

RECHERCHES POUR LE DEVELOPPEMENT

Série Sciences Technologiques

N°7-2021

Antananarivo - Madagascar

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

ISSN 1022 - 8691



**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT
Série
Sciences Technologiques
N°7 – 2e semestre
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 : edition.cidst@gmail.com
Antananarivo - Madagascar
ISSN 1025-3475**

RECHERCHES POUR LE DEVELOPPEMENT

Série Sciences Technologiques

N°7

2021

NOS PRINCIPALES REALISATIONS

Fonds Documentaire consultable gratuitement sur place

24261 Ouvrages
1584 Titres de périodique

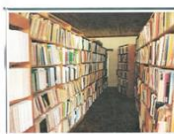
Production documentaire : Fiches techniques 66 thèmes sur l'agriculture et l'élevage

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

Base de données bibliographiques : MIREMBY 41537 Références multidisciplinaires

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

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



MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique



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

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

SOMMAIRE

Réactualiser une recherche ancienne sur le stockage électrochimique à longue durée de vie

RAMINOSOA Andrianary Lala, RANARISON Tsiriry,
RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina

7

Impacts de l'utilisation des briquettes SOCTAM à base de déchets agro-industriels

RANDIMBIARIVELO Ronald Harison, RASOANANDRASANA Emilienne,
RAVONINJATOVO Achille Olivier

21

Suivi de l'évolution des pseudo-ilots du marais maritime de Bombetoka par télédétection

ANDRIAMANANTENA Fenoza H., ANDRIAMANANTENA Ainazo H.,
ILTIS Jacques, DELAÎTRE Eric, ANDRIAMANANTENA Zolalaina,
ANDRIAHARIMALALA Tahiana, RANARIJAONA Hery Lisy Tiana

31

Caractéristiques nutritionnelles des sous-produits de crevettes dans une de Mahajanga

TSIALY Jean Louis, RANDRIAMAHATODY Zo,
RASOLOMAMPIANINA Rado, RAZAFIMAHEFA

43

Étude numérique de la convection naturelle dans une cavité à paroi ondulée

DJAOMAZAVA Gwendoli, RANDRIAZANAMPARANY Michel Aimé,
FANAMBINANTSOA Hasimamy Vanissa

51

Comparaison des méthodes numériques des équations de Saint Venant : application sur un tronçon du fleuve Sambirano

RANDRIAMPARANY Mamisoa, RATSARAMODY Justin,
RANDRIAZANAMPARANY Michel Aimé

69

Hydrodynamique des écoulements turbulents biphasiques appliquée dans la conception des décanteurs lamellaires

ANDRIANTOVOHASINA Tsifoimbola

83

Comportement chaotique et stabilité d'un système SMIB

TSARALAHY Zazad, RAZAFINDRAKOTO Eliasy,
RAFANOTSIMIVA Liva, SAMBATRA Eric

97

Insertion d'un facts série pour l'amélioration de la stabilité d'un réseau électrique

VELOTSANGANA Ndalana Davida, RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa,
RAZAFIMAHENINA Jean Marie

109

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



REACTUALISER UNE RECHERCHE ANCIENNE SUR LE STOCKAGE ELECTROCHIMIQUE A LONGUE DUREE DE VIE

par

RAMINOSOA Andrianary Lala⁽¹⁾, RANARISON Tsiriry⁽¹⁾,
RAKOTOMALALA Minoson Sendrahasina⁽¹⁾

(1) Institut pour la Maîtrise de l'Energie (IME), Université d'Antananarivo, Madagascar

RESUME

Cette étude a été conçue suite au progrès d'utilisation de l'énergie solaire. Madagascar fait partie des pays qui bénéficient énormément de cette énergie. De ce fait, nombreux sont les malgaches qui, hors des zones électrifiées, utilisent des cellules photovoltaïques pour des applications domestique et professionnelle. Mais les batteries utilisées ne durent que 5 ans voire 10 ans maximum d'où l'idée de réactualiser les recherches de Thomas Edison en 1901, une technologie de batterie nickel-fer qui se distingue par sa longue durée de vie de plus de 25 ans. Il s'agit donc de déterminer les réactions chimiques mises en jeu dans la batterie, son processus de vieillissement, ses caractéristiques, ses avantages et ses inconvénients par rapport à la technologie plomb-acide. Une fois que les études théoriques seront effectuées, l'étude se propose une application de la technologie Ni-Fe dans une installation photovoltaïque à Madagascar.

Mots-clés : Batterie nickel-fer, Batterie plomb-acide, Cellules photovoltaïques, Longue durée de vie, Stockage électrochimique

ABSTRACT

This survey was designed following the progress of the use of solar energy. Madagascar is one of the countries that benefit enormously from this energy. As a result, many Malagasy people use photovoltaic cells for domestic and professional applications especially those who are outside the electrified areas. However, the used batteries last only 5 years or even 10 years at most, hence the idea of updating Thomas Edison's research in 1901, a nickel-iron battery technology which is distinguished by its long lifespan of more than 25 years. It is therefore a question of determining the chemical reactions involved in the battery, its aging process, its characteristics, its advantages and disadvantages compared to the lead-acid

technology. Once the theoretical studies are carried out, the study proposes an application of Ni-Fe technology in a photovoltaic installation in Madagascar.

Key-words : Nickel-iron battery, Lead-acid battery, Photovoltaic cells, Long lifespan, Electrochemical storage,

INTRODUCTION

L'énergie solaire photovoltaïque (PV) est considérée comme étant la plus flexible des sources d'énergie renouvelables du fait de son utilisation dans presque toutes les classes de puissance allant de mW à GW et dans la plupart des endroits dans le monde. Cependant, un système PV requiert une unité de stockage de l'énergie produite lors de la/des journées ensoleillées pour continuer de la distribuer la nuit ou les journées où la couverture nuageuse est trop importante pour permettre un fonctionnement des cellules PV. Les batteries assurent non seulement le temps de réponse et la capacité de stockage appropriés pour répondre aux besoins de production et du réseau, mais doivent également montrer une longue vie et être capables de supporter un grand nombre de cycles de charge-décharge : ce sont souvent les composants les plus chères et les plus fragiles d'un système solaire. (Alotto. et *al.*, 2014; Moseley & Garche, 2014).

MATERIELS

Cet article va traiter la technologie du stockage d'énergie ayant une longue durée de vie et dont l'existence est peu connue : il s'agit de la technologie nickel-fer. La batterie nickel-fer (Ni-Fe) est une source de puissance électrochimique rechargeable qui a été créée en Suède par Waldemar Jungner vers 1890. En substituant le cadmium par du fer, il a amélioré la performance et l'efficacité des cellules, mais il a abandonné son développement en faveur du nickel-cadmium. Alors que Thomas Edison croyait que la batterie Ni-Fe pourrait remplacer la batterie plomb-acide (Pb-acide), il a obtenu son brevet en 1901. (DeMar, 2011 ; Gaffor & Haripraksh, 2010).

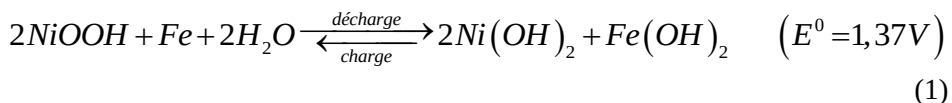
L'usine de batteries Thomas Edison située à West Orange dans le New Jersey, aux Etats-Unis, a fabriqué des cellules de 1903 à 1972, année de sa vente à Exide Battery Company (son nom à l'époque) dont la production s'est poursuivie jusqu'en 1975, année de la fermeture de l'usine (DeMar, 2011). La batterie Ni-Fe a perdu sa part de marché face à la batterie Pb-acide (Reddy, 2011). Malgré cela, outre l'Allemagne, des sociétés telles que l'accumulateur Koursk en Russie et la batterie ChangHong en Chine fabriquaient encore des cellules Ni-Fe (DeMar, 2011; Vincent et Scrosati, 1997).

Les batteries Ni-Fe ont été appliquées à presque tous les domaines dans lesquels elles sont utilisées. Une liste des utilisations (Anderson, 1952; Chakkaravarthy *et al.*, 1991; Vincent & Scrosati, 1997) auxquelles elles sont appliquées comprend les camions, les chariots élévateurs et les tracteurs industriels électriques, les locomotives minières et industrielles, les véhicules routiers électriques, l'éclairage et la climatisation dans les trains, les systèmes de signalisation ferroviaires, les services maritimes, usines isolées d'éclairage, horloges, le système dans les circuits d'éclairage et d'alarme d'urgence, lampes à culot des mineurs, alimentation électrique pour instruments et laboratoires, les équipements de communication et les unités d'éclairage portatives. Enfin, la batterie Ni-Fe convient au stockage d'énergie électrique dérivée de l'énergie solaire via des cellules photovoltaïques (Chakkaravarthy *et al.*, 1991).

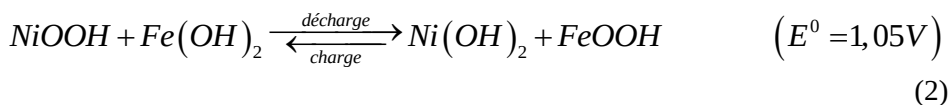
METHODES

En ce qui concerne les matières actives qui la constituent, la batterie Ni-Fe est composée d'oxyhydroxyde de nickel comme électrode positive, du fer comme électrode négative et une solution d'hydroxyde de potassium, additionnée d'un peu d'hydroxyde de lithium afin d'exercer un effet stabilisateur sur la capacité de l'électrode positive durant le cycle de charge-décharge, comme électrolyte (Dell & Rand, 2001; Helwig & Ahfcock, 2013). Ces matériaux sont, à l'origine, enfermés dans des poches rectangulaires en tôle d'acier mince perforée qui sont fixées à des cadres également en acier pour former les électrodes positive et négative (Anderson, 1952). Les réactions globales qui se produisent au niveau des électrodes s'ensuivent d'un transfert d'oxygène d'une électrode à une autre. D'une manière générale, la batterie Ni-Fe est représentée par : $^{(-)}Fe(s)|KOH(aq)|NiOOH(s)^{(+)}$. (Vincent & Scrosati, 1997).

Le fonctionnement de cette batterie (Dell & Rand, 2001 ; Gaffor & Hariprakash, 2010 ; Garche *et al.*, 2013), illustré par la **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**, est régi par la réaction chimique :



A ce stade, les réactions des cellules sont fortement réversibles. La réaction (1) se poursuit sous une décharge profonde. Une cellule Ni-Fe subira encore une autre réaction de décharge (2), mais avec une tension inférieure comparée à celle de la première étape : (Gaffor et Hariprakash, 2010 ; Garche *et al.*, 2013).



Contrairement à la technologie plomb-acide, l'électrolyte ne participe pas aux réactions chimiques. Il n'est donc pas possible de déterminer son état de charge pour une quelconque mesure de la densité de l'électrolyte. (Reddy T. B., 2011).

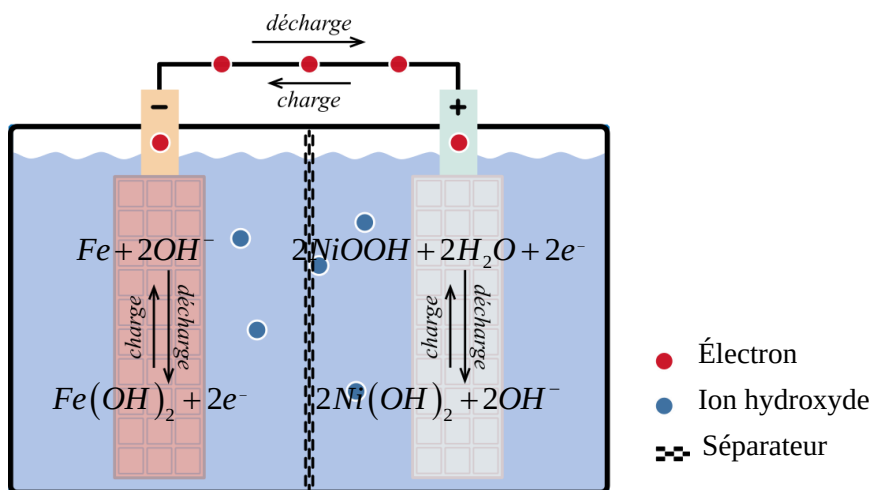


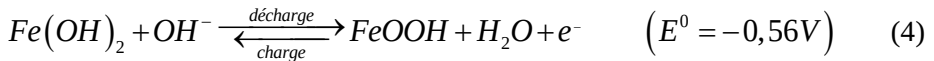
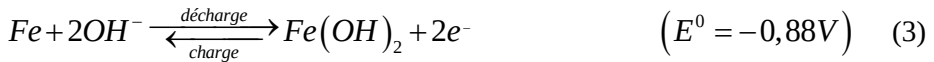
Figure 1 : Représentation schématique du principe de fonctionnement d'une cellule Ni-Fe

RESULTATS

Electrode négative

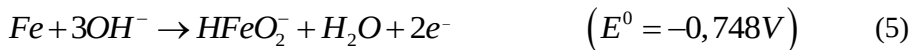
Le fer est un élément connu depuis les temps préhistoriques. Contrairement à d'autres matériaux d'électrode de batterie tels que le cadmium, le plomb, le nickel et le zinc, les électrodes en fer sont plutôt respectueuses de l'environnement. En outre, les électrodes en fer sont à la fois robustes mécaniquement et électriquement (Garche *et al.*, 2013). Le fer possède une capacité théorique élevée de l'ordre de $0,97 \text{ Ah.g}^{-1}$. Selon la conception et la fabrication des électrodes, il existe trois types différents d'électrodes en fer (Chakkaravarthy *et al.*, 1991) à savoir les électrodes de poche ou tubulaires, les électrodes pressées ou compactées et les électrodes frittées.

Les réactions de charge-décharge à l'électrode négative d'une batterie Ni-Fe se produisent en deux étapes correspondant à deux niveaux de tension distincts : (Chakkaravarthy *et al.*, 1991; Demidov *et al.*, 2006 ; Garche *et al.*, 2013 ; Shukla *et al.*, 2001).



Dans des conditions alcalines fortes, le processus principal traduit par l'équation (3) manifeste la réduction des ions ferreux (Fe^{2+}) en fer métallique (FeO) lors de la charge et inversement lors de la décharge. Dans le cas où la batterie Ni-Fe est conçue avec du fer en excès, la réaction (4) se présente rarement dans la batterie. (Chakkaravarthy et *al.*, 1991 ; Posada et *al.*, 2016).

L'équation (3), dans sa forme générale, reflète les états initial et final de la matière active (Demidov A. ; Kokhatskaya M., et Chernovets B., 2006). Le mécanisme global de la réaction (3) de l'électrode implique à la fois des phases solide (*mécanisme homogène*) et liquide (*mécanisme hétérogène*) avec des ions $HFeO_2^-$ comme intermédiaires dissous qui se transforment en hydroxyde de fer ($Fe(OH)_2$) lors d'une nouvelle décharge (Garche J. et *al.*, 2013 ; Shukla A. ; Venugopalan S., et Hariprakash B., 2001) : le fer est donc oxydé en ions $HFeO_2^-$, puis en $Fe(OH)_2$ poreux (Demidov A. ; Kokhatskaya M., et Chernovets B., 2006). En conséquence, le cours réel (Demidov A. ; Kokhatskaya M., et Chernovets B., 2006 ; Garche J. et *al.*, 2013 ; Shukla A. ; Venugopalan S., et Hariprakash B., 2001) de la réaction (3) des électrodes peut être exprimé comme suit :

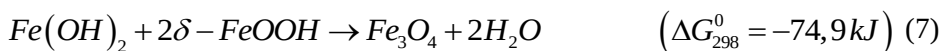


suivi par :



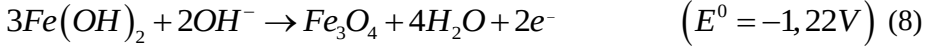
Lors d'une décharge prolongée, la composition du δ - $FeOOH$ actif en hydroxyde de fer s'apparente à l'électrode positive en nickel. La réaction des électrodes implique la diffusion de protons entre les réseaux solides de $Fe(OH)_2$ et δ - $FeOOH$. (Garche J. et *al.*, 2013).

Il a été supposé que la formation de magnétite Fe_3O_4 dans différents états d'oxydation entre les hydroxydes de fer se traduit par la réaction :

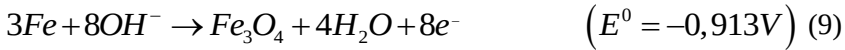


plutôt que par un processus électrochimique (Garche J. et *al.*, 2013).

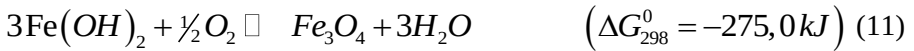
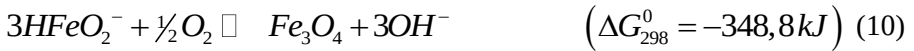
Une analyse de phase par rayon-X des électrodes retirées des solutions après décharge a démontré une diminution de la quantité d'hydroxyde de fer(II) formée dans les électrodes lors du premier processus anodique et une augmentation de la magnétite. De ce fait, la conversion de $Fe(OH)_2$ en Fe_3O_4 est décrite par l'équation de la réaction : (Garche et *al.*, 2013)



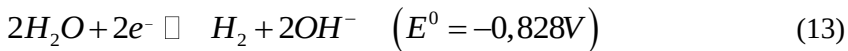
Par ailleurs, dans le cas de la polarisation anodique d'une électrode en fer dans la plage du premier plateau de potentiel à 328 K, une quantité considérable de magnétite est formée avec le produit de décharge principal $Fe(OH)_2$. Une conversion électrochimique directe de Fe en Fe_3O_4 a été estimée : (Garche et *al.*, 2013)



La magnétite peut être également formée par les réactions suivantes qui impliquent de l'oxygène dissous dans l'électrolyte : (Demidov et *al.*, 2006)



Etant donné que la réaction (8) a lieu dans l'électrolyte, il se traduit par la formation d'un dépôt noir de magnétite à la surface des séparateurs et des réservoirs de la batterie. L'équation (12) montre la réaction du fer avec l'eau et celle du dégagement d'hydrogène qui se produit pendant la charge : (Garche et *al.*, 2013 ; Manohar et *al.*, 2012)

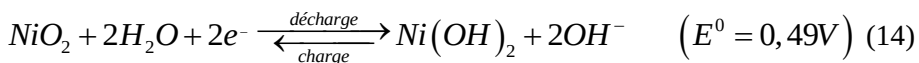


D'un côté, la réaction de dégagement d'hydrogène a lieu puisque le potentiel d'électrode pour cette réaction est positif par rapport à celui de la réaction (3) et de l'autre côté, l'eau est décomposée électrochimiquement en ions hydrogène et hydroxyle lors de la charge (Manohar et *al.*, 2012 ; Posada et *al.*, 2016).

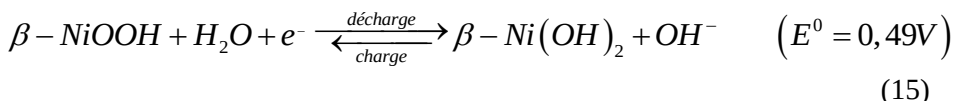
Electrode positive

Utilisés pendant plus d'un siècle, les hydroxydes de nickel ($Ni(OH)_2$) composent le matériau actif des électrodes positives de plusieurs cellules alcalines.

La compréhension des réactions au niveau de ces électrodes a été très lente en raison de la nature complexe des réactions. (Besenhard J. O., 2008) Sa capacité théorique maximum est de l'ordre de 0,289 Ah.g⁻¹ (Hedlund M., 2016). En termes de batterie, l'électrode en nickel se reporte souvent à l'oxyde de nickel (NiO₂) et les réactions de charge-décharge sont exprimées de la sorte : (Garche et *al.*, 2013 ; Shukla et *al.*, 2001)

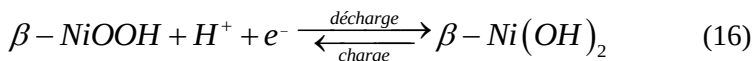


L'oxyde de nickel forme la matière active de la plaque positive avec de l'hydroxyde de nickel comme produit déchargé qui est récupéré sous forme d'oxyde de nickel pendant la recharge. En pratique, le produit de décharge, converti en oxyhydroxyde de bêta nickel (β -NiOOH) pendant la recharge, est le β -Ni(OH)₂. L'équation (14) devient : (Garche et *al.*, 2013 ; Hedlund, 2016 ; Sataev et *al.*, 2017 ; Shukla et *al.*, 2001)



Lors de la charge, le β -Ni(OH)₂ est donc converti en β -NiOOH par un mécanisme de déprotonation et la réaction est inversée lors de la décharge réduisant l'oxyhydroxyde de nickel 3+ en hydroxyde de nickel 2+ par protonation (Hedlund M., 2016). Le mécanisme de réaction (15) implique une diffusion équivalente de protons à travers les réseaux à l'état solide de β -Ni(OH)₂ et β -NiOOH de telle sorte qu'il y a un changement continu dans la composition du matériau actif entre le β -NiOOH entièrement chargé et le β -Ni(OH)₂ complètement déchargé.

