p.
- 4) Güiza, R. & Stiven, M. (2017). Science of the Total Environment Improvement of Wheat Straw Anaerobic Digestion through Alkali Pre-Treatment : Carbohydrates Bioavailability Evaluation and Economic Feasibility. *Science of the Total Environment* 595: 651–659
- 5) Hartig, Sabine FNR, division Communication et relations publiques (2010). Guide sur le biogaz, de la production à l'utilisation. GIZ, 247p.,
- 6) Kitani O. & Hall, C W. (1989). Phyllis2-Database for biomass and waste.
- 7) LAB le laboratoire territorial, www.laboratoireterritorial.fr, la première plateforme collaborative des acteurs du développement économique (25 Avril 2017) « Développement durable : l'opportunité de la méthanisation » In Actualité du développement territorial.
- 8) Ministère de l'Énergie et de l'hydrocarbure. Euei. (2015) Assistance pour le Développement d'une Nouvelle Politique de l'Énergie et d'une Stratégie pour la République de Madagascar – Phases 2 et 3. *Document d'Etude de la Politique et Stratégie de l'Énergie*. 234p
- 9) Ministère de l'Agriculture de l'Agroalimentaire et de la Forêt. (2014). Madagascar, Les politiques agricoles à travers le monde, quelques exemples. /www.agriculture.gouv.fr/www.alimentation.fr : 6p.

- 10) Minoarisoa, F. (2020). Fiente de poule et de bouse de vache dans la commune Urbaine d'Imerintsiatosika. Mémoire de fin d'études en Licence, Antananarivo : École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo. 51p
- 11) Rarivosoa, A. (2005). Essais de production de biogaz par co-digestion anaérobie du lisier de porc de la fiente de volaille en culture discontinue. Mémoire de recherche pour l'obtention du Diplôme d'Etude Approfondies de biochimie. Facultés de Sciences. Université d'Antananarivo. 69p.
- 12) Rarivoson Rabetokotany, N.V. (2013). Matières organiques exogènes issues de l'élevages et de la ville en milieu tropical : apport de la spectrométrie proche infrarouge pour leur orientation d'usage agronomique et/ou énergétique. Thèse en cotutelle pour l'obtention du diplôme de Doctorat en Sciences. Université de la Réunion. Université d'Antananarivo. 226p.
- 13) Sakouvogui, A., Balde, Y.M., Barry, M. F., Kante, C., & Keita, M. (2018). Evaluation of the biogas potential of cow dung, hog dung and codigestion at Mamou, *Afrique SCIENCE* 14(5) : 147-157.
- 14) Tahri, A., Djaafri, M., Khelafi, M., Kalloum, S., & Salem F. (2012). Amélioration du rendement de la production de biogaz par co- digestion des déchets organiques: Déchets d'Abattoir et de Volaille. *Revue des Energies Renouvelables SIENR'12 Ghardaïa*. 7p.
- 15) Tappero, D & ADEME. (2017). Méthanisation. Feuille de route stratégique. 40p.
- 16) WFP. Programme Alimentaire Mondial (2019). La filière riz à Madagascar face à la fortification. Antananarivo Madagascar. In Rapport du Bureau pays du Programme Alimentaire Mondial à Madagascar. Travail de terrain et collecte de données menés du 04 Février au 28 Avril 2019. 36p

ETUDE DE L'ELIMINATION DES BACTERIES DE L'EAU PAR FILTRATION SUR POUZZOLANE

par

RAKOTONDRAZAKA Fenosoa S.⁽¹⁾, RATSIMBA Marie H.⁽¹⁾,
RANDRIANA Nambinina R.⁽¹⁾, RAKOTOMAMONJY Pierre⁽¹⁾,
ANDRIANARISON Edouard R.⁽¹⁾, RAKOTOSAONA Rijalalaina⁽¹⁾