Ainsi, l'équation (15) peut également s'écrire : (Garche et *al.*, 2013; Shukla et *al.*, 2001)



Trois modifications cristallines de l'hydroxyde de nickel apparaissent sous la forme d'une structure en treillis avec des couches alternées d'ions nickel et d'ions hydroxyde. Le matériau de départ pour la transformation de l'électrode alcaline est la forme α . (Garche et *al.*, 2013) La **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** donne un aperçu sur les changements de structure des hydroxydes de nickel lors de la charge, de la décharge, de la surcharge et du vieillissement (déshydratation) (Besenhard, 2008 ; Garche et *al.*, 2013 ; Shukla et *al.*, 2001).

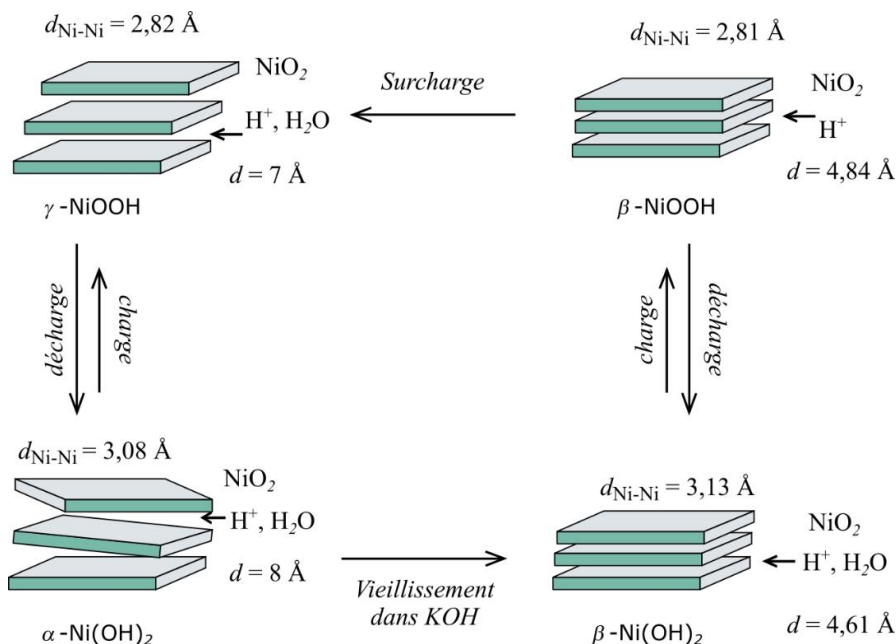


Figure 2 : Schéma de réaction de Bode montrant les diverses transformations d'une électrode en nickel

La tension d'oxydation (charge) des matériaux α et β , respectivement de 60 mV et 100 mV, est plus positive que la tension de décharge. Le $\beta\text{-Ni(OH)}_2$ est le matériau d'électrode habituel. Oxydé, il est converti en charge en $\beta\text{-NiOOH}$ avec à peu près le même volume molaire. En cas de surcharge, la structure γ peut se former. Cette forme incorpore également de l'eau et du potassium (et du lithium) à la structure. Son volume molaire est d'environ 1,5 fois la forme bêta. Cette forme est considérée en grande partie responsable de la dilatation du volume (gonflement) qui se produit pendant la charge de la batterie. La forme α résulte alors de la décharge de la forme γ . Son volume molaire est environ 1,8 fois que celui de la forme β et l'électrode se gonfle davantage lors de la décharge. A la décharge, la forme α se convertit en forme β dans un électrolyte concentré. L'ajout de cobalt (2 à 5%) améliore l'acceptation de charge (réversibilité) de l'électrode en nickel. (Besenhard, 2008 ; Reddy, 2011 ; Shukla et al., 2001).

Caractéristiques de performance

La densité énergétique théorique d'une batterie Ni-Fe, se situant entre le Ni-Cd (244 Wh.kg^{-1}) et le Ni-MH (278 Wh.kg^{-1}) est de 268 Wh.kg^{-1} . La densité énergétique pratique dépend de la technologie employée pour la fabrication des électrodes. Elle est entre 20 Wh.kg^{-1} et 30 Wh.kg^{-1} pour les électrodes tubulaires et peut atteindre $40\text{--}60 \text{ Wh.kg}^{-1}$, voire même jusqu'à 80 Wh.kg^{-1} (Periasamy P. et al., 1996), pour les

électrodes frittées ou en fibres. La tension en circuit ouvert, la tension de décharge et la tension de charge des cellules Ni-Fe sont respectivement de 1,37 V ; 1,3 V à 1,0 V et 1,7 V à 1,8 V. Sa tension nominale est de 1,2 V. (Chakkaravarthy et *al.*, 1991 ; Glaize & Genies, 2012 ; Reddy, 2011)

La charge à tension constante des cellules Ni-Fe conventionnelles, pouvant entraîner un emballement thermique et causer des dommages graves, est à déconseiller. Lorsque la cellule approche de sa pleine charge, les réactions de gazage produisent de la chaleur et la température de la cellule augmente : une charge galvanostatique limitée à 1,7 V par cellule s'est avérée bénéfique pour contrôler la température des cellules. Sa capacité de décharge dépend du débit de décharge. En effet, lorsqu'un système nickel-fer est déchargé à un taux de C/1, la capacité réalisée n'est que de 50% de la valeur nominale et la tension varie entre 1 V et 0,8 V. Les batteries avec des électrodes positives tubulaires sont conçues pour des taux de décharge faibles ou modérés c'est-à-dire C/8 à C/1 tandis que celles avec des électrodes frittées peuvent fournir une puissance élevée du fait de sa faible résistance interne. La variation de la valeur nominale (de fonctionnement ou de décharge) de la tension des cellules est d'environ 1,23 V au taux C/8 à 0,85 V au taux C/1. Le changement de la tension de la cellule sur un régime de C/8 est de 1,32 V à environ 1,15 V respectivement à 10% et 90% de profondeur de décharge (DoD). Sur un régime de C/10, la tension de la batterie à l'état chargé de 50% est de 1,35 V et pour des faibles courants de décharge (C/100), la tension varie de 1,5 V (état chargé) à 1,35 V (état déchargé). (Chakkaravarthy et *al.*, 1991 ; Garcke et *al.*, 2013 ; Glaize & Genies, 2012)

Sa capacité de décharge dépend également de la température environnante. Lorsque la température baisse, la puissance de sortie diminue considérablement. La capacité dérivée à 255 K est d'environ 50% de la valeur nominale lorsque la décharge est effectuée à un taux C/8, les performances sont raisonnablement bonnes à ~308 K. Le comportement à des températures inférieures à zéro est dû à la passivation de l'électrode en fer. L'autodécharge représente de 0,1 à 2,5% de la capacité nominale par jour en dessous de 293 K, de 1 à 2% à ~298 K et de 8 à 10% à ~313 K. L'autodécharge d'une batterie Ni-Fe se manifeste davantage que pour les batteries de Ni-Cd et Ni-MH. Elle augmente de façon significative avec la température. En guise d'exemple, l'autodécharge est minime (environ 10% en 1 mois) à 273 K, mais à +313 K, une cellule se déchargera presque totalement en 15 jours. Les batteries Ni-Fe peuvent être stockées pendant de longues périodes sans aucune détérioration qu'elles soient dans un état chargé ou déchargé. La durée de vie est de 7 à plus de 25 ans. Les batteries exigeant une puissance élevée utilisent des électrodes frittées. (Chakkaravarthy et *al.*, 1991 ; Glaize & Genies, 2012).

Tableau 1 : Comparaison des caractéristiques des batteries nickel-fer et plomb-acide. (Barak, 1980 ; Crompton, 2000 ; Dethan, 2016 ; Periasamy et *al.*, 2016 ; Vincent & Scrosati, 1997)

Caractéristiques principales	Nickel-fer	Plomb-acide
Tension nominale (V)	1,2	2
Densité d'énergie théorique (Wh.kg ⁻¹)	268	170 – 252
Energie massique (Wh.kg ⁻¹)	20 – 80	10 – 20
Energie volumique (Wh.L ⁻¹)	60 – 110	50 – 70
Cycle de vie (100% DoD)	> 1000	20 – 50
Durée de vie calendaire (ans)	> 25	~5 – 10
Température de fonctionnement (°C)	-10/+45	-10/+40

DISCUSSIONS

La batterie nickel-fer était et est presque indestructible. Elle a une structure physique très robuste pouvant résister à des chocs mécaniques et électriques tels que les vibrations, les surcharges et les décharges excessives pendant de longues périodes. Le stockage dans des conditions chargées ou déchargées n'affectera pas les performances. Un long service est donc envisageable grâce à sa longue durée de vie. L'entretien de la batterie est assez simple. Il suffit de compléter l'électrolyte par addition d'eau ou de bien le remplacer après une période considérable de fonctionnement. (Chakkaravarthy et *al.*, 1991 ; Glaize & Genies, 2012 ; Reddy, 2011)

Les matériaux actifs de la batterie sont insolubles dans les alcalis. En outre, le séparateur ne présente pas de difficultés particulières contrairement aux batteries argent-zinc (Ag-Zn) et nickel-zinc (Ni-Zn). La batterie Ni-Fe ne présente également pas d'effet toxique ou corrosif ni pour l'environnement ni pour le personnel travaillant. L'électrolyte alcalin permet l'utilisation d'acier doux dans la construction de la batterie. La batterie fonctionne très bien à une température ambiante d'environ 308 K. (Chakkaravarthy et *al.*, 1991 ; Glaize & Genies, 2012 ; Reddys, 2011)

Connue pour sa longue durée de vie, la batterie Ni-Fe possède une énergie spécifique 1,5 à 2 fois supérieure à celle d'une batterie Pb-acide (Abdalla et *al.*, 2016; Dell, 2000). Elle est également constatée pour sa rugosité et son long cycle de vie sous une décharge profonde (Dell & Rand, 2001 ; Helwig & Ahfock, 2013).

C'est une technologie prometteuse en matière de sécurité puisqu'elle ne présente ni d'éléments toxiques ni de métaux lourds : elle a le plus faible impact environnemental et facteur de risque pendant le fonctionnement (Chakkaravarthy et *al.*, 1991 ; Helwig & Ahfock, 2013 ; Manohar et *al.*, 2012).

L'efficacité énergétique de la batterie est d'environ 50%. L'autodécharge est, cependant, assez élevée : 30 à 50% de sa capacité est perdue sur une période d'un mois. (Vincent & Scrosati, 1997) Les principales causes de ces deux aspects sont la faible surtension d'hydrogène de l'électrode en fer et la proximité immédiate du potentiel de l'électrode en fer (en milieu alcalin) et celui de la réaction de dégagement d'hydrogène. En conséquence, l'hydrogène se dégage pendant la charge-décharge et sur le support. De plus, la batterie présente de mauvaises performances à des températures inférieures à zéro en raison de la passivation de l'électrode en fer. (Abdalla et *al.*, 2016; Chakkaravarthy et *al.*, 1991 ; Glaize & Genies, 2012 ; Reddy, 2011)

La capacité de décharge d'une batterie Ni-Fe dépend du taux de décharge et de la température de fonctionnement : ce qui limite le fonctionnement de la batterie pour une décharge élevée à basse température (Dethan, 2016 ; Shukla et *al.*, 2001). En la comparant à la technologie plomb-acide, la technologie nickel-fer présente une faible performance à basse température, des taux de corrosion et d'autodécharge élevés ainsi qu'un rendement énergétique d'ensemble faible en raison d'une faible surtension de l'évolution d'hydrogène au niveau de l'électrode en fer. En outre, une nécessité d'entretien fréquent dû au gazage considérable, qui est non souhaitable (Manohar et *al.*, 2012), lors de la charge est cependant requise. (Dell & Rand, 2001; Dell, 2000; Reddy , 2011)

Tableau 2 : Récapitulatif de comparaison des technologies plomb-acide et nickel-fer. (Dell, 2000 ; Manohar et *al.*, 2012 ; Reddy, 2011 ; Zhang et *al.*, 2017)

Technologie de batterie	Avantages	Inconvénients
Plomb-acide	• Faible coût de fabrication • Tension d'une cellule élevée • Disponible en mode sans entretien • Inexistence d'effet mémoire	• Courte durée de vie • Faible densité d'énergie • Présence de métaux lourds • Faible cycle de vie • Dégagement de gaz

Nickel-fer

- Longue durée de vie (cyclique et calendaire)
 - Résistant aux abus mécaniques (robuste)
 - Résistant aux abus électriques (surcharge, décharge excessive, court-circuitage)
 - Non toxique, non corrosive
 - Ne présentant pas de métaux lourds
 - Inexistence d'effet mémoire
 - Tension d'une cellule faible
 - Importante autodécharge
 - Dégagement de gaz
 - Faible performance à basse température
-

CONCLUSION

Cette revue accentue la technologie de batterie nickel-fer pour une application stationnaire. Il a été observé que l'autodécharge considérable, due à une faible surtension d'hydrogène, est une limitation majeure des électrodes en fer. Une perte de capacité d'environ 5% en 4 h qui s'étend à 20% en 14 jours pour des électrodes en fer complètement chargées a été rapportée. L'électrode positive faite d'hydroxyde de nickel a également fait l'objet de nombreuses recherches afin d'étudier comment différents additifs peuvent modifier ses propriétés ou empêcher différentes phases de se produire. Ainsi, le contrôle de la composition de l'électrolyte et l'utilisation d'une combinaison d'additifs au niveau des électrodes apportent une bonne performance à la batterie. Il est à noter que la performance d'une cellule nickel-fer résulte aussi de la façon dont les électrodes sont fabriquées. Enfin, ses années d'existence nous ont permis d'en déduire sa longévité et même en cas de négligence et d'abus dans des conditions de fonctionnement sévères, une longue vie du service est envisageable.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Abdalla, A. H. ; Oseghale, C. I. ; Posada, J. O. G. et Hall, P. J. (2016). Rechargeable nickel-iron batteries for large-scale energy storage. *IET Renewable Power Generation* 10 (10) : 1529-1534.
- 2) Alotto, P. ; Guarnieri, M. et Moro, F. (2014). Redox flow batteries for the storage of renewable energy: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 29 : 325-335.
- 3) Anderson, F. C. (1952). Fiftieth Anniversary: Anniversary Issue on Storage Batteries: The Edison Nickel-Iron-Alkaline Cell. *Journal of the Electrochemical Society* 99 (9) : 244C.

- 4) Barak, M. (1980). *Electrochemical power sources: primary and secondary batteries*. London : IET.
- 5) Besenhard, J. O. (2008). *Handbook of battery materials*. Weinheim: John Wiley & Sons.
- 6) Chakkaravarthy, C. ; Periasamy, P. ; Jegannathan, S. et Vasu, K. (1991). The nickel/iron battery. *Journal of power sources* 35 (1) : 21-35.
- 7) Crompton, T. P. (2000). *Battery reference book*. Oxford: Newnes.
- 8) Dell, R. et Rand, D. A. J. (2001). *Understanding batteries*. Cambridge: Royal society of chemistry.
- 9) Dell, R. M. (2000). Batteries: fifty years of materials development. *Solid State Ionics* 134 (1-2) : 139-158.
- 10) DeMar, P. J. (2011). Nickel-Iron. In, *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. IEEE, Amsterdam, p. 1-5.
- 11) Demidov, A. ; Kokhatskaya, M. et Chernovets, B. (2006). Thermodynamics of discharge of the negative electrode of a nickel-iron battery. *Russian journal of applied chemistry* 79 (4) : 677-679.
- 12) Dethan, J. F. N. (2016). Mathematical modelling of the nickel iron battery. Master of Engineering Sciences (Power Engineering) Dissertation, University of Southern Queensland.
- 13) Gaffor, S. et Hariprakash, B. (2010). Nickel-iron battery-based electrochemical energy storage systems for rural/remote area telecommunication. In, *IEEE International Telecommunications Energy Conference (INTELEC)*. IEEE, Orlando, p. 1-6.
- 14) Garche, J. ; Dyer, C. K. ; Moseley, P. T. ; Ogumi, Z. ; Rand, D. A. et Scrosati, B. (2013). *Encyclopedia of electrochemical power sources*. Oxford: Newnes.
- 15) Glaize, C. et Genies, S. (2012). *Lead-nickel electrochemical batteries*. London : ISTE Ltd.
- 16) Hedlund, M. (2016). Electrochemical capacity of Ni mass when subjected to various conditions, and the relation to changes in the nickel hydroxide phase and crystallite size. Master, Lund University.
- 17) Helwig, A. et Ahfock, T. (2013). Long-life nickel iron battery functionality/cost comparison for peak demand SWER network voltage support application. In, *Australasian Universities Power Engineering Conference (AUPEC)*. IEEE, Hobart, p. 1-6.
- 18) Manohar, A. K. ; Malkhandi, S. ; Yang, B. ; Yang, C. ; Prakash, G. S. et Narayanan, S. (2012). A high-performance rechargeable iron electrode for large-

- scale battery-based energy storage. *Journal of the Electrochemical Society* 159 (8): A1209.
- 19) Moseley, P. T. et Garche, J. (2014). *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. New York: Elsevier.
 - 20) Periasamy, P. ; Babu, B. R. et Iyer, S. V. (1996). Performance characterization of sintered iron electrodes in nickel/iron alkaline batteries. *Journal of power sources* 62 (1) : 9-14.
 - 21) Posada, J. O. G. ; Abdalla, A. H. ; Oseghale, C. I. et Hall, P. J. (2016). Multiple regression analysis in the development of NiFe cells as energy storage solutions for intermittent power sources such as wind or solar. in *International Journal of Hydrogen Energy Vol.* Elsevier. p. 1-8.
 - 22) Reddy, T. B. (2011). *Linden's handbook of batteries*, vol. 4. New York : McGraw-Hill.
 - 23) Sataev, M. S. ; Koshkarbaeva, S. T. ; Kenzhibayeva, G. S. ; Suigenbayeva, A. Z.; Yakubova, R. R. et Tleuova, A. B. (2017). Obtaining of Metallized Porous Substrates for the Tubular-Type Plates of Alkaline Accumulators. *Oriental Journal Of Chemistry* 33 (3) : 1331-1336.
 - 24) Shukla, A. ; Venugopalan, S. et Hariprakash, B. (2001). Nickel-based rechargeable batteries. *Journal of power sources* 100 (1-2) : 125-148.
 - 25) Vincent, C. et Scrosati, B. (1997). *Modern batteries*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
 - 26) Zhang, H. ; Li, X. et Zhang, J. (2017). *Redox Flow Batteries: Fundamentals and Applications*. Boca Raton: CRC Press.

IMPACTS DE L'UTILISATION DES BRIQUETTES SOCTAM A BASE DE DECHETS AGRO-INDUSTRIELS

par

RANDIMBIARIVELO Ronald Harison⁽¹⁾, RASOANANDRASANA Emilienne⁽¹⁾,
RAVONINJATOVO Achille Olivier ⁽²⁾

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

(2) Centre National de Recherches Industrielle et Technologique (CNRIT), Antananarivo, Madagascar

RESUME

Le présent travail est le résultat d'études sur terrain au sein de la SOCTAM à Mampikony. Des tas de déchets de culture sont stockés, non valorisés au sein de cette société à chaque fin de campagne et aucune solution n'y a été envisagée pour les gérer antérieurement. Ce travail de recherches a pour objectif de contribuer à la valorisation énergétique de ces déchets agro-industriels en briquettes dans l'optique de substituer ultérieurement une partie du bois énergie utilisée par la société. Les travaux d'expérimentation comprennent l'analyse des caractéristiques physico-chimiques des briquettes SOCTAM, la réalisation des différents tests de combustion et l'étude d'impacts socio-économiques et environnementaux de l'utilisation de ces briquettes. Deux échantillons de briquettes ont été testés avec le contenu énergétique compris entre 4 500 à 5 000 kcal/kg. Le résultat de ces tests a montré la performance énergétique de ces biocombustibles issus de la presse à vis mécanisé car son utilisation en combustion a permis de réduire à 40,62 % la consommation en bois énergie. De plus, le test d'acceptabilité des briquettes au niveau des ménages a montré que 80 % des ménages ont été satisfaits. Sur le plan environnemental, SOCTAM a accentué la déforestation de son espace forestière pour le séchage des tabacs. Sur le plan économique, la société a pu tirer un bénéfice net annuel quantifiable 2 170 000 Ar et non quantifiable grâce à l'adoption de cette technologie de briquetage au niveau de la société et à travers plusieurs ménages.

Mots-clés : Bois énergie, Briquettes, Déchets agro-industriels, Impacts, Valorisation, Tests

ABSTRACT

This work is the result of field studies within SOCTAM in Mampikony. Heaps of crop wastes are stored, not valued within this company at the end of the campaign and no solution has been considered to manage them previously. The aim of this research work is to contribute to the energy valorization of this waste into briquettes with the aim of subsequently replacing part of the energy wood used by the company. The experimental work includes the analysis of the physico-chemical characteristics of the SOCTAM briquettes, the performance of the various combustion tests and the study of the impacts socio-economic and environmental of these briquettes. Two samples of briquettes were tested with energy content between 4,500 to 5,000 kcal/kg. The results of these tests showed the energy performance of briquettes from the mechanized screw press because its use in combustion made it possible to reduce energy wood consumption to 40.62 %. In addition, the briquette acceptability test at the household level showed that 80 % of households were satisfied. On an environmental level, SOCTAM has reduced the deforestation of its forest area for drying the tobacco. On the economic level, the company was able to derive a quantifiable annual net profit of Ar 2,170,000 and not quantifiable thanks to the adoption of this briquetting technology at the level of the society but also through several households.

Key-words : Agro-industrial waste, Briquettes, Energy wood, Impacts, Valorization, Tests

INTRODUCTION

Les résidus agro-industriels proviennent des industries de transformation agroalimentaires ou des industries de transformation du bois (Devendra, 1988). Ces résidus sont souvent utilisés en combustion directe pour satisfaire les besoins énergétiques. Il est primordial d'étudier l'aspect « matières premières » pour ses conséquences dans les coûts opérationnels et la viabilité de l'unité de densification (CDI & CRA, 1993).

La sciure, la balle de riz, la parche de café, l'épi de maïs, la poussière de charbon, la feuille de banane, le papier et le carton sont les résidus les plus utilisés dans la production des briquettes (Dusabe, 2014). A Madagascar, les briquettes combustibles sont encore rarement produites et utilisées par les industries et les ménages. La Société de Culture de Tabac à Madagascar (SOCTAM) produit des briquettes à base des déchets agro-industriels pour leur besoin. Les produits restent encore à des fins industriels alors que ceux-ci méritent d'être étudiés afin d'améliorer la production.

Afin de résoudre ces problèmes, le présent travail consiste à améliorer l'approvisionnement en énergie dans les domaines ménagers et industriels. Comme la biomasse constitue une des alternatives pour réduire l'utilisation de bois et du charbon, l'objectif principal de cet article était de contribuer à l'évaluation de l'impact de l'utilisation des briquettes combustibles à des fins domestiques et industrielles.

MATERIELS ET METHODES

Sites d'étude

Deux sites d'études ont été parcourus pour réaliser les travaux de recherche. Les sites se trouvent dans le site Labandikely de la Société SOCTAM et auprès des ménages au village Tsangambato, dans le District de Mampikony, dans la Région Sofia.

Analyse physico-chimiques des briquettes

Des analyses ont été faites au laboratoire CNRIT suivant la « Norme : NF B 55 – 101 » sur les briquettes de la Société SOCTAM. La capacité des briquettes a pu être mesurée sur base des principaux paramètres de caractérisation à savoir : le Pouvoir Calorifique Inférieur (PCI), la teneur en eau, le taux de cendres, l'indice de matières volatiles et l'indice de carbone fixe. Les principaux matériels pour la détermination des paramètres physico-chimiques des briquettes ont été le four à moule, l'étuve, le dessiccateur et la balance de précision. La formule permettant de déterminer le PCI en fonction de son contenu en eau est la suivante (en kWh/kg) :

$$\text{PCI bois humide} = \{\text{PCI anhydre} \times (1 - \text{HR\%/100})\} - \{2,5 \times \text{HR\%/100}\}$$

avec : HR% : humidité relative du combustible exprimée en fonction de sa masse humide ;

PCI du bois anhydre vaut en moyenne 5, 14 kWh/kg (18,5 MJ/kg).

Test de combustion et d'appréciation

Pour l'étude de l'utilisation des briquettes, des tests ont été réalisés dans les conditions réelles de la cuisine quotidienne, à savoir le test de combustion et le test d'acceptabilité. Les tests ont été nécessaires pour pouvoir évaluer les attitudes des ménages vis-à-vis des briquettes et recueillir leurs suggestions sur les améliorations à apporter aux briquettes.

Pour ce qui concerne le test d'aptitude des briquettes à la combustion, le feu a été préparé avec du bois et des feuilles de maïs. Lorsque le feu est allumé, 2 à 3

briquettes ont été déposées dans le feu (Koala, 2012). Pour le déroulement du test d'acceptabilité, 26 utilisateurs dont 01 Société SOCTAM et 25 ménages au village Tsangambato ont été choisis. Les deux échantillons de briquettes ont été distribués selon les besoins des utilisateurs. Le test a été suivi journalièrement pendant 8 jours et des évaluations ont été faites.

Détermination des coûts de production des briquettes

L'analyse financière a été décrite sur le calcul des coûts des intrants requis, de la main d'œuvre et des coûts divers, des coûts de transport, des coûts d'exploitation et de coût total de la production mensuelle. Le cout total de production se compose du coût de la matière première, du coût du liant, de l'eau, et de la consommation d'électricité (FAO, 2014). La formule du coût total des intrants ou TIC (Ar/mois) a été donnée par la formule suivante :

$$\text{TIC} = (\text{QF} \times \text{Cf}) + (\text{CB} \times \text{Cb}) + (\text{WC} \times \text{Cw}) + (\text{EC} \times \text{Ce})$$

avec : Total des coûts d'exploitation = TIC + Coût total de la main d'œuvre
+ Transport

RESULTATS

Caractéristiques des briquettes étudiées

Deux types de produits issus de la presse à vis mécanisé ont été analysées. La Briquette N°1 est à base de résidu forestier broyée à 50 %, balle de riz à 30 % et de la poudre de tabac à 20 % ; et la Briquette n°2 à base de balle de riz à 60 % et de la poudre de tabac à 40 %. Concernant la morphologie des briquettes produites, elles sont de forme cylindrique, avec une hauteur de 10 à 30 cm, dont le diamètre externe est de 5 cm, le diamètre du trou central est de 2,5 cm, la masse de la briquette est de 1 100 à 1 500 g et le volume est de 982 cm³. Les tests de comparaison des masses volumiques moyennes de la Briquette n°1 comparées avec la Briquette n°2, a montré qu'il n'y a pas eu différence significative au seuil de 5 %.

Le Tableau 1 suivant montre les résultats sur les caractères physico-chimiques (la teneur en eau, la teneur en cendres, l'indice de matières volatiles et l'indice en carbone fixe) et les caractéristiques thermiques (le temps d'inflammabilité et le PCI) de deux échantillons.

Tableau 1 : Résultats d’analyse des échantillons de briquettes

Paramètres (%)	Briquelette n°1	Briquelette n°2
Teneur en eau	7,6	5,4
Teneur en cendres	33,4	24,8
Indice de matières volatiles	31,0	34,2
Indice en carbone fixe	28,0	35,6
Temps d’inflammabilité (min)	12	12
PCI (kWh/kg)	4, 892	5, 068

L’analyse des briquettes portant sur les paramètres étudiées a révélé que la Briquelette n°1 a eu la teneur en eau élevée par rapport à la Briquelette n°2. Ce qui va diminuer sa valeur calorifique. Plus l’humidité est faible, plus la valeur calorifique est grande.

Résultats du test de combustion et d’appréciation

Impact environnemental

La Figure 1 suivante illustre les variations de l’emploi des bois de chauffe et des briquettes pour le séchage des feuilles du tabac de la Société SOCTAM au cours de l’année 2013 jusqu’en 2017. A partir de 2015, l’utilisation des briquettes a entraîné la baisse sur l’emploi des bois de chauffe. La Figure 2 suivante illustre l’évolution de l’espace forestière de la forêt d’*Eucalyptus* de la Société SOCTAM au cours de l’année 2012 jusqu'en 2017.

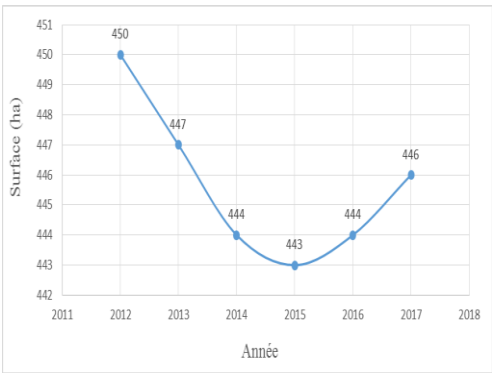
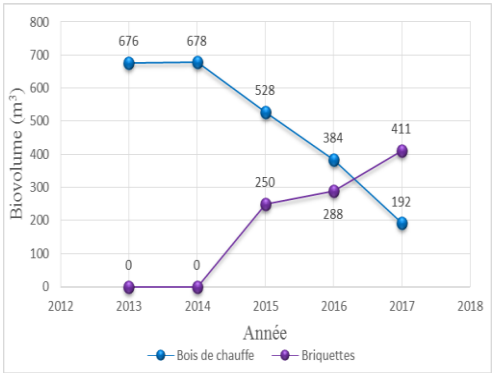


Figure 1 : Variations de l’emploi des bois de chauffe et des briquettes

Figure 2 : Evolution de l’espace forestier d’Eucalyptus de SOCTAM b

En premier lieu, de 2012 à 2014, le profil est décroissant, dû aux feux de brousse et à la déforestation. En second lieu, de 2015 à 2017, le profil devient croissant, à cause de l'utilisation des briquettes (qui a débutée en 2015) et des plantations des pépinières des plantes à croissance rythmique (*Acacia sp*, *Ziziphus sp*, *Eucalyptus sp*). Plus l'utilisation des briquettes a été augmentée (250 à 411 m³, Figure 1), plus la déforestation a diminué, plus la forêt a été sauvegardée (Figure 2). Cela a prouvé l'intérêt et l'efficacité écologique et la forte valeur énergétique de ces briquettes. Le test de χ^2 sur les puissances de chauffe entre les briquettes et les bois de chauffe a relevé qu'il y a eu une grande différence significative au seuil de 5 % entre les masses consommées de ces combustibles lors de la combustion.

Impact économique

Le Tableau 2 suivant représente les résultats sur le coût de production totale de briquettes par mois pour la presse manuelle et la presse à vis mécanisée, les coûts d'exploitation et l'analyse financière pour les deux types de matériels de briquetage.

Tableau 2 : Coût de production totale de briquettes produites

Paramètres	Mécanisée à échelle moyenne
Produit de briquettes (kg/mois)	50 000
Quantité de matière première (kg/mois)	52 631
Quantité de liant : huile de vidange (litre/mois)	2 127
Consommation d'eau (m ³ /mois)	Néant
Consommation d'électricité (kWh/mois)	100
Coût total des intrants (Ar/mois)	5 372 500
Coût total de la main d'œuvre (Ar/mois)	1 375 000
Transport de matières premières (Ar/mois)	12 631 440
Total des coûts d'exploitation (Ar/mois)	19 378 940
Coût mensuel d'entretien	350 000
Coût de production total (Ar/mois)	19 728 940

Le prix de vente à l'unité de production a été 400 Ar/kg pour la presse à vis mécanisée. La capacité de production prédéfinie a été de 300 à 400 kg/h pour cette presse à échelle moyenne. Pour l'heure de fonctionnement de 5 h/jour, 50 000 kg de briquettes ont été produites par mois. A partir de cette production mensuelle et le coût de production total des briquettes, les bénéfices ont été 271 060 Ar par mois.

Impact social

Les utilisateurs ont apprécié le plus la Briquette n°2, avec un taux d'appréciation moyen de 60,5 %, à cause de son efficacité énergétique. En effet, la quantité des biocombustibles consommés lors du test d'ébullition d'un litre d'eau, pour le bois de chauffe a été 463 g, pour le charbon 229 g, contre 171 g pour la Briquette n°2. Les 80 % ménages enquêtés sont prêts à utiliser les briquettes, comme combustible principal, qui peuvent facilement être acceptés sur le marché.

DISCUSSION

Les résidus agro-industriels peuvent être utilisés comme source d'énergie renouvelable. Pourtant, le traitement dépend de la disponibilité de ces déchets : pour le site Mampikony (balle de riz, poudre de tabac). En cas de leur disponibilité, face aux problèmes liés aux combustibles fossiles et à la déforestation, ces résidus peuvent être densifiés pour avoir des combustibles solides.

Malgré l'importance des briquettes, de nombreuses défaillances des machines de briquetage dans la plupart des pays développés ont inhibé leur exploitation extensive (Grover & Mishra, 1996). La Société SOCTAM utilise les briquettes produites pour ses besoins. Malgré cela, les produits ne sont pas suffisants à cause de la défaillance des matériels de briquetage. En plus la réparation de la vis sans fin est presque journalière.

Pour 6,11 kg de bois de feu avec 1.3 MJ/kg de valeur calorifique sont nécessaires pour fournir l'énergie utile égale à 1 kg de briquettes avec 7.7 MJ/kg (Young & Khennas, 2003). Il semble que le bénéfice net obtenu ici est très peu par rapport à celui des autres projets. Cependant, c'est le côté écologique que les briquettes combustibles peuvent nous procurer qui nous incite à les produire, améliorer et utiliser dans notre vie quotidienne.

Les critères d'un produit de bonne qualité sont avec le taux d'humidité faible, la teneur en cendres faible et la densité élevée (Manoj et al., 2015). Cependant, la teneur en cendres de la Briquette n°1 a été de 33,4 %. Les utilisateurs ont été satisfaits par la Briquette n°2 pour sa meilleure qualité en combustion. La fumée se dégage avec une légère difficulté de démarrage du feu mais, une qualité de cuisson plus rapide pour les repas à longue durée de cuisson.

CONCLUSION

Le traitement des déchets agro-industriels pour la production des briquettes combustibles suit des processus de fabrication, en tenant compte des paramètres pour avoir des combustibles de qualité. Concernant, l'utilisation des briquettes de la presse à vis pour le séchage du tabac a montré que la réduction en combustibles peut aller jusqu'à 34,37 %. L'étude économique faite a pu confirmer que le projet de densification est faisable avec la maîtrise de la technologie appropriée.

Les briquettes combustibles ardentes peuvent diminuer jusqu'à 50 % la dépendance en bois de chauffe. Donc, la production de combustibles de substitution permet de réduire la pression humaine sur l'environnement. En plus, elles peuvent être utilisées dans tous les appareils destinés à la combustion du bois ou du charbon. La compétition avec ces combustibles usuels est alors envisageable.

Les briquettes peuvent donc répondre à l'insuffisance énergétique domestique et industrielle, en substituant le charbon de bois et le bois de feu. La filière biocombustible peut contribuer à la protection de la forêt contre le déboisement sauvage. Elle est d'une importance capitale pour la politique de diversification énergétique et incite à promouvoir le développement durable par la création des emplois locaux.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) CDI & CRA (1993). Briquettes à base de déchets végétaux. Centre pour le Développement Industriel (CDI) - Centre de Recherches Agronomiques de Gembloux (CRA-Belgique), les guides du CDI - Série Technologies-N°1. Briquettes à base de déchets végétaux, 61p.
- 2) Devendra, C. (1988). Forage supplements : Nutrition significance and utilization for draught, meat and milk production. In *proceedings of the second world Buffalo*. Congress, vol 2. 12-17 december 1988, Indian Concil of Agricultural Recherche (ICAR), New Dehli, India. p. 409-423.
- 3) Dusabe, M.S. (2014). Etude de faisabilité technique et financière de la valorisation des déchets ménagers organiques, papiers et cartons pour la fabrication des briquettes combustibles à Bujumbura, Burundi. Mémoire pour l'obtention du Master en ingénierie de l'eau et de l'environnement, 2IE, Ouagadougou, 2014.
- 4) FAO (2014). Bioénergie et Sécurité Alimentaire, Evaluation Rapide (BEFS Ra), Manuel d'utilisation. Briquettes, 40p.

- 5) Grover P.D. & Mishra S.K. (1996). Biomass Briquetting: Technology and Practices. Regional Wood Energy Development Programme In Asia GCP/RAS/154/NET. Field Document N°46. FAO. Bangkok (April 1996), 48p.
- 6) Koala, L. (2012). Fabrication manuelle de briquettes de balles de riz et évaluation des performances du foyer amélioré à balles de riz. Mémoire de Fin de cycle du Diplôme d'Ingénieur du Développement Rural. Option : Eaux et Forêts, Institut du Développement Rural /Université Polytechnique de Bobo-Dioulasso. Burkina Faso, 103p.
- 7) Manoj, K., Gohil P. & Nikita, S. (2015). Biomass Briquette Production In *American Journal of Engineering Research (AJER)*. 4(2) : 44-50. e-ISSN : 2320-0847 p-ISSN : 2320-0936
- 8) Young, P. & Khennas, S. (2003). Feasibility and Impact Assessment of a Proposed Project to Briquette Municipal Solid Waste for Use as a Cooking Fuel in Rwanda. In *Consultancy Report to the Business Linkages Challenge Fund (BLCF)*, (January).

SUIVI DE L'EVOLUTION DES PSEUDO-ILOTS DU MARAIS MARITIME DE BOMBETOKA PAR TELEDETECTION

par

ANDRIAMANANTENA Fenoza H.^(1, 2, 3), ANDRIAMANANTENA Ainazo H.^(1, 2, 3),
ILTIS Jacques⁽³⁾, DELAÎTRE Eric⁽³⁾, ANDRIAMANANTENA Zolalaina,^(2, 3),
ANDRIAHARIMALALA Tahiana⁽⁴⁾, RANARIJAONA Hery Lisy Tiana^(1, 2)

(1) Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement, Université de Mahajanga, Madagascar

(2) Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels, Université de Mahajanga, Madagascar

(3) UMR 228 Espace pour le Développement, IRD Montpellier, France

(4) Institut Universitaire de Technologies et d'Agronomie de Mahajanga, Université de Mahajanga, Madagascar

(5) Centre National de Recherches sur l'Environnement (CNRE), Antananarivo, Madagascar

RESUME

Le présent travail concerne la progression des pseudo-îlots du marais maritime de Bombetoka. Ce marais se trouve au Nord-Ouest de Madagascar, au cœur du fleuve de Betsiboka. Même si elle fait face à de diverses pressions, il possède des caractéristiques spécifiques et uniques. L'objectif est de montrer la spécificité de ce marais afin de proposer des solutions pour la gérer et la conserver durablement. Des prospections botaniques ont été menées dans cet écosystème. Des mesures biométriques ont été effectuées, par l'intermédiaire de transects de Duvigneaud et de placeaux de Braun-Blanquet afin de savoir la taille et l'effectif des individus présents. Des images satellitaires optiques récentes et anciennes ont été utilisées pour localiser les zones d'étude et suivre le mouvement des pseudo-îlots. Des enquêtes socio-économiques ont été réalisées afin de compléter cette étude. La télédétection et l'informatique révèlent, 50 pseudos-îlots à partir de 2015. A cause du dépôt des sédiments, des pseudo-îlots sont néoformés en direction vers l'aval du fleuve. En plus, le marais maritime de Bombetoka est composé de 38 familles de plantes. Leurs mangroves sont presque monospécifiques, dominées par l'espèce *Avicennia marina* pour les mangroves en ce moment. Les palétuviers s'installent dans les pseudo-îlots en aval. Des recommandations seront fournies pour une gestion et conservation durable, comme l'actualisation et/ou la création des textes officiels relatifs aux mangroves et aux autres écosystèmes de Madagascar, la sensibilisation de cette spécificité du marais maritime de Bombetoka.