(1) Mention Génie des Procédés Chimiques et Industriels, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA),
Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Le quart des foyers malgaches utilisent les eaux de puits non protégés, sans traitement au préalable, au détriment de leur santé. Se souciant de ce problème, l'objectif de cette étude est de concevoir un filtre céramique domestique en utilisant l'argile, la pouzzolane et les balles de riz qui sont abondantes à Madagascar. La confection du filtre comprend le prétraitement des matières premières (séchage, broyage, tamisage), malaxage avec de l'eau, moulage, séchage du filtre moulé et sa cuisson au four. Les eaux de puits sont analysées avant et après la filtration. D'après les essais, la poudre de pouzzolane de granulométrie 600µm et la cuisson du filtre à 850°C pendant 5 à 6 heures permettent d'obtenir un filtre bien lisse et sans fissure. La meilleure composition du filtre est de 85% d'argile noire, 10% de poudre de pouzzolane et 5% de balle de riz. Son débit moyen est de 1,81 litre par heure. Les teneurs en matières organiques et en bactéries des eaux de puits brutes dépassent les normes de potabilité de l'eau. Elles respectent les normes après filtration. Les matières organiques s'améliorent de 57 %. Les *Escherichia coli*, entérocoques et anaérobies sulfite-réducteurs sont entièrement éliminés et les coliformes totaux à 99,89%. Les nitrates néfastes pour la santé diminuent de 80% et la turbidité de 47%. Tout en valorisant les déchets de balle de riz, cette recherche contribue à l'atteinte du troisième de l'Objectif du Développement Durable 3 (ODD) « Bonne santé et bien-être » et du sixième de l'ODD 6 « Eau propre et assainissement ».

Mots clés : Argile, Balle de riz, Eaux de puits, Filtre à eau, pouzzolane

ABSTRACT

A quarter of Malagasy households use water from unprotected wells, without prior treatment and to the detriment of their health. Concerned about this problem, the objective of this study is to make a domestic ceramic filter using the clay, pozzolana and rice husks that are abundant in Madagascar. The making of the filter includes pre-treatment of the raw materials (drying, grinding, sieving), mixing with water, moulding, drying of the moulded filter and its firing in the kiln. Well water is analysed before and after filtration. According to the tests, pozzolan powder with a particle size of 600µm and baking the filter at 850°C for 5 to 6 hours give a very smooth and crack-free filter. The best composition of the filter is 85% black clay, 10% pozzolan powder and 5% rice husk. The average flow rate is 1.81 litres per hour. The organic matter and bacteria content of the raw well water exceeds the drinking water standards. They are within the standards after filtration. Organic matter improves by 57%. *Escherichia coli*, enterococci and sulfite-reducing anaerobes are completely eliminated and total coliforms are reduced to 99,89%. Nitrates are reduced by 80% and turbidity by 47%. While recovering rice husk waste, this research contributes to achieving the third sustainable development objective (SDO) «Good health and well-being» and the sixth SDO «Clean water and sanitation».

Keywords : Clay, Filter, Pozzolan, Rice Husk, Well Water

INTRODUCTION

La recherche sur le filtre à eau en céramique n'est pas récente (Beddiar K. et *al.*, 2002). Depuis plus de 100 ans, il a été utilisé pour le traitement de l'eau potable sous diverses formes, en utilisant le mélange argile-balle de riz ou argile-sciure de bois (Baudu M. et *al.*, 1993).

A Madagascar, d'une part, seulement 31% de la population ont accès à l'eau potable chez eux, la plupart utilisent l'eau de puits, sans traitement au préalable (Takahisa H., 2016). L'utilisation d'un filtre à eau domestique pourrait être une solution de traitement des eaux de puits. Des études antérieures ont utilisé l'argile et les balles de riz pour la conception de filtre à eau (Lantagne D., 2001, Brown J., 2007, Hagen et *al.*, 2009, Klarman M., 2010, Travis M., 2010, Kleiman S., 2011). D'autre part, la pouzzolane est très abondante à Madagascar (Parsons S. A. et *al.*, 2006) et des études ont déjà montré son efficacité en traitement des eaux grâce à sa porosité, comme celle de Rakotondramiary S. en 2015 et celle de Razafindratsimba R. L. P. en 2019. Ces raisons nous ont poussé à concevoir un filtre domestique à eau potable en céramique avec de l'argile, de la balle de riz et de la pouzzolane. Ce filtre serait-il capable d'éliminer les impuretés dans l'eau de puits ? L'objectif est d'obtenir un filtre à eau potable en céramique fabriqué à partir des matériaux locaux, accessible pour toute la population Malagasy.

MATERIELS ET METHODES

Plusieurs matières ont été utilisées, à savoir l'argile, les balles de riz, la pouzzolane naturelle.

Matières premières

Argile

Dans le cadre de la présente étude, deux types d'argile ont été utilisés : l'argile noire avec une forte plasticité et riche en carbone et tourbe et l'argile rouge, riche en fer, utilisé par les potiers, pour savoir lequel de ces deux types est le plus compatible à la fabrication de filtre à concevoir.

Balles de riz

Elles sont produites par les unités de décorticage du riz. Elles sont riches en silice. Des études antérieures ont déjà montré l'utilisation réussie des balles de riz en traitements des eaux en tant que coagulant (Razafindratsimba R.L.P., 2019) et charbon actif (Rakotondramiary S., 2015).