Mots-clés : *Avicennia marina*, Bombetoka, Développement durable, Evolution, Madagascar, Pseudo-îlots, Télédétection

ABSTRACT

This research concerns the progression of the pseudo-islets of the Bombetoka maritime marsh. This marsh is located in the northwest of Madagascar, on the heart of the Betsiboka river. Even though it faces various pressures, it has specific and unique characteristics. The aim is to show the specificity of this marsh in order to offer solutions to manage and conserve it sustainably. In the field, botanical surveys have been carried out in this ecosystem. Biometric measurements were carried out, using Duvigneaud transects and Braun-Blanquet plots in order to know the size and the size of the individuals present. Recent and old optical satellite images have been used to locate study areas and track the movement of pseudo-islets. Socio-economic surveys were carried out to complete this study. Using the remote sensing and the computer, there are 50 pseudo-islets from 2015. Due to sediment deposition, pseudo-islets are newly formed in the downstream direction of the river. In addition, Bombetoka Sea Marsh is made up of 38 families plants. Their mangroves are almost monospecific, dominated by *Avicennia marina* species for mangroves at this time. The mangroves settle in the pseudo-islets downstream. Recommendations will be provided for sustainable management and conservation, such as updating and / or creating official texts relating to mangroves and other ecosystems in Madagascar, raising awareness of this specificity of the Bombetoka maritime marsh.

Key-words : *Avicennia marina*, Bombetoka, Evolution, Madagascar, Pseudo-islets, Remote sensing, Sustainable development

INTRODUCTION

Madagascar, caractérisé par une superficie totale de 592 000 km², de 1 600 km du Nord au Sud et de 600 km au maximum de l'Ouest à l'Est se trouve entre 12° et 25°30 de latitude Sud, 42° et 50° de longitude Est. La grande île fait partie de l'ancien grand continent austral du Gondwana (IUCN, 2007, Ministère de l'Eau, 2006 et Rabinowitz *et al.*, 1983) et la cinquième plus grande île du Monde (Allorge, 2007). Plus de 425 000 ha de cette superficie de l'île est occupée uniquement par des marais maritimes. La superficie 327 000 ha sont des écosystèmes de mangroves, soit 2 % des mangroves dans le monde (Jones *et al.*, 1994). Ces forêts occupent 2,4 % du couvert forestier total dans le monde dont 98 % de la superficie située sur la côte occidentale et 2 % seulement sur la côte orientale (USAID, 2008). Les restes de la superficie sont d'autres écosystèmes. (Andriamanantena, 2019)

Même si elle fait face à diverses pressions, ce marais maritime possède des caractéristiques spécifiques et uniques à Madagascar. L'objectif principal est de montrer la spécificité de ce marais afin de proposer des solutions pour la gérer et la conserver durablement. Des objectifs spécifiques sont posés tels que : inventorier les espèces végétales caractéristiques du marais maritime de Bombetoka, recenser les pseudo-îlots existants, savoir leurs noms respectifs et voir la différence des pseudo-îlots entre 1972 et 2015.

MATERIELS ET METHODES

Zone d'études

Le marais maritime de Bombetoka, situé approximativement de longitude entre 46°15'E et 46°40' E et de latitude entre 15°50' S et 16°05' S, se trouve dans la Région Boeny, sur le littoral Nord-Ouest de Madagascar, dans le cœur de l'estuaire du fleuve de Betsiboka. Ce marais est encadré par trois Districts (Figure 1, ci-dessous) :

- Au Nord-est le District de Mahajanga II ;
- De l'Est vers Sud-ouest, le District de Marovoay ;
- Et à l'Ouest le District de Mitsinjo. (Andriamanantena, 2019).

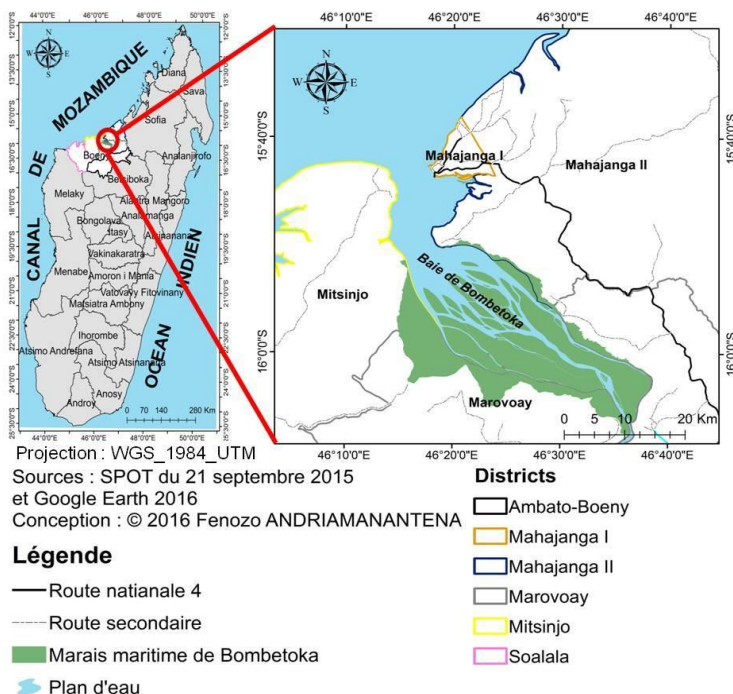


Figure 1 : Localisation du marais maritime de Bombetoka

Matériels

Durant les études, plusieurs matériels sont utilisés.

Outils de terrain

Divers matériels sont utilisés durant l'étude sur terrain :

- Un Global Positionning System (GPS) de marque Garmin permettant de prendre et d'enregistrer les coordonnées géographiques de chaque point de relevé écologique et de chaque classe d'occupation du sol pour l'analyse des images satellitaires.
- Une boussole permettant de connaître l'orientation de transects.
- Un appareil photo numérique pour photographier l'écosystème.

Outils de télédétection

Des données satellites pour la télédétection et des logiciels spécialisés ont été utilisées pour suivre l'évolution des pseudo-îlots du marais maritime de Bombetoka. Durant l'étude, des images optiques, partant des images anciennes jusqu'aux images de très haute résolution, ont été utilisées dont chacune a ses propres résolutions spatiales. Ce sont des images LANDSAT, SPOT.

Méthodes

Etudes bibliographiques et webographiques

Des études préliminaires ont été faites à partir de la bibliographie et la webographie ainsi qu'une première descente en une prospection botanique dans les pseudo-îlots. Le but de ces études est d'avoir des informations concernant le thème étudié, la localisation de la zone d'étude ainsi que les méthodes à utiliser. Dans ce cas, des documents et des ouvrages ainsi que des sites web ont été consultés (Andriamanantena, 2019).

Méthodes d'enquêtes

Des enquêtes ont été effectuées et elles sont basées sur :

- Les causes de l'avancement des pseudo-îlots ;
- La nomenclature et la raison de celle-là sur les pseudo-îlots ;
- La connaissance sur leurs apparitions en general ;
- Les avantages et les effets de multiplication des pseudo-îlots.

Des critères ont été ainsi posés, à savoir :

- La population dont l'âge est supérieur à 18 ans et qui réside depuis longtemps dans chaque village ;
- Les personnes enquêtées suivant les informations et les recommandations émanant de l'autorité compétente de chaque quartier.

Deux types d'enquêtes ont été utilisés et appliqués, à savoir des enquêtes individuelles et des enquêtes en groupe (Andriamanantena, 2019). Les questionnaires se divisent en deux types de questions : une question ouverte et une question fermée. La question ouverte permet d'avoir beaucoup d'informations même si les réponses sont vagues. D'autre part, la question fermée sert à avoir une réponse très précise. Ces enquêtes ont été faites dans les trois Districts.

Relevés écologiques

Des transects du Duvigneaud et des placeaux de Braun-Blanquet ont été réalisés. Les sites de relevés ont été choisis suivant l'accessibilité des îlots. Le transect suit une ligne de 10 m x 100 m étendus à travers la végétation, subdivisé en carrés contigus de 10 m x 10 m. (Duvigneaud, 1980 et 1946). Il est perpendiculaire au chenal et la mer. La méthode de placeau permet d'apprécier la dynamique de croissance des individus mais aussi de déterminer les espèces associées à l'espèce cible dans une zone homogène sur une surface de (50 x 20 m²) subdivisée en 10 placettes de 10 m x 10 m (Braun-Blanquet *et al.*, 1952). Pour chaque relevé, les paramètres géographiques (localisation, coordonnées géographiques, orientation et exposition) ainsi que les paramètres floristiques et physiologiques (nom scientifique, nom vernaculaire, diamètre et hauteur maximale de tous les individus), ont été notés.

Méthodes de télédétection

Pour réaliser l'analyse des images satellitaires optiques comme les images SPOT 6/7, Landsat, un certain nombre de traitements successifs a été réalisé pour suivre l'évolution des pseudo-îlots. Dans l'acquisition des données, des images d'archives sur des zones précises ont été utilisées pour réaliser le suivi. Ces images peuvent être gratuites ou payantes ; elles sont disponibles en téléchargement ou accessibles via une interface web. Les images ont été sélectionnées puis téléchargées avec leurs métadonnées sur les critères de pourcentage de la couverture nuageuse de l'image spécialement dans le milieu d'étude et la date d'acquisition. Cette date devra correspondre à la saison sèche en fonction du climat de la Région Boeny. Le prétraitement concerne la reprojection de toutes les images satellitaires utilisées durant la recherche dans un même système de projection, UTM 38S avec comme

système géodésique le WGS 84 ainsi que l'extraction afin de délimiter et découper la zone d'étude. Le traitement est d'avoir les images en composition colorée en utilisant la fausse couleur afin d'obtenir une bonne visualisation de la végétation en rouge sur les images et d'interpréter les photos. (Andriamanantena, 2019).

RESULTATS

Flore du marais maritime de Bombetoka

Le Tableau 1 représente l'effectif et le pourcentage des espèces par famille obtenus à partir de la liste floristique globale recensée de l'amont vers l'aval du marais maritime de Bombetoka.

Tableau 1 : Effectif et fréquence des espèces par famille

Famille	Espèces par famille	Fréquence (%)
<i>Anacardiaceae</i>	1	2,63
<i>Apocynaceae</i>	1	2,63
<i>Araceae</i>	1	2,63
<i>Arecaceae</i>	1	2,63
<i>Avicenniaceae</i>	1	2,63
<i>Combretaceae</i>	2	5,26
<i>Convolvulaceae</i>	3	7,89
<i>Cyperaceae</i>	2	5,26
<i>Euphorbiaceae</i>	1	2,63
<i>Fabaceae</i>	5	13,16
<i>Lythraceae</i>	1	2,63
<i>Malvaceae</i>	2	5,26
<i>Meliaceae</i>	1	2,63
<i>Moraceae</i>	1	2,63
<i>Musaceae</i>	2	5,26
<i>Pandanaceae</i>	1	2,63
<i>Papilionaceae</i>	1	2,63
<i>Poaceae</i>	5	13,16
<i>Polygonaceae</i>	1	2,63
<i>Rhamnaceae</i>	1	2,63
<i>Rhizophoraceae</i>	3	7,89
<i>Typhaceae</i>	1	2,63
Total	38	100

Vingt-deux familles comprenant trente-six genres et trente-huit espèces ont été rencontrées. En amont, trente-une espèces réparties en vingt-neuf genres et dix-huit familles ont été inventoriées. En aval, neuf espèces réparties en neuf genres et six familles ont été trouvées. Parmi les vingt-deux familles rencontrées, les six familles de palétuviers qui se trouvent à Madagascar sont toutes présentes. Les familles *Poaceae* et *Fabaceae* sont les plus diversifiées avec cinq espèces soit 13,2 %. Viennent ensuite les familles *Rhizophoraceae*, *Convolvulaceae*, *Combretaceae*, *Cyperaceae* et *Malvaceae*. (Tableau 1).

Evolution des pseudo-îlots

Pseudo-îlots en 1972

La Figure 2 montre les pseudo-îlots du marais maritime de Bombetoka présents en 1972.

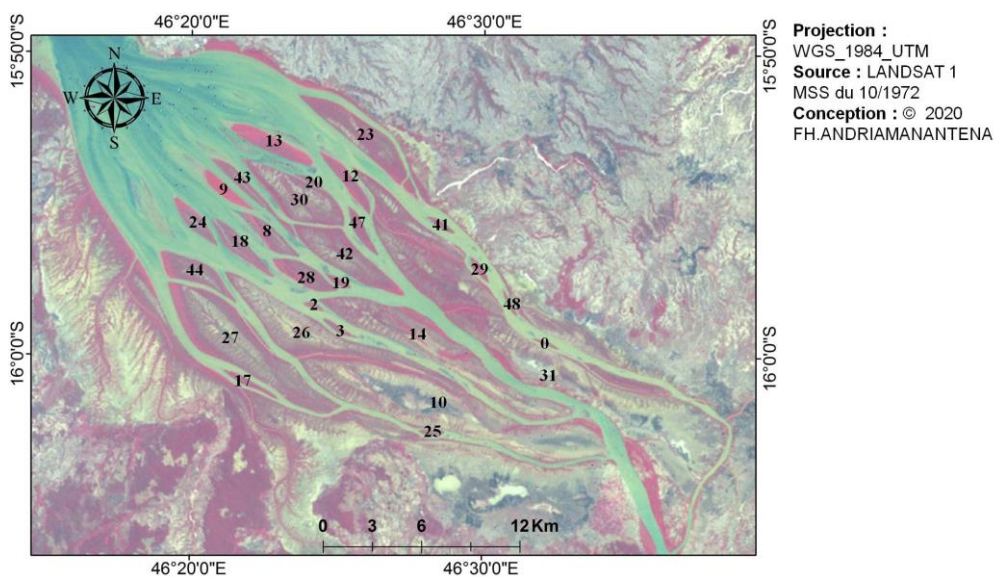


Figure 2 : Pseudo-îlots du marais maritime de Bombetoka en 1972

Selon la Figure 2 ci-dessus, 28 pseudo-îlots existent déjà en 1972. Ils sont arrêtés au cœur de fleuve de Betsiboka.

Pseudo-ilots recensés et identifiés sur les 43 dernières années

La Figure 3 montre les pseudo-îlots du marais maritime de Bombetoka recensés et identifiés en 2015 en utilisant les images SPOT 6 et 7.

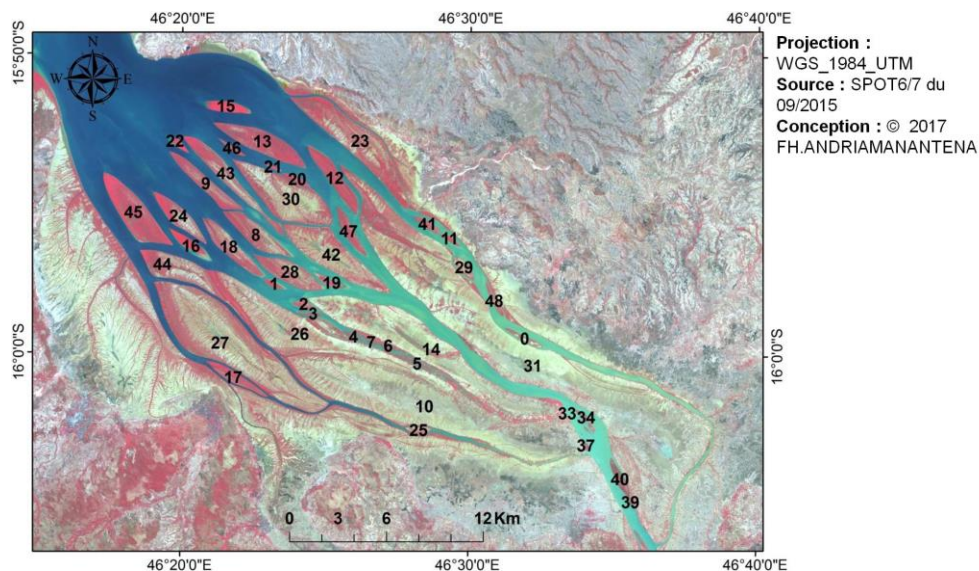


Figure 3 : Pseudo-îlots du marais maritime de Bombetoka

Selon les enquêtes et les descentes sur terrain faites à partir de 2015, le marais maritime de Bombetoka possède 50 pseudo-îlots (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). Parmi eux, les 42 îlots sont stables dont 31 seulement dénommés par la population locale (Tableau 2). Les huit îlots restants sont instables et n'ont pas encore été baptisés, et n'ont pas faits l'objet de relevés écologiques.

Liste des pseudo-îlots recensés et identifiés en 2015

Le Tableau 2 montre les pseudo-îlots en 2015 qui ont des noms et stabilités.

Tableau 2 : Liste des pseudo-îlots dénommés dans le marais maritime de Bombetoka

Numéro sur la carte	Ilots	Coordonnées géographiques	
		Latitudes	Longitudes
8	Ambanibe ou Kabaro	15°55'S et 15°56'S	46°21'E et 46°24'E
9	Ambanikely ou Boantsibe	15°53'S et 15°55'S	46°19'E et 46°22'E
10	Ambinanitelo	16°00'S et 16°03'S	46°23'E et 46°34'E
11	Andohaomby	15°55'S et 15°56'S	46°28'E et 46°29'E
12	Anglais	15°52'S et 15°55'S	46°24'E et 46°26'E
13	Anjanaborona ou Anosinjanaboro	15°58'S et 16°02'S	46°24'E et 46°33'E
14	Anosimboro	15°52'S et 15°53'S	46°21'E et 46°24'E
15	Batribe ou Mario	15°51'S	46°20'E et 46°22'E
16	Bekarara	15°55'S et 15°56'S	46°19'E et 46°20'E
17	Bemafana	16°00'S et 16°01'S	46°20'E et 46°23'E
18	Betaikary ou Besalelo	15°55'S et 15°57'S	46°20'E et 46°22'E
19	Betaikilotra	15°57'S	46°24'E et 46°25'E
20	Boantsiavaratra	15°53'S et 15°54'S	46°23'E et 46°24'E

21	Boantsindrondro	15°53'S	46°22'E et 46°23'E
22	Boantsiny Dimbiny	15°52'S et 15°53'S	46°19'E et 46°20'E
23	Lagera	15°51'S et 15°55'S	46°23'E et 46°27'E
24	Lalina	15°54'S et 15°56'S	46°19'E et 46°20'E
31	Malaibandy	15°53'S et 16°06'S	46°25'E et 46°39'E
30	Manambotra	15°53'S et 15°55'S	46°21'E et 46°25'E
29	Maneritery	15°56'S et 15°57'S	46°29'E et 46°30'E
28	Mangamanga ou Omby	15°56'S et 15°57'S	46°22'E et 46°24'E
27	Manitomany	15°57'S et 16°02'S	46°19'E et 46°25'E
26	Marofisonko ou Lovitay	15°57'S et 16°01'S	46°21'E et 46°29'E
25	Mpanjaka	16°02'S	46°27'E et 46°28'E
41	Samambazo	15°55'S	46°28'E et 46°29'E
42	Tambohobe	15°55'S et 15°57'S	46°23'E et 46°27'E
43	Tanindrazana	15°52'S et 15°56'S	46°19'E et 46°23'E
44	Tavoahangy ou Bemangoraka	15°56'S et 15°59'S	46°18'E et 46°22'E
45	Tsalopy ou Boalavo	15°53'S et 15°56'S	46°17'E et 46°19'E
46	Vao	15°52'S et 15°53'S	46°21'E et 46°22'E
47	Voay ou Nosimboay	15°55'S et 15°56'S	46°25'E et 46°26'E

Sources : Image satellite SPOT 6 MS du 21 septembre 2015 et auteur en 2019

Au cours de l'étude faite depuis 2015, les pseudo-îlots ayant un nom sont au nombre de 31 selon le tableau II ci-dessus. Ils ont leurs propres coordonnées. En comparant La présence des pseudo-îlots Batribe ou Mario, Boantsiny Dimbiny et Tsalopy ou Boalavo, différencie les deux images de l'année 1972 et celle de l'année 2015.

DISCUSSION

Au cours de l'étude, la difficulté de l'accès dans certains des pseudo-îlots et la méfiance des gens nous ont empêchés d'avoir suffisamment de données qui auraient permis d'avoir des connaissances supplémentaires. Les différentes études effectuées directement sur les mangroves de Bombetoka surtout sur les pseudo-îlots, ne sont pas nombreuses. Néanmoins, les différents relevés que nous avons pu effectuer sur les mangroves de Bombetoka ainsi que les images satellites acquises nous ont permis de produire des nouvelles informations sur le marais maritime de Bombetoka.

Des études ont été faites dans ou autour de cette zone. Il y eut Andriamalala (2007), Kiener (1972 et 1966), Lebigre (1990), cependant elles ne parlent pas des noms et le nombre des pseudo-îlots.

En 1972, les pseudo-îlots sont au nombre de 28, en 2015 ils sont au nombre de 50. Cette augmentation est due au dépôt des sédiments venant de l'érosion du bord de fleuves et/ou des rives et/ou des pseudo-îlots en amont et/ou des sols nus dans le centre de Madagascar. Ces sédiments se déposent alors en aval du fleuve de

Betsiboka. La stabilité des pseudo-îlots est montrée par la présence des espèces ligneuses.