Pouzzolane naturelle

Elle est de couleur grise-noire. Sa composition chimique est présentée par le Tableau 1 suivant.

Tableau 1 : Composition chimique de la pouzzolane (Rasamoela M., 2011)

Eléments présents	SiO ₂	Al ₂ O ₃	TiO ₂	SO ₃	CaO	MgO
Teneurs	38 %	30,7 %	12,6 %	2,4 %	9,8 %	5,5 %

Moule et presse à moule

La moule utilisée pendant la fabrication du filtre était en bois. De forme cylindrique, elle était composée de deux pièces, mâle et femelle, de diamètres différents, différence qui donne l'épaisseur du filtre. Le filtre obtenu serait de forme cylindrique à base sphérique de 8 cm de diamètre et 1 cm d'épaisseur.

Une presse à moule métallique est également utilisée. C'est une presse manuelle réglable formée par deux plaques en tôles épaisses liés par deux tiges filetées avec écrous. Ces deux plaques peuvent s'approcher grâce au serrage des deux tiges, provoquant ainsi la pression nécessaire pendant le pressage du filtre.



Photo 1 : Moule et presse à moule

Processus de conception du filtre

Afin de concevoir le filtre à eau potable en céramique avec de l'argile, de la balle de riz et de la pouzzolane, un processus devait être suivi. Il est le même que celui des études antérieures (Bleu E. 2014, Soppe A. I. A. et *al.*, 2015, Gupta S. et *al.*, 2018) :

- Pesage des matières premières ;
- Prétraitements des matières premières : séchage de l'argile à l'air libre, broyage de l'argile et de la pouzzolane, criblage de la balle de riz et tamisage de la pouzzolane sur un tamis d'ouverture 4 mm, 800 µm et 600 µm ;
- Mélange à sec des matières premières
- Ajout de l'eau jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et compacte. Approximativement, un bon malaxage du mélange de 2kg a nécessité 12,5% d'eau. L'excès d'eau compliquait le démoulage du filtre ;
- Pétrissage de la pâte en boudin, puis en bol cylindrique pour être introduit dans le moule puis pressé pour avoir le filtre ;
- Moulage du filtre ;
- Séchage à l'air libre pendant 1 à 3 jours selon le climat ;
- Cuisson du filtre pendant 5 à 6 heures à une température de 850°C.

Eaux à filtrer : eaux de puits

Afin d'évaluer l'efficacité de filtres face aux paramètres microbiologiques et aux paramètres physico-chimiques, le test de filtration avec de l'eau de puits, une eau de consommation habituelle dans plusieurs zones périurbaines et dans les milieux ruraux de Madagascar, a été retenu.

Le cadre de la présente étude est un puits traditionnel de 13 m de profondeur, muni d'un couvercle non étanche. Il assure la fourniture en eau de six ménages. Il est exposé à des forts risques de contamination de l'eau avec la proximité d'une porcherie à 2 m du puits, d'une douche à 1 m et d'un déversoir d'eaux usées domestiques qui atteignent les infrastructures du puits.



Photo 2 : Photo du puit étudié

Test d'efficacité du filtre

Le filtre ayant réussi à passer toutes les étapes de fabrication, sans être endommagé subit des tests d'efficacité : mesure de débit de filtration, analyse des paramètres bactériologiques et physico-chimiques de l'eau filtrée.

Mesure de débit de filtration

Pour ce faire, le filtre rempli d'eau à traiter est disposé au-dessus d'un récipient. Le volume d'eau à filtrer ainsi que la durée écoulée lors de la filtration sont mesurés pour pouvoir déterminer le débit de la filtration.

Analyse des paramètres physico-chimiques et bactériologiques

Les analyses physico-chimiques et bactériologiques des eaux de puits brutes et filtrées ont été faites dans le Laboratoire Qualité Eau de la JIRAMA Mandrozeza.

Les paramètres physiques analysés sont l'odeur, la couleur, le pH, la turbidité, la température, les matières en suspension (MES), la minéralisation et la conductivité. Les dérivés azotés (nitrites, nitrates et ammonium), les chlorures, les phosphates, les

sulfates ainsi que quelques métaux (fer et chrome) ont été aussi analysés, pour les paramètres chimiques.

L'analyse des quatre germes tests de potabilité de l'eau : coliformes fécaux, Escherichia Coli, entérocoques et Anaérobies sulfite-réducteurs (ASR) constitue l'analyse bactériologique. Ces germes sont déterminés par la méthode de filtration sur membrane suivie de culture bactérienne. Lors des analyses, plusieurs méthodes ont été adoptées.

a) Analyses des paramètres physiques

La plupart des paramètres physiques sont déterminés en utilisant des appareils de mesure de laboratoire :

- le pH est déterminé à l'aide de l'appareil ionomètre METTLER TOLEDO (Photo 3). Après rinçage, l'électrode de l'appareil est plongée dans l'échantillon à analyser. La valeur du pH s'affiche sur l'écran de l'appareil.



Photo 3 : Ionomètre

- la turbidité est mesurée avec le turbidimètre H 2100N (Photo 4). Cet appareil est muni d'une cuve turbidimétrique dans laquelle est versée l'eau à analyser. La valeur de la turbidité s'affiche sur l'écran après avoir introduit la cuve turbidimétrique remplie d'échantillon, dans l'appareil. L'unité de ce paramètre est le NTU (Nephelometric Turbidity Unit).

- la conductivité et la minéralisation sont déterminées avec le conductimètre WTW LF 538 (Photo 5). Après rinçage, l'électrode de l'appareil est plongée dans l'échantillon à analyser. Les valeurs de la conductivité et de la minéralisation s'affichent sur l'écran de l'appareil.



Photo 4 : Turbidimètre



Photo 5 : Conductimètre

- les matières en suspension (MES) sont quantifiées par la méthode de filtration sur membrane. L'échantillon est d'abord filtré sur un papier filtre. Ce dernier est ensuite séché à 105°C jusqu'à l'obtention d'une masse constante. La quantité de MES est obtenue en faisant la différence de masses de la membrane filtrante avant et après la filtration.

b) Analyses des paramètres chimiques

➤ Méthode spectrophotométrique

La plupart des paramètres chimiques sont déterminés par la méthode spectrophotométrique (absorption des radiations lumineuses de l'UV (ultra-violet) et du visible).

Le spectrophotomètre SECOMAM S750 (Photo 6) a été utilisé.



Photo 6 : Spectrophotomètre

Les dérivés azotés ont été déterminés par des méthodes spectrophotométriques colorimétriques.

- Pour *les nitrates*, un mélange de 50ml de l'échantillon avec quelques gouttes de solution d'acide chlorhydrique HCl 3N, en présence d'une solution tampon a été préparé. Cet échantillon percole ensuite à travers une colonne à cadmium à un débit de 7 à 10 ml/min dans le spectrophotomètre. Après ajout d'un réactif coloré et un repos de 15 mn, la lecture de la concentration en nitrates a été faite au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 540 nm.

- Pour *les nitrites*, un mélange de 50 ml de l'échantillon avec quelques gouttes de solution d'acide phosphorique H₃PO₄ 3N, en présence d'un réactif coloré, a été préparé. Après un repos de 15 mn, la lecture de la concentration en nitrites a été faite au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 540 nm.

- Pour *l'ammonium*, un mélange de 50 ml de l'échantillon avec quelques gouttes de phénol en présence d'un catalyseur et d'une solution oxydante a été préparé. Après agitation suivie d'un repos d'une heure, la lecture de la concentration en ammonium a été faite au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 640 nm.

- *Les sulfates* ont été déterminés aussi par la méthode spectrophotométrique néphélométrique. Un mélange de 39 ml de l'échantillon avec 1 ml d'acide chlorhydrique et 5 ml de chlorure de baryum (BaCl₂) a été préparé. Après agitation suivie d'un repos de 15 mn, la lecture de la concentration en sulfates a été faite au spectrophotomètre à la longueur d'onde de 650 nm.

➤ Méthode volumétrique

D'autres paramètres chimiques sont mesurés par la méthode volumétrique. Les chlorures sont déterminés par un dosage volumétrique avec le nitrate d'argent.

➤ Méthode colorimétrique utilisant des plaquettes

Cette méthode consiste à donner une certaine coloration à la solution à analyser en y ajoutant des réactifs adéquats, puis à comparer cette coloration avec une plaquette de référence. A une couleur correspond une valeur préétablie.

Cette méthode a été utilisée pour la quantification du fer.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Qualité du filtre selon les différentes compositions

Après divers essais, il a été constaté que seules les compositions dans lesquelles la proportion de la balle de riz était inférieure ou égale à 10% et la pouzzolane inférieure ou égale à 15% étaient réalisables avec une bonne plasticité. Au-delà de ces proportions, la pâte argileuse est friable, inadaptée à la production de filtre. Cela peut être dû à la propriété cassante de la balle de riz et la propriété rocheuse de la pouzzolane qui rend l'hétérogénéité du mélange.