Des recommandations sont faites dans un objectif de développement durable de ce marais maritime tels que l'actualisation et l'application de lois relatives aux environnements, le renforcement de la protection de ce milieu ainsi que sa restauration et/ou son enrichissement.

CONCLUSION

Les études sur la mangrove ne sont pas du tout évidentes parce que cet écosystème particulier est difficile d'accès. De plus, pour le cas du marais maritime de Bombetoka, un certain nombre de caractéristiques en fait un écosystème très spécifique. C'est une étude qui a suivi l'évolution des pseudo-îlots, connaissant leur nom et leurs caractéristiques respectifs. A partir de ce suivi, une progression en aval du marais maritime de Bombetoka a été observée. Par la suite, elle entraîne l'augmentation du nombre des pseudo-îlots apparus. Cet aval de ce marais maritime est dominé par la forêt de mangrove. La connaissance du nombre et du nom des pseudo-îlots apporte des intérêts sur la population à Madagascar, la population locale, les chercheurs, les étudiants ainsi que sur d'autres secteurs. De plus, le déplacement des mangroves vers l'aval, avec celui de la faune permet d'élargir la recherche. Comme perspective, des études approfondies sur cette évolution des pseudo-îlots, qui attirent le tourisme, devront être apportées et continuées.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Allorge, L. (2007). *Plantes de Madagascar*. Les éditions Eugen Ulmer. Paris. 224p.
- 2) Andriamalala, C.A.J. (2007). *Etude écologique pour la gestion des mangroves - Comparaison d'une mangrove littorale et d'estuaire à l'aide de la télédétection*. Thèse de doctorat. Basel. 268p.
- 3) Andriamanantena, F.H. (2019). *Dynamique écologique des mangroves de l'estuaire du fleuve Betsiboka (Nord-ouest de Madagascar) : Approche biométrique et par télédétection*. Thèse de Doctorat en Écosystèmes Naturels, N° : 001/2019/EDEN/UMG. Université de Mahajanga. 256p.
- 4) Braun-Blanquet, J. et al. (1952). Les groupements végétaux de la France méditerranéenne. Dir. Carte Group. Vég. Afr. Nord, CNRS, 292 p.
- 5) Duvigneaud, P. (1980). *La synthèse écologique*. Dion, Paris. 380p.
- 6) Duvigneaud P. (1946). La variabilité des associations végétales. *Bulletin de la Société royale de Botanique de Belgique*. 78 : 107-134.

- 7) IUCN. (2007). *Evaluation report*. ID n°1257. 21p.
- 8) Jones T.G., Rakoto Ratsimba H., Ravaoarinorotsihoarana L., Cripps G. and Bey A. (2014). Ecological Variability and Carbon Stock Estimates of Mangrove Ecosystems in Northwestern Madagascar. *Forests* 2014, 5, 177-205; doi:10.3390/f5010177. ISSN 1999-4907.
- 9) Kiener A. (1972). Ecologie, Biologie et Possibilités de mise en valeur des mangroves malgaches. *Bulletin de Madagascar n°308*. Publication mensuelle du Service Général de l'Information. 49-84p.
- 10) Kiener A. (1966). Contribution à l'étude écologique et biologique des eaux saumâtres malgaches. *Vie et milieu* 16, 2c : 1013-1149.
- 11) Ministère de l'Eau, (2006). *Etude de faisabilité des forages manuels identification des zones potentiellement favorables*. Madagascar. 28p.
- 12) Rabinowitz P.D., Coffin M.F. and Falvey B. (1983). The separation of Madagascar and Africa. *Science*, 220 :67–69.

CARACTERISTIQUES NUTRITIONNELLES DES SOUS-PRODUITS DE CREVETTES DANS UNE SOCIETE DE MAHAJANGA

par

TSIALY Jean Louis⁽¹⁾, RANDRIAMAHATODY Zo⁽²⁾,
RASOLOMAMPIANINA Rado⁽³⁾, RAZAFIMAHEFA^(1, 4)

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

(2) Laboratoire d'Analyse et de Contrôle des Aliments et des Eaux, Centre National des Recherches sur l'Environnement, Tsimbazaza, Antananarivo

(3) Laboratoire de Microbiologie, Centre National des Recherches sur l'Environnement, Tsimbazaza, Antananarivo

(4) Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement, Université de Mahajanga, Madagascar

RESUME

Les sous-produits halieutiques font partie des déchets qui dominent quasiment dans toutes les villes avoisinant la mer comme la ville de Mahajanga. Ils peuvent créer des problèmes d'ordres socio-économique, environnemental. Cette étude a pour objectif principal de contribuer à la valorisation des sous-produits de crevette à Mahajanga. Elle a pour objectifs spécifiques d'identifier les différents types de sous-produits de crevette les plus abondants dans les Sociétés de la ville de Mahajanga et d'étudier leur valeur nutritionnelle. Pour ce faire, des enquêtes auprès des Responsables des usines de traitement des crevettes à Mahajanga ont été effectuées. Des collectes d'échantillons ont aussi été effectuées au niveau des sociétés concernées. Les teneurs en éléments nutritifs des échantillons ont été par la suite déterminées. Il s'agit des protéines, des lipides, de l'humidité et des cendres brutes. La ville de Mahajanga abrite les quatre sociétés SOGEDIPROMA, SOMAPECHE, PECHEXPORT et REFRIGEPECHE traitant des produits halieutiques en général et des crevettes en particulier. Cette étude aborde aussi les qualités nutritionnelles des sous-produits de crevette de la ville de Mahajanga, qui contiennent 70,55 % d'eau, 14,27 % de protéines, 3,49 % de lipides, 2,59 % de glucides, 9,09 % de cendres brutes renfermant des éléments minéraux et ils apportent 98,873 kcal/100g. Ces sous-produits halieutiques sont donc des sources de protéines et d'éléments minéraux. Ainsi, ils peuvent être valorisés en les utilisant pour fabriquer d'autres produits alimentaires de bonne qualité nutritionnelle.

Mots-clés : Crevette, Sous-produits de crevette, Caractéristique nutritionnelle

ABSTRACT

Fishery by-products are among the wastes that dominate almost all the cities bordering the sea like the city of Mahajanga. They can create socio-economic problems. The main objective of this study is to contribute to the valuation of shrimp by-products in Mahajanga. Its specific objectives are to identify the different types of shrimp by-products most abundant in the companies of the city of Mahajanga and to study their nutritional value. To do this, surveys were carried out among the managers of the shrimp processing plants in Mahajanga as well as sample collections at company levels. The nutrient contents of the samples were then determined. These are protein, fat, moisture, and crude ash. This study shows us that the city of Mahajanga hosts the four companies SOGEDIPROMA, SOMAPECHE, PECHEXPORT and REFRIGEPECHE dealing with fishery products in general and shrimp in particular. It also discusses the nutritional quality of shrimp by-products from the city of Mahajanga which contain 70.55% of water, 14.27% of protein, 3.49% of lipids, 2.59% of carbohydrates, 9.09 % of crude ash including mineral elements and they carry 98.873 kcal / 100g. These shrimp by-products are therefore sources of protein and mineral elements. Thus, they can be valued by using them to make other food products of good nutritional quality.

Key-words : Shrimp, Shrimp by-product, Nutritional characteristic

INTRODUCTION

Dans le monde entier, les produits halieutiques sont parmi les sources alimentaires importantes. Madagascar commercialise, environ, 17 000 tonnes/an au niveau du marché international (Paul, 2016). Les manipulations et les transformations des produits halieutiques produisent les sous-produits qui sont généralement jetés. D'après nos enquêtes, à Mahajanga, la production de crevettes représente 80 % de ressources crevettières de Madagascar. Les transformations industrielles, telles que l'étêtage, le décorticage, engendrent ainsi des sous-produits qui sont constitués de têtes, de queues, de carapaces et de viscères. En effet, les sous-produits constituent 35 à 45 % du poids total (Radisson, 2019). Ils restent un sérieux problème qui menace la santé publique et l'environnement. En général, ils sont enfouis dans le sol, soit jetés dans la nature selon les responsables de la société de la Ville de Mahajanga. Face à cette situation, l'Ecole Doctorale de Génie du Vivant et Modélisation de l'Université de Mahajanga en collaboration avec le Centre National de Recherches sur l'Environnement ont entrepris d'effectuer des recherches sur les « Caractéristiques nutritionnelles des sous-produits de crevette dans une Société de Mahajanga ». Cette étude a pour objectif principal de contribuer à la valorisation des sous-produits de crevettes. Elle a pour objectifs spécifiques

d'identifier les différents types de sous-produits de crevettes les plus abondants dans les Sociétés de la ville de Mahajanga et d'étudier leur valeur nutritionnelle.

MATERIELS ET METHODES

Materiels biologiques

Les carapaces et les têtes de crevettes de l'espèce *Penaeus indicus* sont les matériels biologiques utilisés durant cette étude. Ils ont été fournis par la société REFRIGEPECHE de la ville de Mahajanga. Ils sont issus de la pêche dans le canal de Mozambique.

Visites des sociétés

Durant cette étude, quatre sociétés ont été visitées afin d'effectuer des enquêtes pour connaître la situation des produits halieutiques traités. Ces Sociétés sont REFRIGEPECHE, SOMAPECHE, SOGEADIPROMA et PECHEXPORT.

Enquêtes auprès des responsables des sociétés

Des enquêtes, sous forme de discussions ont été effectuées auprès des responsables des sociétés. Les modes de traitement des produits, l'endroit pour jeter les sous-produits, les quantités des produits et des sous-produits par rapport aux produits traités sont les informations demandées aux responsables.

Collecte d'échantillons

Afin d'effectuer des analyses au laboratoire, des échantillons ont été collectés. Des carapaces et des têtes de crevettes générées au cours du traitement de crevette *Penaeus indicus*, provenant de la pêche dans le canal de Mozambique au niveau de la société REFRIGEPECHE ont été ainsi collectées. Un kilogramme (1 kg) de carapaces et un kilogramme de têtes de crevettes ont alors été collectées à l'état congelé et transportées dans une glacière jusqu'au laboratoire du Centre National des Recherches sur l'Environnement sis à Tsimbazaza Antananarivo. Elles ont été conservées dans un congélateur à -18 °C jusqu'à leur utilisation. Les échantillons ont été décongelés à +4 °C pendant une nuit avant les analyses.

Analyses biochimiques

Les taux de protéines ont été déterminés selon la méthode de Kjeldahl utilisée par (Crooke et Simpson, 1971). Une minéralisation à l'aide d'un excès d'acide sulfurique concentré et chaud, en présence d'un mélange de catalyseurs (K_2SO_4 et $CuSO_4$) a été effectuée. Après minéralisation, l'azote se trouve dans le minéralisât sous forme de $(NH_4)_2SO_4$. Les ions ammonium du minéralisât se trouvant dans un excès d'acide sulfurique ne peuvent pas être dosés directement. Les ions ammonium

du minéralisât ont donc été déplacés sous forme de NH_3 . Pour transformer les ions ammonium du minéralisât en ammoniac, on doit alcaliniser le minéralisât à l'aide d'une soude en excès. Pour isoler l'ammoniac, une distillation a été réalisée. Au cours de la distillation, le NH_3 se dégage sous forme de vapeurs qui ont été captées, condensées et recueillies pour le dosage de l'azote. Le distillat a été titré avec l'acide sulfurique goutte à goutte jusqu'à l'apparition de la couleur rose. Le résultat a été calculé par la formule ci-dessous.

$$\%Pr = \%N * 6,25$$

%N : azote total,

6,25 : Facteur de conversion de l'azote en protéines
(dans le cas de crevette, FC= 6,25)

Les matières grasses ont été dosées selon la méthode décrite par Wolff (1991). Le principe se base sur l'extraction des lipides contenus dans les échantillons à l'aide d'un solvant d'extraction (n-hexane). L'extraction est effectuée au moyen d'un appareil Soxhlet. La formule ci-dessous a été utilisée pour calculer la teneur en matières grasses :

$$\mathbf{MG\ (\%)} = \frac{M1-M0}{Me} * 100$$

MG (%): Matière grasse en pourcentage.

Me : Masse de l'échantillon en gramme ;

M0 : Masse du ballon vide en gramme ;

M1 : Masse du ballon et lipide analysé en gramme.

La teneur en cendres brutes a été déterminée selon la méthode employée par Malewiak et *al.* (1992). Les cendres brutes sont obtenues par destruction des matières organiques contenues dans les échantillons à 550 °C. La teneur est obtenue par l'équation suivante :

$$\mathbf{CB\ (\%)} = \frac{M1-M2}{Me} * 100$$

CB (%) : Cendres brutes en pourcentage ;

M1: Masse de la capsule vide en grammes ;

M2: Masse de la capsule avec son contenu après incinération en grammes ;

Me : Masse de l'échantillon en grammes.

Le dosage de la teneur en eau consiste à déterminer la quantité d'eau perdue par l'aliment pendant une dessiccation de 5 h à 103 °C dans une étuve. Le résultat est donné par la formule suivante :

$$\% \text{ H} = \frac{\text{M1-M2}}{\text{M1-M0}} * 100$$

M0 : Masse de capsule vide en grammes ;

M1 : Masse de la capsule avec son contenu en grammes ;

M2 : Masse de la capsule refroidie avec son contenu séché en grammes.

La teneur en glucides totaux a été déterminée par différence utilisant la formule suivante :

$$\% \text{ GT} = 100 - [\text{Pr} + \text{MG} + \text{CB} + \text{H}]$$

GT : glucides totaux ;

Pr : protéines ;

MG : matières grasses ;

CB : cendres brutes ;

H : humidité.

L'énergie est calculée à partir de la formule :

$$\text{E(BMF)} = (\% \text{ Pr} * 4) + (\% \text{ GT} * 4) + (\% \text{ MG} * 9)$$

E(BMF) : Energie à base matière fraîche ;

Pr : protéines ;

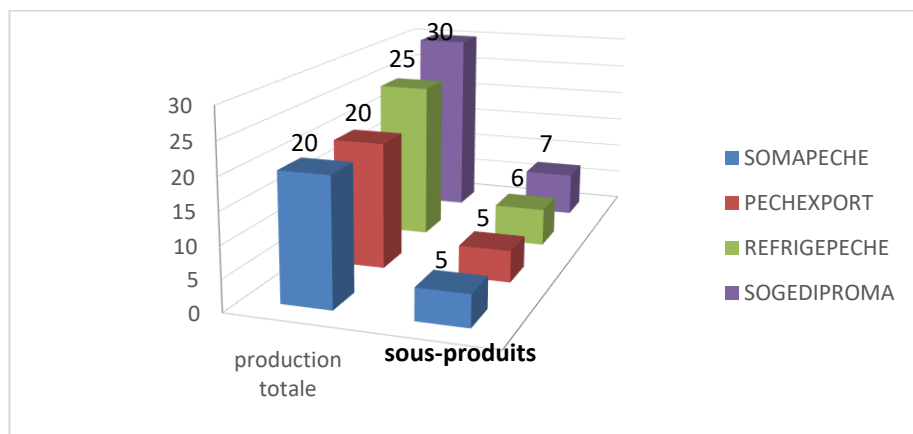
GT : glucides totaux ;

MG : matière grasse.

RESULTATS

Situation des sous-produits de crevettes dans les sociétés de la ville de Mahajanga

Durant les enquêtes auprès des responsables des sociétés de la ville de Mahajanga, les quantités de produits et de sous-produits des crevettes ont été évaluées en tonne par année (Figure 1).



Source : Enquête, 2019

Figure 1 : Produits de crevettes/sous-produits en tonnes par an dans la société de la ville de Mahajanga

Valeur nutritionnelle des carapaces de crevette

D'après l'analyse physico-chimique, la qualité nutritive des carapaces de crevettes est montrée dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Caractéristiques nutritionnelles de têtes et des carapaces des crevettes

Paramètres	Teneur de têtes de crevettes (moyenne en % $\pm$ ecartypes)	Teneur de carapaces de crevettes (moyenne en % $\pm$ écartypes)
Humidité	70,03 $\pm$ 0,25003	70,55 $\pm$ 0,5628
Cendres brutes	7,40 $\pm$ 0,3117	9,09 $\pm$ 0,03855
Lipides	1,59 $\pm$ 0,5515	3,49 $\pm$ 0,10905
Protéines	18,18 $\pm$ 0,8273	14,27 $\pm$ 0,6934
Glucides totaux	2,80	2,5
Valeur énergétique	84,27	98,87

DISCUSSION

Les sociétés de la ville de Mahajanga génèrent beaucoup de déchets halieutiques, parmi lesquels les carapaces et les têtes de crevettes prédominent avec un volume annuel de 5 tonnes pour SOMAPECHE, 5 tonnes pour PECHEEXPORT, 6 tonnes REFRIGEPECHE et 7 tonnes pour SOGEDIPROMA¹. Au cours des enquêtes, il a été constaté que la société REFRIGEPECHE possède plusieurs modes de traitement des crevettes par rapport aux autres sociétés. Cette société traite les crevettes par l'étêtage et par décorticage. C'est ce qui nous a amené à nous concentrer sur les sous-produits de cette société.

Les carapaces et les têtes de crevettes analysées durant cette étude contiennent respectivement 70,55 % et 70,03 % d'eau, 29,45 % et 29,97 % de matière sèche, 14,27 % et 18,18 % de protéines. Ces valeurs montrent que les sous-produits de crevettes sont riches en eau et sont une source de protéines. Ils sont donc périssables, mais utiles à l'organisme. Les carapaces de crevettes ont plus d'humidité et de protéines que les sous-produits de crabe, quand on les compare avec les résultats d'étude faite par Rakotoarisoa (2014). D'après cet auteur, les sous-produits de crabes présentent 63,53 g d'humidité et 12,92 g de protéines pour 100 g d'échantillon. Les carapaces de crevettes ont une teneur protéique proche des aliments riches en protéines comme les haricots qui en ont de 20,30 g pour 100 g de l'échantillon.

Les carapaces de crevettes et les têtes ont respectivement des valeurs énergétiques de 98,873 kcal/100 g et 84,27 kcal/100 g. Ces résultats nous indiquent que les carapaces et les têtes de crevettes apportent le tiers d'énergie besoins journalier d'une personne.

CONCLUSION

La ville de Mahajanga est caractérisée par la présence de quatre grandes sociétés. Seule REFRIGEPECHE traite les sous-produits de différentes manières. D'une manière générale, elles rencontrent toutes des problèmes de stockage de ces sous-produits. Elles sont parfois incinérées, parfois elles sont entreposées dans des endroits inadéquats. Des travaux de recherche ont été effectués sur le sujet, mais il manque les applications.

Les sous-produits halieutiques de la ville de Mahajanga, particulièrement les carapaces de crevettes et les têtes de crevettes de la société REFRIGEPECHE, ont une valeur nutritionnelle non négligeable. Ils sont considérés comme des aliments riches en protéines. Ils peuvent alors être utilisés pour fabriquer d'autres aliments (pour les êtres humains ou pour les animaux). D'autres études peuvent donc encore

¹ Selon les données obtenues auprès des responsables des sociétés de la ville de Mahajanga

être effectuées afin de savoir l'importance de ces sous-produits halieutiques dans le domaine de l'alimentation humaine. Nos perspectives sont ainsi axées sur la recherche concernant ces sous-produits dans le cadre du développement durable de notre pays et surtout au niveau mondial.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Crooke w. m., Simpson w. e. (1971). Determination of ammonium. In : *Kjeldhal digests of crops by an automated procedure, Journal of the Science of Food and Agriculture*, p.22.
- 2) Malewiak, M-I., Leynaud-Rouaud, C., Berthier A-M., Serville Y. (1992). Aliments et nutriments. In : *Alimentation et nutrition humaines, Dupin H., Cuq J-L., Malewiak*.
- 3) Paul. R. (2016) ; *Evaluation Technique Financière d'une valorisation agroalimentaire de coproduits issus des usines de transformation de la crevette nordique en Gaspésie*.
- 4) Rakotoarisoa T. (2014). In : *Caractéristiques biochimique et fonctionnelle des hydrolysats protéiques des co-produits de crabe (Scylla serrata) :-Composition biochimique des différentes fractions obtenues*, p. 52
- 5) Rasidison. J. J. (2019).- Contrôles effectuées pour le suivi de la qualité crevettes produites par les bateaux congélations destinées à l'exportation. Mémoire de Master2 en Physiologie Appliquée à la Nutrition Animale : Mahajanga : In : *Faculté des Sciences, de Technologie et de l'Environnement*, p. 1, 3.
- 6) Wolff J.P. (1991). Analyse et dosage des lipides. In : *Techniques d'Analyse et de Contrôle dans les Industrie Agroalimentaires, MULTON J.L., 2ème édition*, p.157-199.