La granulométrie de pouzzolane joue aussi un rôle important sur la qualité du filtre. Il a été observé que les mélanges n'étaient pas solides et se cassaient durant le séchage même si la pâte était réalisable avec une bonne plasticité (toutes les proportions de la pouzzolane inférieures ou égales à 15% et celles de la balle de riz inférieures ou égales à 10%), si la granulométrie de la pouzzolane était égale à 4mm, la plus grande taille qui a été utilisée. Pour y remédier, la granulométrie de la pouzzolane, a été diminuée à 800µm avec trois types de compositions, différenciées par leur proportion. Les filtres, ainsi obtenus, résistent au séchage et à la chaleur dans le four mais présentent des petites fissures. La granulométrie de la pouzzolane a été encore diminuée à 600µm. Cela a donc permis d'obtenir un filtre sans fissure composé de 85 % d'argile, 5% de balle de riz et 10% de pouzzolane. Ce mélange est ensuite malaxé avec de l'eau, environ 12,5% en masse jusqu'à l'obtention d'une pâte homogène et compacte.

Il a été observé que plus la taille de la pouzzolane augmente, la propriété rocheuse de la pouzzolane augmente, le mélange devient de plus en plus hétérogène, la pâte devient friable et les fissures augmentent. Ces dernières sont dues à la forte granulométrie de la pouzzolane et la chaleur reçue par l'argile pendant la cuisson dans le four.

En variant les températures de cuisson du filtre et d'après les aspects des filtres obtenus, il en résulte que lors de la cuisson, la chaleur a réduit la porosité de l'argile

et elle se rétrécit tandis que la pouzzolane se déstabilise et forme des masses poreuses car la cuisson se fait à 850°C, température bien suffisante pour la formation de celles-ci.

Débit de filtration

La courbe ci-dessous nous montre l'évolution de débit des deux filtres (F1 et F2) par jour. F1 désigne le filtre fabriqué à partir de l'argile rouge et F2 désigne celui fabriqué à partir de l'argile noire.

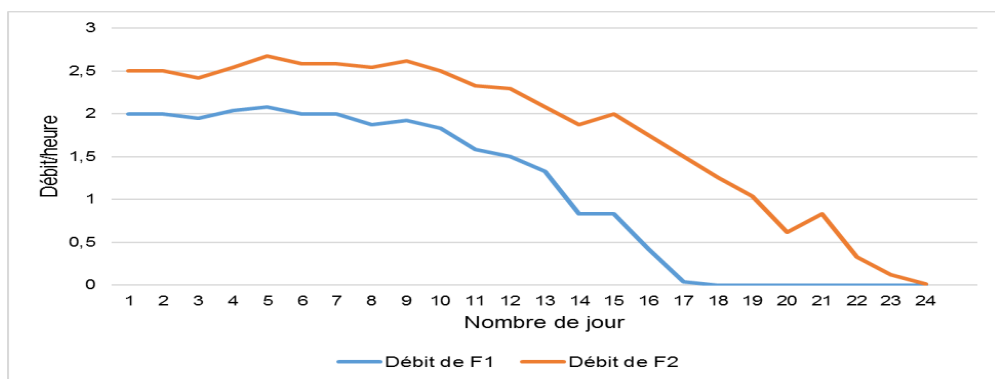


Figure 1 : Evolution journalière des débits des filtres

D'après les résultats présentés par les courbes ci-dessus, l'allure générale décroissante des courbes montre que les débits de filtration diminuent au fur et à mesure que la filtration évolue, ce qui est normal car tout phénomène de filtration arrive au stade de colmatage au bout d'un certain temps : au dix-septième jour pour F1 (filtre fabriqué à partir de l'argile rouge) et au vingt quatrième jour pour F2 (filtre fabriqué à partir de l'argile noire).

Suite au phénomène de colmatage, un lavage des filtres a été effectué et les essais de filtration repris jusqu'à l'apparition d'un nouveau colmatage des filtres. L'essai de filtration a duré huit semaines. Pendant ces temps, les deux filtres peuvent toujours atteindre leurs débits initiaux. En conclusion, les filtres doivent être lavés tous les vingt jours et peuvent être bien régénérés.

L'intervalle de valeurs, 1,49 à 2,13 L/h, donnée par ces filtres rejoint sensiblement celle trouvée par Lantagne D. en 2001, 1-3 L/h, dans son étude sur les filtres produits dans le pays nicaraguayen. Le débit moyen des deux filtres qui est de 1,81 L/h rejoint la tranche de valeurs admises par plusieurs études, entre 1 à 3,5 L/h (Lantagne D., 2001, Brown 2007, Travis 2010). Il faut noter que l'utilisation de la pouzzolane différencie cette étude de celles des autres études qui n'ont utilisé que l'argile et la balle de riz comme matières premières (Lantagne D., 2001, Brown J., 2007, Hagen et al., 2009, Klarman M., 2010, Travis M., 2010, Kleiman S., 2011). Le

Tableau 2 suivant compare les matières premières et les résultats de débit de l'étude et ceux des autres études antérieures.

Tableau 2 : Comparaison des débits des filtres de l'étude avec ceux des autres études antérieures

Matières premières	Débits L/h	Pays	Références
Argile, balles de riz et pouzzolane	1,49 – 2,13	Madagascar	Rakotondrazaka, 2020
Argile, balles de riz	1,5 – 3	Cambodge	Hagen <i>et al.</i> , 2009
Argile, balles de riz	0,6 – 2,6	Ghana	Kleiman Shanti, 2011
Argile, balles de riz	1 – 3,5	Ghana	Travis Miller, 2010
Argile, balles de riz	1 – 3	Cambodge	Brown Joseph, 2007
Argile, balles de riz	1 – 3	Nicaragua	Lantagne Daniel, 2001
Argile, balles de riz	1 – 9	Burkina Faso	Klarman Molly, 2010

Résultats des analyses bactériologiques

Le tableau 3 ci-après montre les résultats d'analyses des paramètres bactériologiques des eaux filtrées issues de F1 (formé avec de l'argile rouge) et F2 (formé avec de l'argile noire) ainsi que l'eau brute.

Tableau 3 : Résultats d'analyse bactériologique

Germes	Nombre de germes par 100 ml			Normes	
	F1	F2	Eau brute	OMS	Malagasy
<i>Coliformes Totaux</i>	280	10	9500	0	<1
<i>E. coli</i>	170	<1	850	0	<1
<i>Entérocoques</i>	<1	<1	50	0	<1
<i>ASR</i>	14	<1	>>10.000	0	<20

Les coliformes totaux sont principalement utiles comme indicateurs de l'efficacité de traitement ainsi que comme indicateurs de la croissance bactérienne après traitement. Au regard de la concentration résiduelle dans l'eau filtrée dans le Tableau 3 ci-dessus, l'eau issue du filtre F1 contient 280 UFC/100ml tandis que l'eau issue de F2 ne contient que 10 UFC/100ml. Cette faible présence de bactéries avec F2 peut être due à un regain de croissance bactérienne ou à une contamination postérieure de la filtration car ces bactéries sont très répandues dans l'environnement. Le contact

de l'eau filtrée sur le filtre sans argent colloïdal peut recontaminer l'eau (Lantagne D., 2001). En comparaison avec d'autre étude, nos les taux de bactéries résiduelles après filtration sont inférieurs à ceux de l'étude faite par Lantagne en 2001, comprises entre 15 à 300UFC/100ml.

La plupart des études antérieures sur le filtre en céramique ne cherchent que l'efficacité du filtre sur l'élimination des bactéries *coliformes totaux* et *E. coli* comme celles de Smith en 2004, Kleiman S. en 2011, Bleu E. en 2014, Sandeep Gupta et al en 2018. Mais dans la présente étude, c'est l'efficacité du filtre sur la réduction des quatre germes recommandés par l'OMS : *les coliformes totaux*, *les E. colis*, *les entérocoques* et les ASR qui est recherchée. Si nous comparons nos l'on compare les résultats à ceux des autres études (Lantagne 2001, Smith 2004, Bleu 2014), le filtre F2 est le plus efficace avec un faible risque de contamination des consommateurs : abattement en *coliformes totaux* jusqu'à 99,89% et abattement en *E. colis*, en *entérocoques* et en *ASR* jusqu'à 100%). Les études précédentes imprègnent leurs filtres avec de l'argent colloïdal afin d'améliorer leurs résultats et recommandent l'utilisation de chlore pour assurer l'élimination totale des bactéries dans l'eau filtrée. Nos valeurs d'abattement s'apparentent bien à celles trouvées par ces études faites sur les filtres en céramique imprégnés par l'argent colloïdal. Les valeurs de l'étude sont même parfois meilleures par rapport aux résultats des autres travaux de recherche.