ETUDE NUMERIQUE DE LA CONVECTION NATURELLE DANS UNE CAVITE A PAROI ONDULEE

par

DJAOMAZAVA Gwendoli⁽¹⁾, RANDRIAZANAMPARANY Michel Aimé⁽²⁾,
FANAMBINANTSOA Hasimamy Vanissa⁽¹⁾

(1) Ecole Doctorale Thématique Energies Renouvelables et Environnement, Université d'Antsiranana, Madagascar

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

RESUME

L'objet de ce travail de recherche est d'étudier numériquement le transfert thermique par convection naturelle dans une cavité fermée remplie d'air. Les deux parois verticales sont différentiellement chauffées tandis que les deux autres sont parfaitement isolées. La paroi chaude présente des ondulations sinusoïdales soumises à une température constante. La paroi froide, maintenue également à température constante, est plane. L'intérêt d'une telle étude réside dans son implication sur de nombreux problèmes pratiques tels que le refroidissement ou le chauffage de certains équipements industriels, le confort des bâtiments, l'exploitation et le stockage des énergies renouvelables. Le système est modélisé à l'aide des équations de la convection naturelle formulées en termes de vorticités et fonction de courant. La forme géométrique ondulée a conduit à procéder à une transformation homotopique des équations. Les équations ainsi obtenues sont résolues numériquement à l'aide d'une méthode aux différences finies explicites. A cet effet, un code de calcul en langage FORTRAN a été élaboré. Les simulations numériques sont faites pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh, ce qui revient à faire varier l'écart de température entre la paroi chaude et la paroi froide, et pour différentes caractéristiques géométriques des ondulations. Les résultats obtenus montrent que, la structure de l'écoulement et le transfert de chaleur en son sein sont fortement influencés par le nombre de Rayleigh ainsi que par l'amplitude et la période des ondulations. La convection naturelle devient le mode de transfert dominant à partir d'une valeur du nombre de Rayleigh de l'ordre de 10^5 .

Mots-clés : Cavité, Convection naturelle, Différences finies explicites, Protubérances sinusoïdales

ABSTRACT

The object of this research work is to numerically study the heat transfer by natural convection in a closed cavity filled with air. The two vertical walls are differentially heated while the other two are perfectly insulated. The hot wall has sinusoidal undulations subjected to a constant temperature. The cold wall, also maintained at constant temperature, is flat. The interest of such a study lies in its implication on many practical problems such as the cooling or the heating of certain industrial equipment, the comfort of buildings, the exploitation and the storage of renewable energies. The system is modeled using natural convection equations formulated in terms of vorticity and current function. The undulating geometric shape led to a homotopic transformation of the equations. The resulting equations are solved numerically using an explicit finite difference method. For this purpose, a FORTRAN language calculation code has been developed. Numerical simulations are made for different values of the Rayleigh number, which amounts to varying the temperature difference between the hot wall and the cold wall, and for different geometric characteristics of the corrugations. The results obtained show that the structure of the flow and the heat transfer within it are strongly influenced by the Rayleigh number as well as by the amplitude and the period of the ripples. Natural convection becomes the dominant transfer mode from a Rayleigh number value of 10^5 .

Key-words : Cavity, Explicit finite difference, Natural convection, Sinusoidal protuberances

INTRODUCTION

Plusieurs solutions au problème de la convection naturelle laminaire régulière dans une cavité carrée fermée avec des parois d'extrémité différentiellement chauffées ont été largement rapportées dans la littérature. Ces dernières années, ce phénomène a fait l'objet de nombreux travaux théoriques et expérimentaux, en raison de son importance dans des domaines très variés. Parmi les premières études recensées, peuvent être citées les travaux de (Wilkes J.O., 1966) qui ont fait l'objet de l'une des premières tentatives réussies pour résoudre numériquement les équations différentielles complètement bidimensionnelles dépendant du temps décrivant l'écoulement, en utilisant une méthode implicite des différences finies aux directions alternées (ADI). Grâce au développement des algorithmes de résolution et l'amélioration des puissances de calcul des ordinateurs, (Vahl Davis G. De, 1983) a proposé une solution standard pour le cas de la cavité carrée différentiellement chauffée en régime laminaire. La formulation du problème utilisée par l'auteur est la formulation fonction de courant-vorticité. Les équations modifiées par l'interaction

d'un terme transitoire ont été discrétisées par la méthode des différences finies. Le système d'équations algébriques résultant de l'opération de discrétisation a été résolu par l'algorithme ADI. Par ailleurs, (Nicolette V. F., 1985) a effectué une étude numérique et expérimentale de la convection naturelle transitoire bidimensionnelle d'un fluide monophasé dans une enceinte carrée de paroi verticale soudainement refroidie et avec trois autres parois isolées. Un schéma de différenciation au vent (upwind scheme) semi-implicite entièrement transitoire avec une correction de pression globale pour la simulation numérique a été utilisé. (Mohamad A. A., 1991), quant à lui, étudié la convection naturelle transitoire de fluides à faible nombre de Prandtl dans une cavité chauffée différentiellement en utilisant la méthode des volumes finis avec un maillage en grilles décalées. Suivent les travaux de (Lage J. L., 1991) qui a résolu numériquement, à l'aide de la méthode de Patankar (volumes finis), le problème de convection naturelle dans une cavité dont les deux parois horizontales sont adiabatiques et les deux autres chauffées différentiellement.

Les travaux de (Babu V., 2006) ont fait une simulation numérique de la convection naturelle, dans une cavité carrée remplie d'air et différentiellement chauffée avec une forte valeur du nombre de Rayleigh à l'aide de la méthode de Lattice Boltzmann sur réseau thermique basée sur le modèle BGK. Ceux de (Gresho P. M., 1979) ont été les premiers à appliquer les méthodes des éléments finis pour la résolution des équations incompressibles de Navier-Stokes et Boussinesq dépendant du temps, en utilisant les variables primitives « vitesse, pression et température » et une intégration temporelle totalement implicite. Enfin, (Chorin A. J., 1968) a développé une étude numérique de la convection naturelle dans une cavité différemment chauffée à l'origine dans le contexte des différences finies. Cette méthode est un schéma purement explicite et nécessite moins de temps d'exécution et de stockage. La présente étude, fait, quant à elle, l'évaluation numérique des ondulations sinusoïdales sur la convection naturelle dans une enceinte fermée. Il est aussi analysé l'influence du facteur de forme b des ondulations, de la température et la composante verticale de la vitesse appliquées à la ligne médiane de l'enceinte avec un rapport de forme $A = 1$.

MATERIELS ET METHODES

Une cavité fermée remplie d'air ($Pr = 0,71$) a été considérée. Les deux parois verticales AD (ondulée) et BC (plane) ont été soumises respectivement à une température constante T_c et T_f .

L'apport de chaleur par les protubérances à l'air situé en son voisinage engendre une convection naturelle dans l'espace délimité par les parois. L'étude s'est alors

focalisée sur l'influence des ondulations sinusoïdales au niveau de la convection naturelle. La Figure 1 représente le modèle physique du système.

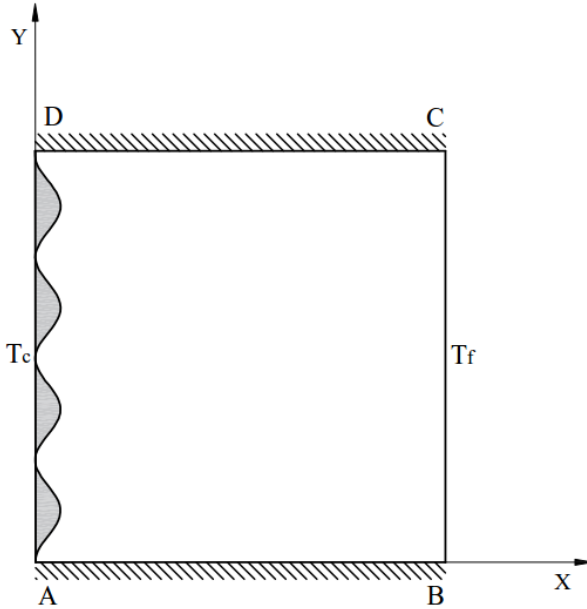


Figure 1 : Cavité à paroi ondul   

L'écoulement de la convection naturelle est supposé laminaire au sein de la cavité. Il est régi par les équations de conservation de masse, de la quantité de mouvement et de l'énergie calorifique. Nous adoptons alors les hypothèses simplificatrices suivantes : les propriétés du fluide sont constantes à l'exception de la masse volumique dans le terme de la poussée, qui induit les forces de gravité dont les variations obéissent à l'approximation de Boussinesq. La dissipation visqueuse est négligeable dans l'équation de l'énergie. Le fluide considéré est supposé newtonien et incompressible. Les échanges par rayonnement sont négligeables entre les parois. L'air est supposé être un gaz parfait. En prenant la longueur de la cavité L comme longueur caractéristique. Tenant compte de ces hypothèses, les équations adimensionnelles avec la formulation fonction de courant-vorticité s'écrivent comme suit :

$$\begin{aligned}
 t^+ &= \frac{t\alpha}{L^2}; X^+ = \frac{X}{L}; Y^+ = \frac{Y}{L}; U^+ = \frac{UL}{\alpha}; V^+ = \frac{VL}{\alpha}; T^+ = \frac{T-T_f}{T_c-T_f}; \Psi^+ = \frac{\Psi}{\alpha}; \Omega^+ = \frac{\Omega L^2}{\alpha}; \\
 P_m^+ &= \frac{PL^2}{\rho\alpha^2}; S^+(Y) = \frac{S(Y)}{L}; Ra = \frac{g\beta(T_c-T_f)L^3}{\nu k}; Pr = \frac{\nu}{\alpha}
 \end{aligned} \tag{1}$$

Toutefois, il sera difficile d'effectuer le maillage sur la base de ces coordonnées cartésiennes (X, Y) car des nœuds vont se situer à l'extérieur du domaine en raison de la courbure de la paroi sinusoïdale. Pour contourner ce problème, on procède à une transformation homotopique des équations en utilisant de nouvelles variables spatiales (ξ, η) dites coordonnées homotopiques.

Il est ainsi donné au domaine d'étude une forme rectangulaire virtuelle. Les coordonnées homotopiques sont définies comme suit :

$$\begin{cases} \xi = \frac{X}{S(Y)} \\ \eta = Y \end{cases} \quad (2)$$

Où $S(Y)$ est le profil dimensionnel des protubérances, défini par :

$$S(Y) = L - \frac{b}{2} \left[1 - \frac{\cos 2\pi}{P} \cdot (Y - Y_1) \right] \quad (3)$$

Moyennant ces transformations, les équations de transfert et les conditions aux limites sont réécrites dans le système de coordonnées homotopiques. L'exposant (+) sur les grandeurs adimensionnelles est omis pour alléger les notations sur les équations qui, dorénavant, sont toutes adimensionnelles.

Compte tenu des hypothèses simplificatrices formulées et de la transformation des coordonnées, les équations adimensionnelles s'écrivent comme suit :

- Equation de la chaleur

$$\frac{\partial T}{\partial t} + U \left(\xi_x \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) + V \left(\xi_y \frac{\partial T}{\partial \xi} + \frac{\partial T}{\partial \eta} \right) = \frac{\partial^2 T}{\partial \eta^2} + 2\xi_y \frac{\partial^2 T}{\partial \eta \partial \xi} + (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial^2 T}{\partial \xi^2} + (\xi_{xx} + \xi_{yy}) \frac{\partial T}{\partial \xi} \quad (4)$$

- Equation de la vorticité

$$\begin{aligned} \frac{\partial \Omega}{\partial t} + U \left(\xi_x \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} \right) + V \left(\xi_y \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} + \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} \right) = Pr \left[\frac{\partial^2 \Omega}{\partial \eta^2} + 2\xi_y \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \eta \partial \xi} + (\xi_x^2 + \xi_y^2) \frac{\partial^2 \Omega}{\partial \xi^2} + (\xi_{xx} + \xi_{yy}) \frac{\partial \Omega}{\partial \xi} \right] \\ + Ra Pr \left(\xi_x \frac{\partial T}{\partial \xi} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

- Equation de la fonction de courant

$$-\Omega = \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \eta^2} + 2\xi_Y \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \eta \partial \xi} + (\xi_{XX} + \xi_{YY}) \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} + (\xi_X^2 + \xi_Y^2) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2} \quad (6)$$

- Composantes de la vitesse (Djaomazava G., 2019)

$$U = \xi_Y \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} + \frac{\partial \Psi}{\partial \eta} \quad \text{et} \quad V = -\xi_X \frac{\partial \Psi}{\partial \xi} \quad (7)$$

avec,

$$\eta_Y = 1 \quad (8)$$

$$\eta_X = \eta_{YY} = \xi_{XX} = 0 \quad (9)$$

$$\xi_X = \frac{1}{S(Y)} \quad (10)$$

$$\xi_Y = -\frac{XS'(Y)}{S^2(Y)} \quad (11)$$

$$\xi_{YY} = X \left(\frac{2S'^2(Y) - S''(Y)S'(Y)}{S^3(Y)} \right) \quad (12)$$

Conditions initiales :

A l'instant $t = 0$, le fluide est au repos et tout le système est à la même température T_0 .

$$T = 0; U = 0; V = 0; \Omega = 0 \quad \text{et} \quad \Psi = 0 \quad \forall \xi \text{ et } \eta \quad (13)$$

Conditions aux limites :

A l'instant $t > 0$, on applique aux parois de la cavité les conditions suivantes :

- sur la paroi froide BC :

$$U = 0, V = 0, \Psi = 0, T_f = 0 \quad \text{et} \quad \Omega = -(\xi_X^2 + \xi_Y^2) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2} \quad (14)$$

- sur la paroi chaude AD :

$$U = 0, V = 0, \Psi = 0, T_c = 1 \quad \text{et} \quad \Omega = -(\xi_X^2 + \xi_Y^2) \frac{\partial^2 \Psi}{\partial \xi^2} \quad (15)$$

- sur les deux parois adiabatiques AB et DC :

$$U = 0, V = 0, \Psi = 0, \frac{\partial T}{\partial \eta} = 0 \quad \text{et} \quad \Omega = -\frac{\partial^2 \Psi}{\partial \eta^2} \quad (16)$$

Les équations de conservation décrivant l'écoulement et le transfert thermique sont résolues en approchant les dérivées partielles par des différences finies explicites. Les dérivées temporelles sont approchées par une différence finie du premier ordre entre les instants $t - \Delta t$ et t (Δt étant le pas de temps). L'équation (6) donnant la fonction de courant est résolue par une méthode itérative. Un coefficient de sur relaxation est utilisé pour accélérer la convergence. Cette convergence est atteinte lorsque le test suivant est vérifié à chaque pas de temps (Djaomazava G., 2019) :

$$\left| \frac{\Psi(i, j) - \Psi^{sup}(i, j)}{\Psi(i, j)} \right| \leq 10^{-6} \quad (17)$$

Nous avons retenu le maillage 100×100 pour produire les résultats présentés dans ce manuscrit, car plus le maillage est fin, plus le temps de calcul est long.

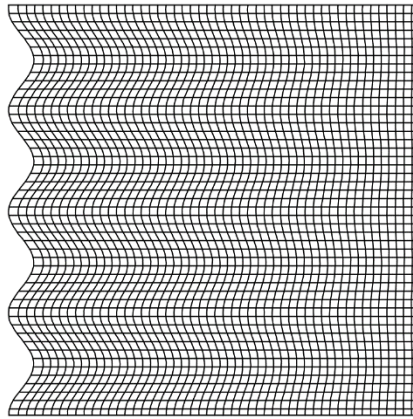


Figure 2 : Grille de maillage mis en œuvre dans le domaine de calcul

RESULTATS

Des résultats numériques ont été obtenus du problème évoqué ci-dessus par rapport à la plage de nombres de Rayleigh de 10^3 à 10^6 et sont présentés sous forme de lignes de courant, d'isothermes et de courbes représentant les profils de température et de vitesse. Les simulations sont menées comme ce qui suit.

Nombre d'ondulation fixé à 4, nombre de Rayleigh fixé à 10^6 et amplitude des ondulations variant de 0 à 0,075

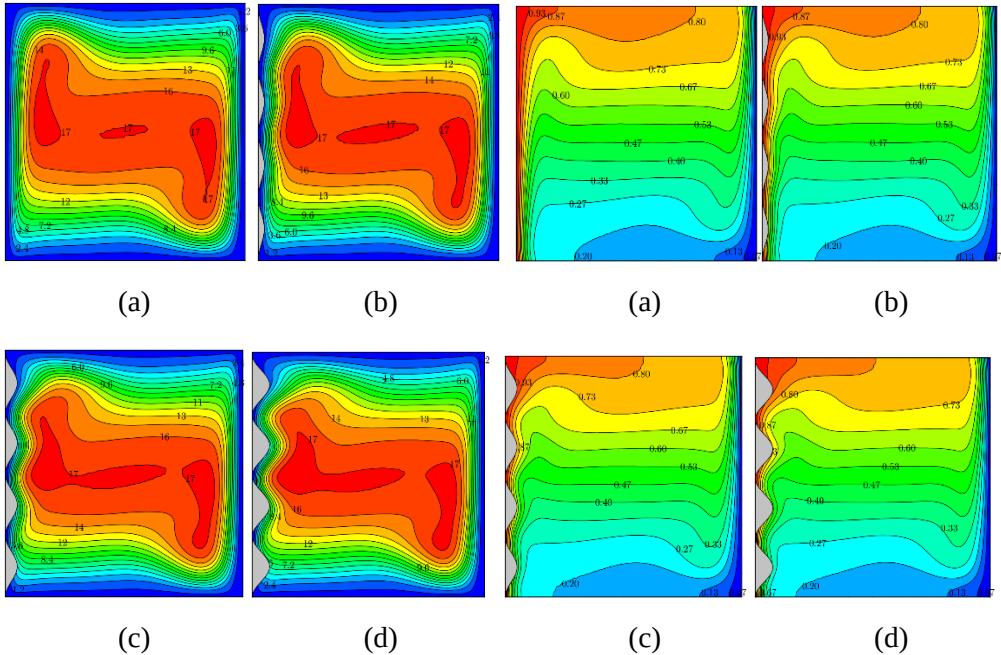


Figure 3 : Lignes de courant pour $Ra = 10^6$
 $Pr = 0,71$

(a) $b = 0$; (b) $b = 0,025$
(c) $b = 0,050$; (d) $b = 0,075$

Figure 4 : Isotherme pour $Ra = 10^6$
 $Pr = 0,71$

(a) $b = 0$; (b) $b = 0,025$
(c) $b = 0,050$; (d) $b = 0,075$

Les Figures 3 et 4 représentent les résultats de la simulation numérique sous formes de lignes de courant et d'isothermes dans la cavité à paroi ondulée avec un nombre de Rayleigh fixé à 10^6 et le nombre d'ondulations fixé à quatre (4).

La configuration de la cavité avec ondulations a une influence majeure sur la structure de l'écoulement et le transfert de chaleur. Pour une cavité à paroi ondulée avec un nombre de Rayleigh fixé à 10^6 , le nombre d'ondulations fixé à quatre (4), il a été constaté que les lignes de courant perdent subitement leurs symétries au fur et à mesure qu'augmente l'amplitude b des ondulations. Le mode convectif est dominant au niveau des isothermes pour tous les différents cas.