Tableau 4 : Comparaison de l'efficacité des filtres de l'étude en termes de réduction microbienne avec celles des autres études

Matières premières	Type d'eau	Taux d'abattelements				Références
		CT	EC	EI	ASR	
Argile rouge, balle de riz, pouzzolane	Eau de puits	97,05	80	100	99,89	Rakotondrazaka, 2020a
Argile noire, balle de riz, pouzzolane	Eau de puits	99,89	100	100	100	Rakotondrazaka, 2020b
Argile, sciure de bois	Eau de rivière	99,50	99,99	Non validé	Non validé	Sandeep Gupta et al., 2018
Argile noire, sciure de bois, chamotte	Eau de puits	99,50	100	Non validé	Non validé	Bleu Elodie, 2014
Argile, balles de riz	Eau de puits	73,12	72,28	Non validé	Non validé	Kleiman Shanti, 2011
Argile, balles de riz sans argent colloïdal	Eau de surface	99,50	100	Non validé	Non validé	Smith, 2004
Argile, balles de riz avec argent colloïdal	Eau de surface	100	100	Non validé	Non validé	Smith, 2004
Argile, sciure de bois sans argent colloïdal	Eau de puits	98,23	100	81,82	Non validé	Lantagne, 2001a
Argile, sciure de bois avec argent colloïdal	Eau de puits	100	100	100	Non validé	Lantagne, 2001b

Résultats des analyses physico-chimiques

Le tableau 5 ci-après montre les résultats d'analyses physico-chimiques des eaux filtrées issues de F1 et F2 comparés avec la norme Malagasy.

Tableau 5 : Résultats d'analyse des paramètres physico-chimiques

Paramètres	Unité	EF ₁	EF ₂	Eau brute	Norme Malagasy
Température	°C	20,4	20,6	20,6	20 à 25
Turbidité	NTU	4,1	1,8	3,6	<5
pH		7,3	7,11	6,86	6.5 à 9
Conductivité	μS/cm	186,1	170	171,9	<3000
Minéralisation	mg/l	173	158	159	-
Dureté totale	°F	3,9	3,9	3,9	<500
Dureté calcique	°F	2	2	2	-
Titre alcalimétrique	°F	0	0	0	-
TAC	°F	5,4	5,2	5	-
Calcium	mg/l	8	8	8	<200
Magnésium	mg/l	4,62	4,62	4,62	<50
Carbonates	mg/l	0	0	0	-
Bicarbonates	mg/l	65,88	63,44	61	-
Matières organiques	mg/l	3,2	0,9	2,1	<2
Ammonium	mg/l	0,26	0,15	0	<0,5
Fer total	mg/l	0	0	0	<0,5
Chlorures	mg/l	22,01	22,01	22,01	<250
Sulfates	mg/l	2,31	1,98	1,98	<250
Manganèse	mg/l	0	0	0	<0,5
Nitrites	mg/l	0,48	0,05	0	<0,1
Nitrates	mg/l	0	0,1	0,5	<50
Arsenic	mg/l	0	0	0	<0,05
Sodium	mg/l	17,57	16,67	15,85	<200

D'après ce tableau, l'on peut dire que l'eau filtrée issue de F2 est de bonne qualité par rapport à celle de F1.

L'étude complète des paramètres physiques et chimiques de l'eau filtrée fait la différence de la présente étude avec les études antérieures sur le filtre en céramique qui se sont arrêtées à l'étude d'efficacité des paramètres bactériologiques, du pH, de la turbidité et de la conductivité. Cette étude a permis de savoir que l'utilisation du filtre en céramique permet de dégrader les caractéristiques de l'eau filtrée comme la

turbidité, la quantité des matières organiques, les ions ammonium et surtout les nitrites qui sont des éléments dangereux pour la santé.

CONCLUSION

L'intérêt de la présente étude réside dans le fait que la production du filtre à eau en céramique utilisant l'argile noire, la pouzzolane et les balles de riz comme matières premières est possible et cela permet d'avoir une eau potable respectant les normes bactériologique et physico-chimique recommandées par l'Etat Malagasy. Les essais de fabrication ont montré que la granulométrie de la pouzzolane joue un rôle très important sur l'homogénéité de la pâte. La granulométrie recommandée ne doit pas dépasser les 600 μ m pour éviter la friabilité de la pâte. Pour avoir un filtre céramique de bonne qualité, la proportion de pouzzolane dans le mélange doit être inférieure ou égale à 10% et celle de la balle de riz inférieure ou égale à 5%. Le test d'efficacité du filtre a permis de savoir que l'argile rouge n'est pas adaptée à la fabrication du filtre à eau potable. Elle peut réduire les bactéries dans l'eau de puits mais la plupart des valeurs de paramètres physico-chimiques dépassent la norme recommandée. L'utilisation de l'argile noire comme matière première du filtre céramique permet d'obtenir un taux d'abattement de 99,89% en *coliformes totaux*, 100% en *E. colis*, 100% en *streptocoques* et 100% en *ASR* et toutes les valeurs des paramètres physico-chimiques respectent les normes recommandées par l'OMS. Le filtre qui a été conçu se distingue par l'utilisation de la pouzzolane parmi les matières premières. Pour un pays comme Madagascar, l'utilisation de ce filtre, pour le traitement de l'eau potable à domicile, peut être bénéfique. En plus, la pouzzolane, la balle de riz et l'argile sont très répandues à Madagascar. Toutefois, l'étude n'a pas pu déterminer l'efficacité de ce filtre avec les autres types d'eau utilisée comme source d'eau potable à Madagascar. Elle est limitée à la filtration de l'eau de puits. Une étude sur l'utilisation de ce filtre pour l'eau de surface pourra être l'objet d'une recherche future.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Baudu M. et *al.* (1993). Etude de l'adsorption de composés organiques dans l'eau sur un argile greffée et comparaison avec d'autres matériaux adsorbant. In Technologie de l'environnement, vol.14, 247-256, 10,1080 / 09593339309385286, École d'environnement TH Huxley.
- 2) Beddiar K. et *al.* (2002). Vérification expérimentale de la relation de réciprocité d'Onsager pour l'électro-osmose et l'électro-filtration dans une argile naturelle. In Comptes Rendus Mécanique, vol 330, 893-898, 10.1016/s1631-0721(02)01538-3, Elsevier Science.
- 3) Berland J. M. et *al.* (2002). Les procédés membranaires pour les traitements de l'eau. Document technique FNDAE, n°14, Décembre 2002, 71p.

- 4) Bleu E. B. (2014). Traitement de l'eau à domicile : conception et évaluation de l'efficacité des filtres en céramique. Mémoire de Master d'ingénierie de l'eau et de l'environnement. Institut International d'Ingénierie de l'Eau et de l'Environnement, Eau et Assainissement, Ouagadougou, Burkina Faso.
- 5) Brown J. M. (2010). Efficacité de filtration en céramique pour le traitement d'eau potable au Combodge, Janvier, 256p. <http://www.researchgate.net/publication/265198965>.
- 6) Center for Affordable Water and Sanitation Technology (2009). Household water treatment and safe storage factsheet: ceramic pot filter. Mars, 31p. <http://www.cawst.org>.
- 7) Gupta S. (2018). Production des filtres à eau en céramique à domicile au Ràjasthàn occidental, Inde. In International Journal for Service Learning in Engineering, Humanitarian Engineering and Social Entrepreneurship. Vol.13, N°1, p. 53-66, ISSN 1555-9033.
- 8) Hagan J. M. et al. (2013). Resource Development International – Cambodia, Ceramic Water Filter. Handbook, version 1.3. Phnom Penh, Cambodia.
- 9) Kleiman S. L. (2011). Ceramic filter manufacturing in Northern Ghana : water storage and quality control. Degrees of master in City Planning and Master of engineering in Civil and environmental Engineering at the Massachusetts Institute of Technology.
- 10) Lantagne D. (2001). Investigation of the Potters for Peace Colloidal Silver Impregnated Ceramic Filter. Report 2 : Field Investigations. Alethia Environmental, Allston, Massachusetts.
- 11) Parsons S. A. et al. (2006). Introduction aux procédés de traitement de l'eau potable. 10.1002 / 9781444305470.ch6
- 12) Rajaonary L. (2018). Le suivi de la qualité de l'eau à Madagascar. Ran'eau Malagasy, Programme Solidarité-Eau, Décembre, 62p. <http://www.raneau.org>.
- 13) Rakotondramiary S. (2015). Conception d'un charbon actif à partir de la balle de riz : essai d'adsorption du plomb. Mémoire de fin d'études Master en Chimie Minérale et Chimie Physique. Université d'Antananarivo, Faculté des Sciences.
- 14) Razafindratsimba R.L.P. (2019). Contribution à la valorisation de la balle de riz en traitement des eaux. Mémoire de fin d'études Master, titre Ingénieur, en Génie des Procédés Chimiques et Industriels. Université d'Antananarivo, Institut d'Enseignement Supérieur d'Antsirabe-Vakinankaratra.

- 15) Soppe A. I. A. et *al.* (2015). Critical parameters in the production of ceramic pot filters for household water treatment in developing countries. In *Journal Water Health*, Vol.13, N°2, Décembre, p. 587-599. DOI : 10.2166/wh.2014.090.
- 16) Takahisa H. et *al.* (2016). Étude des matières en suspension dans l'eau naturelle. In *Bulletin de la société chimique du Japon*, vol. 23, 216-219, 10.1246/bcsj.23.216, Société chimique du Japon.