Amplitude fixé à 0,05, nombre de Rayleigh variant de 10^5 à 10^6 et nombre d'ondulations variant de 2 à 6

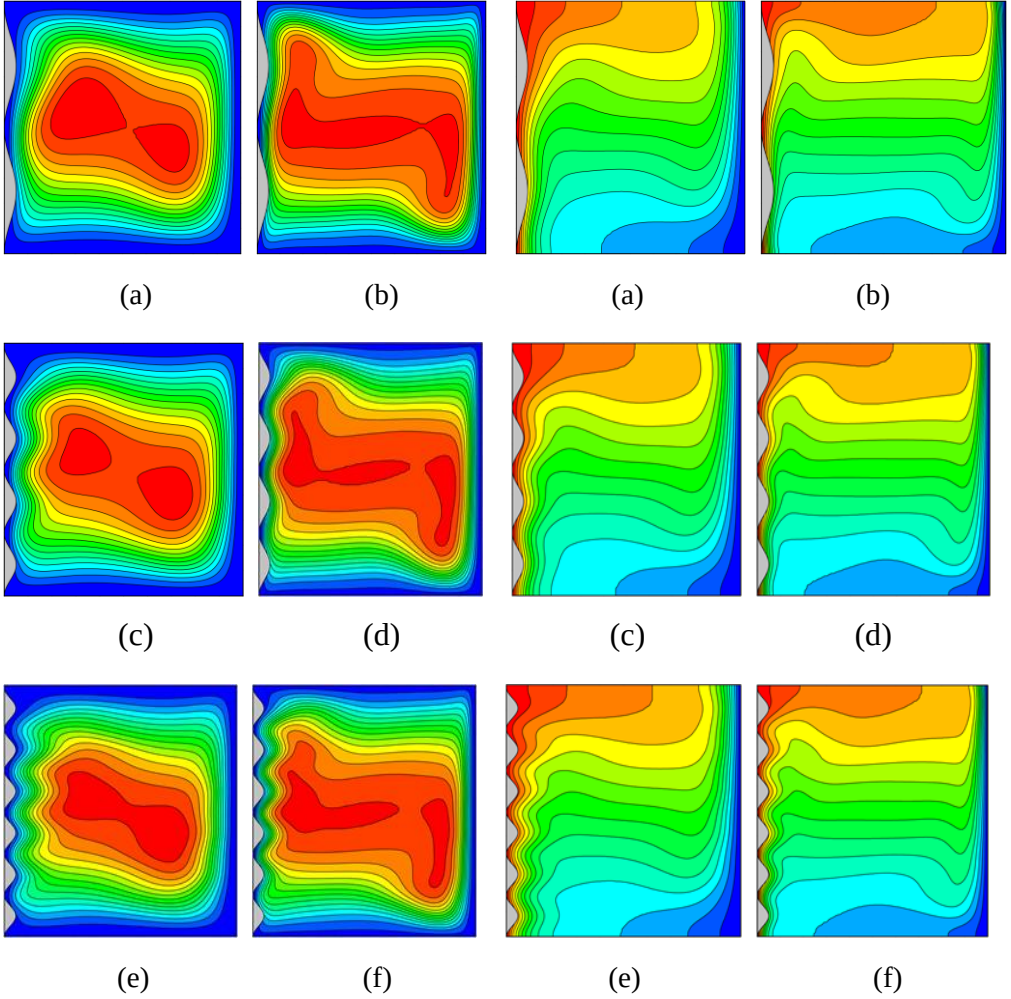


Figure 5 : Lignes de courant pour $b = 0,05$
 $Pr = 0,71$

Figure 6 : Isotherme pour $b = 0,05$
 $Pr = 0,71$

(a) $n = 2$, $Ra = 10^5$; (b) $n = 2$, $Ra = 10^6$
(c) $n = 4$, $Ra = 10^5$; (d) $n = 4$, $Ra = 10^6$
(e) $n = 6$, $Ra = 10^5$; (f) $n = 6$, $Ra = 10^6$

(a) $n = 2$, $Ra = 10^5$; (b) $n = 2$, $Ra = 10^6$
(c) $n = 4$, $Ra = 10^5$; (d) $n = 4$, $Ra = 10^6$
(e) $n = 6$, $Ra = 10^5$; (f) $n = 6$, $Ra = 10^6$

Les Figures 5 et 6 illustrent les lignes de courant et les isothermes pour un nombre de Rayleigh variant de 10^5 à 10^6 , le nombre d'ondulations n varie de deux (2) à six (6) et la hauteur b est fixée à 0,05.

Pour un nombre de Rayleigh variant de 10^5 à 10^6 , le nombre d'ondulations n varie de deux (2) à six (6) et la hauteur b est fixée à 0,05. Les lignes de courants proches des deux parois latérales sont très serrées pour toutes les configurations, ce phénomène peut être observé dans tous les cas précédents. Cela indique que l'écoulement est accéléré dans ces zones. La déformation des isothermes dans le haut de la cavité ondulée est observée à partir de $Ra = 10^5$ donc le transfert thermique est essentiellement à la convection naturelle. Il est également noté que l'augmentation du nombre d'ondulations et le nombre de Rayleigh entraîne une forte augmentation de déformation des isothermes qui est de plus en plus visible.

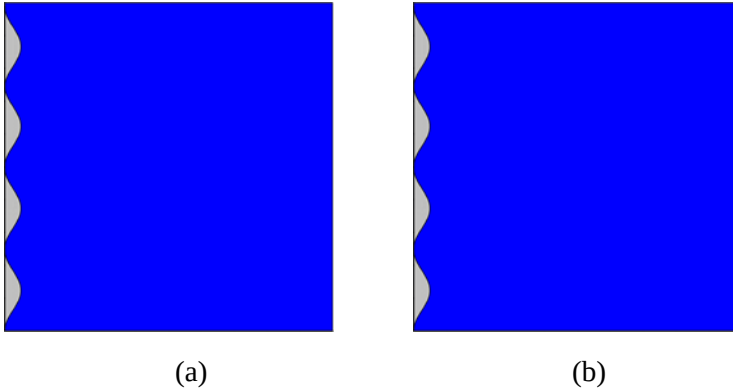


Figure 7 : Isotherme (a) et lignes de courant (b) de l'instant $t = 0$ à $t = t_{\max}$, pour $Ra = 106$, $Pr = 0,71$ et $b = 0,050$

La Figure 7 montre les évolutions du fluide en mouvement à l'intérieur de la cavité à paroi ondulée avec un nombre de Rayleigh fixé à 10^6 et le nombre d'ondulations fixé à quatre (4).

Les résultats numériques montrent que les isothermes prennent place dans tout le volume de la cavité dans la mesure où les particules d'air chauffées s'élèvent et les particules refroidies s'écoulent le long de la paroi à droite. La présence d'ondulations a une influence majeure sur la structure de l'écoulement et le transfert de chaleur.

Profils de température le long de la ligne médiane horizontale pour une amplitude fixée à 0, 05, un nombre de Rayleigh variant de 10^5 à 10^6 et un nombre d'ondulations variant de 2 à 6

La Figure 8 montre les profils de température le long de la ligne médiane de la cavité une même valeur de $t_{\max}$ pour différents nombres de Rayleigh et pour trois valeurs différentes au niveau des ondulations. Le transfert de chaleur se fait principalement par conduction et la chaleur passe de l'autre côté de la cavité

principalement par diffusion. Initialement, en raison du grand gradient de température près de la paroi, la température s'élève soudainement.

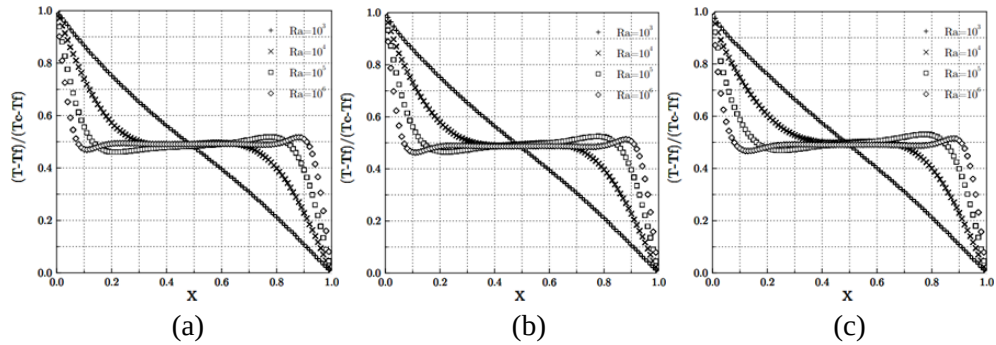


Figure 8 : Comparaison de l'évolution de la température le long de la ligne médiane de la cavité avec $Ra = 10^3$, $Ra = 10^4$, $Ra = 10^5$ et $Ra = 10^6$,
(a) $n = 2$, (b) $n = 4$, (c) $n = 6$

Profils de la composante verticale de la vitesse le long de la ligne médiane horizontale dont l'amplitude est fixée à 0,05, le nombre de Rayleigh variant de 10^5 à 10^6 et le nombre d'ondulations variant de 2 à 6

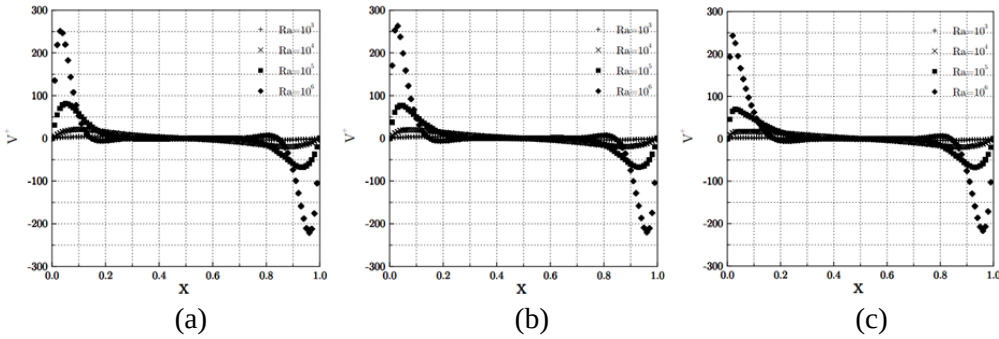


Figure 9 : Comparaison de la composante verticale de la vitesse le long de la ligne médiane de la cavité $Ra = 10^3$, $Ra = 10^4$, $Ra = 10^5$ et $Ra = 10^6$,
(a) $n = 2$, (b) $n = 4$, (c) $n = 6$

La Figure 9 présente les résultats de la comparaison des profils de la composante verticale de la vitesse le long de la ligne médiane de la cavité pour un nombre d'ondulations n variant de deux (2) à six (6) et un nombre de Rayleigh variant de 10^3 à 10^6 .

Pour $Ra = 10^3$, la convection est très faible et la vitesse verticale du fluide près de la paroi, où il y a une action de transfert, a une très petite valeur. La conduction continue à prédominer et la distribution à l'état d'équilibre est similaire à celle de la conduction pure. Au fur et à mesure que le nombre de Rayleigh augmente, la

convection devient plus intense. Pour $Ra = 10^4$, la conduction et la convection semblent être également significatives, et le profil de température se déplace progressivement vers le profil d'état stationnaire. Pour $Ra = 10^5$ et $Ra = 10^6$, la convection entre en jeu assez rapidement. Près de la paroi, il y a une augmentation rapide de la valeur de la vitesse verticale.

Profils de température et de la composante verticale de la vitesse le long de la ligne médiane horizontale pour un nombre de Rayleigh fixé à 10^6 , un nombre d'ondulations fixé à 4 et une amplitude variant de 0 à 0,075

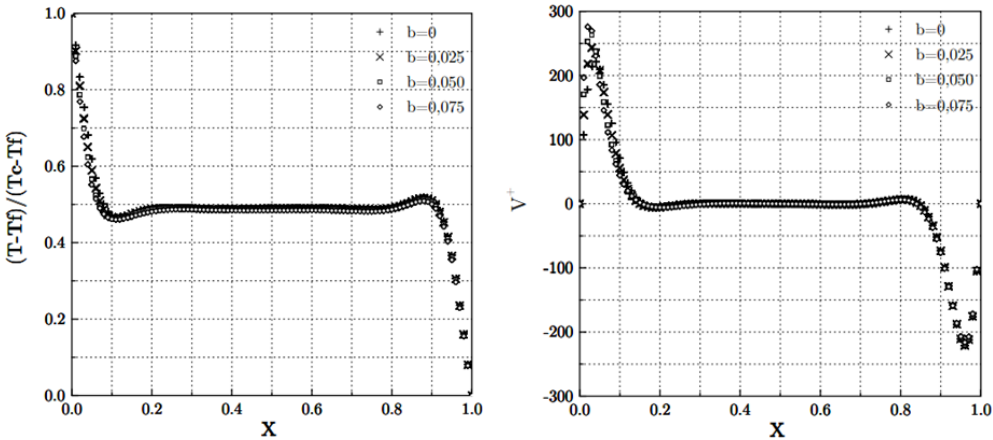


Figure 10 : Comparaison de l'évolution : (a) la température, (b) la composante verticale de la vitesse le long de la ligne médiane de la cavité pour différentes valeurs du rapport de forme b des ondulations, $Ra = 10^6$ et $n = 4$

La figure 10 illustre les profils de la température et de la composante verticale de la vitesse le long de la ligne médiane de la cavité pour différentes hauteurs d'ondulations. Le nombre de Rayleigh est fixé à 10^6 avec une période de quatre ondulations.

Il a été remarqué que les allures des vitesses et des températures ont presque la même progression au niveau de la paroi chaude sur les profils de la température et de la composante verticale de la vitesse le long de la ligne médiane de la cavité, mais visualisé de plus près, un petit écart de valeur y est noté. Ces vitesses interviennent sur une épaisseur plus importante dans le cas où la hauteur b s'élève à 0,075.

Variations en fonction du temps de la température moyenne à l'intérieur et juste au milieu des protubérances pour un nombre de Rayleigh fixé à 10^6

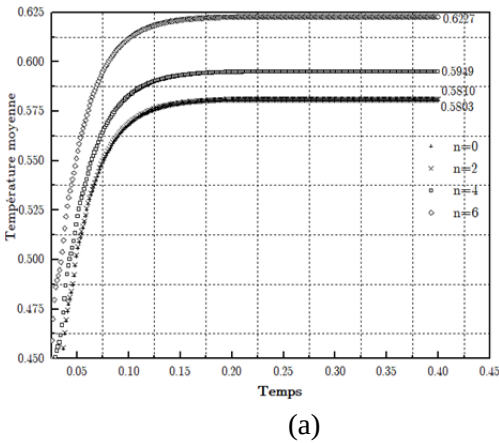


Figure 11 : Evolution de la température moyenne à l'intérieur et au centre de la cavité pour $Ra = 10^6$, $b = 0,05$

(a) Différentes valeurs du nombre d'ondulation n .

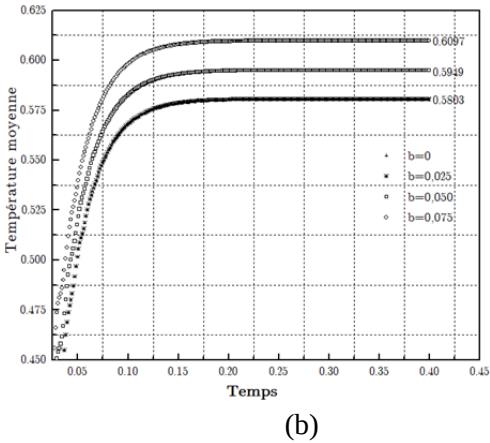


Figure 12 : Evolution de la température moyenne à l'intérieur et au centre de la cavité pour $Ra = 10^6$, $n = 4$

(b) Différentes valeurs de la hauteur d'ondulation b

Les figures 11 et 12 montrent l'évolution de la température moyenne à l'intérieur et juste au centre de la cavité pour $Ra = 10^6$, et ce, avec une variation du nombre n et la hauteur b des ondulations. Les courbes qui portent sur l'évolution de la température moyenne à l'intérieur et au centre de la cavité sont tracées pour permettre de voir l'efficacité de la surface d'échange d'un point de vue thermique. Dans le cas où l'on fixe $b = 0,05$ et $Ra = 10^6$, au fur et à mesure que le nombre n d'ondulations augmente, la température moyenne sur la partie chaude augmente. Il en est de même pour le cas où l'on fixe $n = 4$ et $Ra = 10^6$, on a constaté que l'élévation de la hauteur b des ondulations entraîne une augmentation de la température moyenne.

DISCUSSION

Pour s'assurer de la validité du code de calcul adopté, les résultats ont été comparés à ceux de (Vahl Davis G. De, 1983) et (Babu V., 2006). La validation des résultats de Vahl Davis est illustrée par les lignes de courants et isothermes des figures 13 à 16 ci-après.

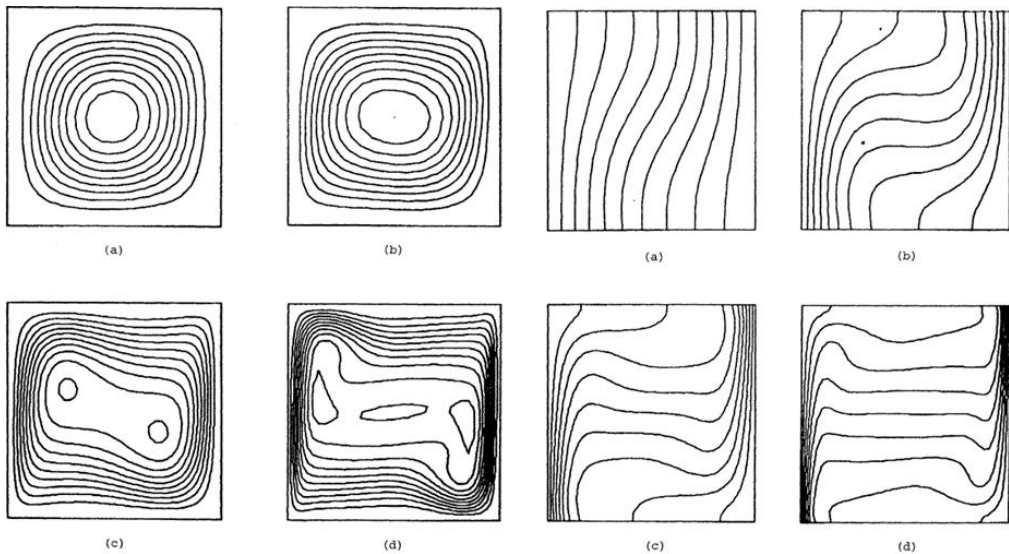


Figure 13 : Lignes de courants :

(Vahl Davis G. De, 1983)

(a) Ra = 10³, (b) Ra = 10⁴

(c) Ra = 10⁵, (d) Ra = 10⁶

Figure 14 : Isothermes :

(Vahl Davis G. De, 1983)

(a) Ra = 10³, (b) Ra = 10⁴

(c) Ra = 10⁵, (d) Ra = 10⁶

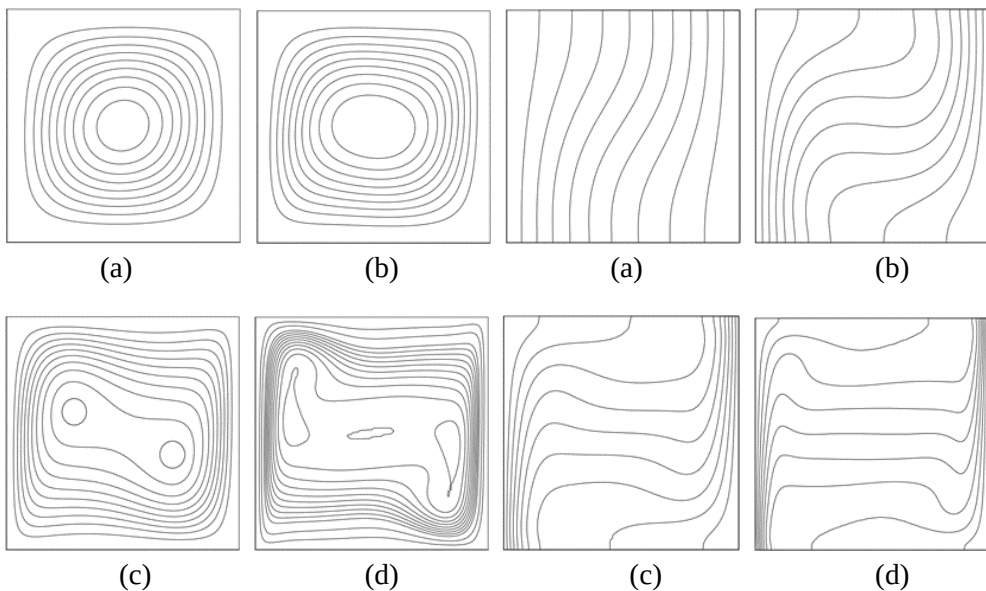


Figure 15 : Lignes de courants :

Présent travail

(a) Ra = 10³, (b) Ra = 10⁴

(c) Ra = 10⁵, (d) Ra = 10⁶

Figure 16 : Isothermes :

Présent travail

(a) Ra = 10³, (b) Ra = 10⁴

(c) Ra = 10⁵, (d) Ra = 10⁶

En ce qui concerne les différentes valeurs du nombre de Rayleigh, il y a une bonne concordance entre nos résultats et ceux de (Vahl Davis G. De, 1983). En effet, pour chaque cas, le code de calcul donne une structure de l'écoulement, illustrée par les lignes de courants, et une répartition de température, illustrée par les isothermes, identiques à celles obtenues par l'auteur cité en référence. Il peut donc être affirmé que le code est fiable.

La Figure 17 illustre les comparaisons des résultats obtenus avec ceux de (Babu V., 2006). Ces comparaisons sont faites sur les profils de température le long de la ligne médiane horizontale, pour différentes valeurs du nombre de Rayleigh.

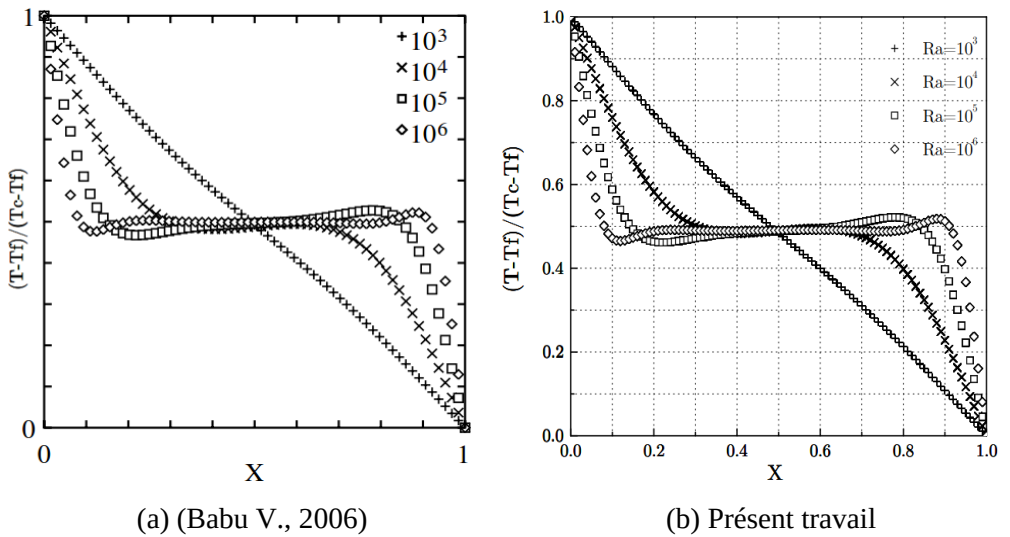


Figure 17 : Evolution de la température le long de la ligne médiane de la cavité pour $Ra = 10^3$, $Ra = 10^4$, $Ra = 10^5$ et $Ra = 10^6$

Il peut également être dit qu'ici aussi, les résultats s'accordent avec ceux de (Babu V., 2006). En effet les courbes représentées sont pratiquement identiques quelle que soit la valeur du nombre de Rayleigh.

CONCLUSION

Dans le cadre de ce travail, une simulation numérique bidimensionnelle des écoulements de la convection naturelle dans une cavité fermée à paroi ondulée différentiellement chauffée a été réalisée. Le modèle mathématique décrivant le présent problème a été développé en se basant sur les équations formulées en termes de vorticité et fonction de courant. Le système d'équations qui régit le phénomène de la convection naturelle a été résolu numériquement grâce à un code de calcul basé sur la méthode des différences finies explicites en Fortran. Le modèle élaboré a

permis de déterminer les lignes de courant, les vitesses, et les profils de température. La forme géométrique sinusoïdale de l'une des parois de la cavité ont conduit à procéder à une transformation homotopique des équations.

L'influence de certains paramètres comme le nombre de Rayleigh en variant l'écart de température entre les deux parois latérales isothermes, le nombre et l'amplitude des ondulations au niveau de la paroi chaude, sur la structure de l'écoulement et la répartition de température au sein de la cavité ont été mis en évidence.

D'après l'ensemble des résultats numériques obtenus, on peut conclure que : le nombre de Rayleigh, avec une forte augmentation des surfaces d'échange, a une grande influence sur le mode de transfert de chaleur dominant dans la cavité surtout pour le nombre $Ra = 10^5$ où commence le mouvement convectif et pour $Ra = 10^6$ où la convection est dominante. Donc l'échange de chaleur dans la cavité augmente avec l'augmentation de Ra avec plusieurs ondulations de la paroi.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Babu, V. and Dixit, H. N. (2006), Simulation of high Rayleigh number natural convection in a square cavity using the lattice Boltzmann method, *In. Journal of Heat and Mass Transfer*, 727–739.
- 2) Chorin, A. J. (1968), Numerical solution of Navier-Stokes equation, *Math. Comput.*, 745 -762.
- 3) Djaomazava, G., Randrianampanany, M. A. and Rakotomanga, F. D. (2019), Numerical study of natural convection in a vertical channel, one of whose walls has sinusoidal protuberances, *In. Journal of Hydraulic Engineering*, 1-6.
- 4) Godbane, N., Benserai, Y., Ouahlent, F. et Soudani, A. (2019), Simulation numérique de la convection naturelle bidimensionnelle dans une cavité carrée différentiellement chauffée remplie d'air, *Revue des Energies Renouvelables*, 217 – 226.
- 5) Gresho, P. M., Lee, R. L. and Chan, S. T. (1979), Solution of the time dependent incompressible Navier-Stokes and Boussinesq equations using the Galerkin finite element method, *Proc. of IUTAM symp. on approximation methods for Navier-Stokes problems*, 203 – 222.
- 6) Jones, I. P. and Thomson, C. P. (eds) (1981), *Numerical solutions for a comparison problem on natural convection in an enclosed cavity*, AERE – R9955, HMSO.

- 7) Lage, J. L. and . Bejan, A (1991), The Ra-Pr domain of laminar natural convection in an enclosure heated from the side, *Numer.heat.transfer, Part A*, 21-41.
- 8) Mohamad, A. A. and Viskanta, R. (1991), Transient natural convection of low-Prandtl number fluids in a differentially heated cavity, *In : Journal. numerical. Methods in fluids*, 61-81.
- 9) Nicolette, V. F., Yang, K. T.and Lieyd, J. R. (1985), Transient cooling by natural convection in a two – dimensional square enclosure, *In. Heath. Mass. Transfer*, 1721-1723.
- 10) Vahl Davis, G. De (1981), *Natural convection of air in a square cavity: an accurate numerical solution*, Univ.of N.S.W. School of Mech. And. Indust. Eng, Report 1981/ FMT/1.
- 11) Vahl Davis, G. De (1983), Natural convection of air in a square cavity : a benchmark numerical solution, *Univ.of. N.S.W, kensington 2033, Australia*, *In. Journal.numerical. methods in fluids*, 249 – 264.
- 12) Wilkes, J. O. and Churchill, S .W. (1966), The finite- difference computation of natural convection in a rectangular enclosure, *AIChE J*, 161-166

COMPARAISON DES METHODES NUMERIQUES DES EQUATIONS DE SAINT VENANT (ESV) : APPLICATION SUR UN TRONÇON DU FLEUVE SAMBIRANO

par

**RANDRIAMPARANY Mamisoa⁽¹⁾, RATSARAMODY Justin⁽²⁾,
RANDRIAZANAMPARANY Michel Aimé⁽¹⁾**

(1) Ecole Doctorale Thématique Energies Renouvelables et Environnement, Laboratoire de Fluides pour les énergies renouvelables, Université d'Antsiranana, Madagascar

(2) Ecole Supérieure Polytechnique, Laboratoire d'hydraulique, Université d'Antsiranana, Madagascar

RESUME

Les inondations sont des catastrophes naturelles des plus dévastatrices dans le monde. La connaissance et la maîtrise de ces phénomènes permettent aux scientifiques de guider et d'aider les décideurs. Dans cette optique, les Equations de Saint Venant (ESV) ont été utilisés. Ces dernières gouvernent les écoulements à surface libre qui nécessite des approximations numériques. Les solutions obtenues dépendent directement des méthodes utilisées. Depuis l'avancée de l'informatique, les chercheurs et ingénieurs ne cessent de développer des outils de plus en plus performants qui utilisent des méthodes différentes. Cette étude propose l'utilisation de deux logiciels libres populaires dans l'optique de comparer les méthodes classiques : différences finies et volumes finis. Les méthodes des différences finies consistent à faire une discrétisation moyennant un maillage prédéfini (rectangulaire en général). Celles des volumes finis consistent à discrétiser le domaine de l'écoulement en une multitude de volumes de contrôle, puis d'effectuer des bilans de masse et de quantité de mouvement sur ces petits volumes. Les résultats donnent la répartition des profondeurs d'eau et le champ de vitesse de l'écoulement afin d'avoir une connaissance de l'étalement et la dynamique générale de l'inondation. L'analyse est faite par modélisation d'un tronçon du fleuve Sambirano, en période de crue avec un MNT de haute résolution. Les études montrent que la méthode des volumes finis avec l'utilisation d'un maillage triangulaire non structuré est la plus adaptée pour la modélisation des écoulements en eau peu profonde en milieu naturel.

Mots-clés : Inondation et crue, Différences finies, Equation de Saint Venant, Fleuve Sambirano, Volumes finis

ABSTRACT

Floods are the most devastating natural disasters in the world. Knowledge and mastery of these phenomena is essential for scientists to guide and help decision makers. In this perspective, the Shallow Water Equations (SWE) free surface flows which requires numerical approximations have to be solved. The obtained solutions depend directly on the used methods. Fortunately, with the advancement of computing, more and more efficient tools that using different methods were achieved by researchers. This study proposes to use two popular free software in order to compare the classical methods: finite differences and finite volumes. The finite difference methods consist of discretization using a predefined mesh (generally rectangular). The finite volume methods consists of discretizing the flow domain into a multitude of control volumes (or cells), then performing mass and momentum balances on these small volumes. The results are the distribution of water depths and the flow velocity field throughout the computational domain, thus leading to knowledge of the spread and the general dynamics of the flood. The analysis is made by modeling a section of the Sambirano river, during the flood period with a high resolution DTM (Digital Terrain Model). Studies show that the finite volume method with the use of an unstructured triangular mesh is the most suitable for modeling shallow water flows in a natural environment.

Key-words : Finite Differences, Finite Volumes, Flood, Sambirano river, Shallow Water Equations

INTRODUCTION

Depuis les premières civilisations enregistrées, les humains ont tendance à s'installer près des cours d'eau en raison de la proximité des approvisionnements en eau, des conditions écologiques et des avantages offerts aux activités agricoles (Arheime, 2013). C'est ainsi qu'un pourcentage considérable de personnes vivent dans des zones inondables. Par ailleurs, les personnes exposées à une catastrophe souffrent non seulement de blessures physiques mais aussi de dommages psychologiques durables. La prévision en matière d'inondations est l'un des éléments fondamentaux de mesures d'atténuation de l'impact économique et social liés aux dégâts y afférents (Punpim, 2009) (Sriwongsitanon, 2009).

Des recherches récentes ont permis des avancées significatives dans l'élaboration des modèles de prévision des inondations (Teng, 2017) (Randriamparany M., 2019). Trois grandes catégories de modèle sont avancées, il s'agit des modèles empiriques qui englobent ceux basés sur des mesures directes ou indirectes des modèles hydrodynamiques basés sur les équations de Saint Venant, et des modèles simplifiés qui peuvent être utilisés pour les prédictions mais qui ne

présentent pas d'avantages sur les détails. Cette étude analyse seulement l'efficacité des modèles hydrodynamiques selon des méthodes numériques. Il est évident que la qualité du résultat dépend davantage des données d'entrée. Mais cela provoque un compromis très important c'est-à-dire qu'une topographie trop fine nécessite un maillage fin qui est sanctionné par un calcul lent ou une instabilité du schéma numérique. (Meesuk, 2014), a développé une approche de modélisation des inondations urbaines combinant une vue de dessus LiDAR avec une observation SfM (Structure of Motion). L'étude montre que les techniques basées sur la fusion de données LiDAR et les observations de mouvement peuvent être très bénéfiques pour les applications de modélisation des inondations.

La modélisation des phénomènes hydrodynamiques est généralement entachée d'erreurs qui proviennent des multiples approximations faites à chaque étape de la construction et de l'application des modèles. La complexité des processus mise en jeu conduit à l'utilisation d'équations mathématiques simplifiées faisant intervenir des paramètres à ajuster ; celles-ci sont résolues de manière approchées par des méthodes numériques et nécessitent des variables mesurées ou estimées. Afin d'assurer la maîtrise des risques liés aux événements pluvieux, il est primordial de connaître l'impact des différentes incertitudes liées au modèle sur l'estimation des niveaux d'eau ou de leurs vitesses dans les zones sensibles. Les résultats du modèle numérique sont ensuite comparés et évalués à partir d'observations In Situ.

L'objectif principal est d'analyser l'efficacité des méthodes numériques utilisées pour la résolution des équations de Saint Venant 2D. Pour cela, des comparaisons du niveau de l'eau et de sa vitesse ont été effectuées dans toutes les grilles de calcul.

MATERIELS ET METHODE

Les équations de Saint Venant

Les modèles hydrodynamiques sont basés sur les équations de Saint venant. Ces équations régissent généralement les écoulements à surfaces libres. Il est donc impératif d'adjoindre au système plusieurs conditions pour avoir un problème bien posé. Ces équations peuvent être organisées sous la forme vectorielle suivante (Mohammed, 2005) :

$$\frac{\partial U}{\partial t} + \frac{\partial F}{\partial x} + \frac{\partial G}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Où

$$U = \begin{Bmatrix} h \\ hu \\ hv \end{Bmatrix} \quad F = \begin{Bmatrix} hu \\ hu^2 + gh^2/2 \\ huv \end{Bmatrix} \quad G = \begin{Bmatrix} hv \\ huv \\ hv^2 + gh^2/2 \end{Bmatrix} \quad (2)$$

Dans lesquelles :

h : profondeur de l'eau, t : temps, u : vitesse d'écoulement dans la direction x ,
 v : vitesse d'écoulement dans la direction y , g : accélération de la pesanteur.

Site étudié

La zone d'étude est située dans la partie Nord-Ouest de Madagascar (Figure 1). Le fleuve Sambirano draine un bassin versant de 2 830 km² avec une pluviométrie moyenne interannuelle, évaluée à 2 500 mm (Chaperon P., 1993). Dans cette zone la pente du fleuve est très faible ce qui augmente considérablement la durée de décrue (Randriamparany M., 2019).

Le tronçon étudié se caractérise par l'existence d'un pont sans piles où les culées rétrécissent considérablement les berges (Figure 2).

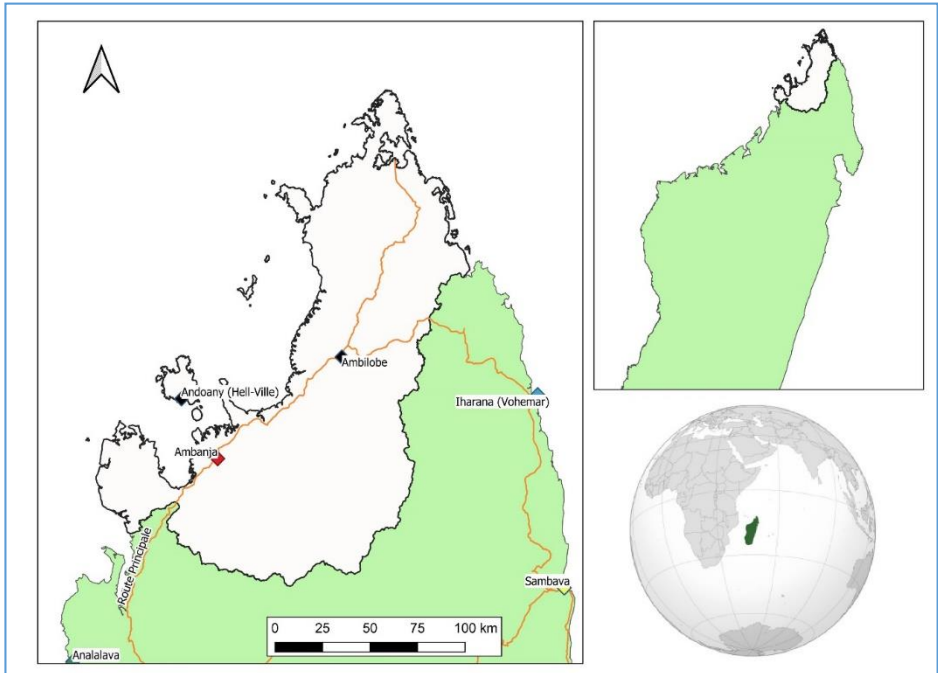


Figure 1 : Localisation globale du site étudié

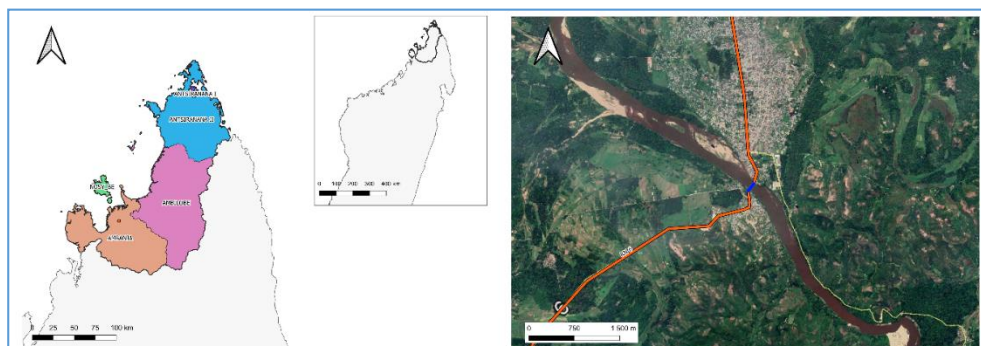


Figure 2 : Localisation du tronçon étudié (passage du fleuve sous le pont Sambirano)

Données et logiciels utilisés

Les données topographiques utilisées sont une reconstitution par mesure directe effectuée dans la zone en septembre 2017 lors d'une campagne de levés effectuée dans le cadre d'une thèse. La géométrie du tronçon est obtenue par des levés topographiques et bathymétriques directs exécuté à l'aide d'un tachéomètre HI-TARGET (Randriamparany M., 2016). Ces levés nous ont permis de générer un MNT de haute résolution du tronçon étudié (Figure 3).

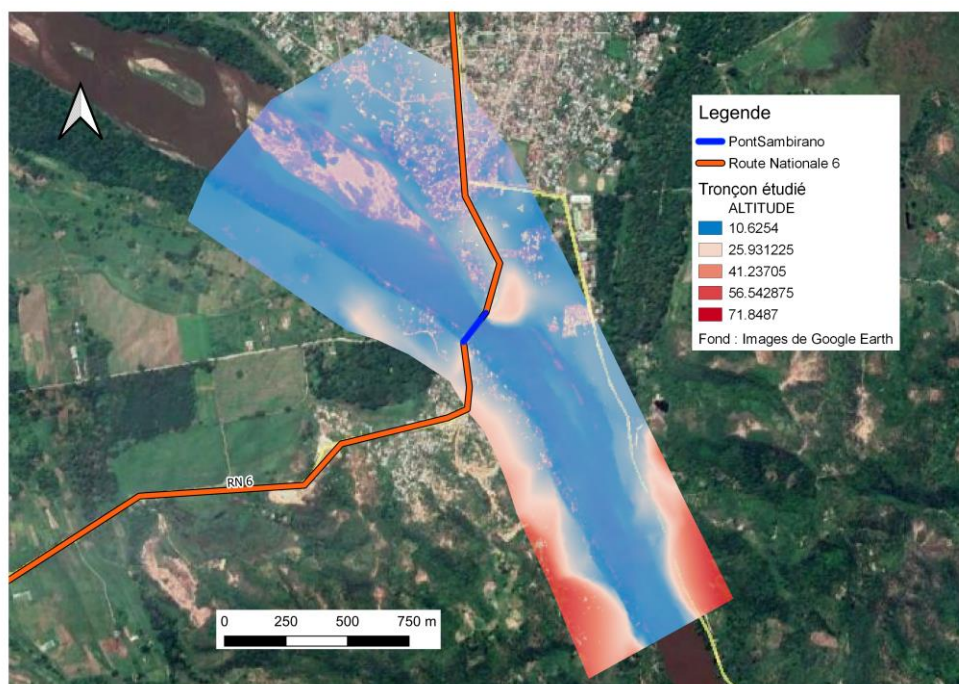


Figure 3 : Topographie et bathymétrie du tronçon étudié

L’hydrogramme constitue l’un des éléments clés de la modélisation des inondations. Il est enregistré comme série chronologique ; cependant, il n’est pas toujours disponible surtout dans les pays en développement en raison du manque de données mesurées. (Melisa C. K., 2017). A cet effet, et pour les conditions à l’entrée, un hydrogramme synthétique basé sur les valeurs indiquées dans (Chaperon P., 1993) a été exploité (Figure 4).

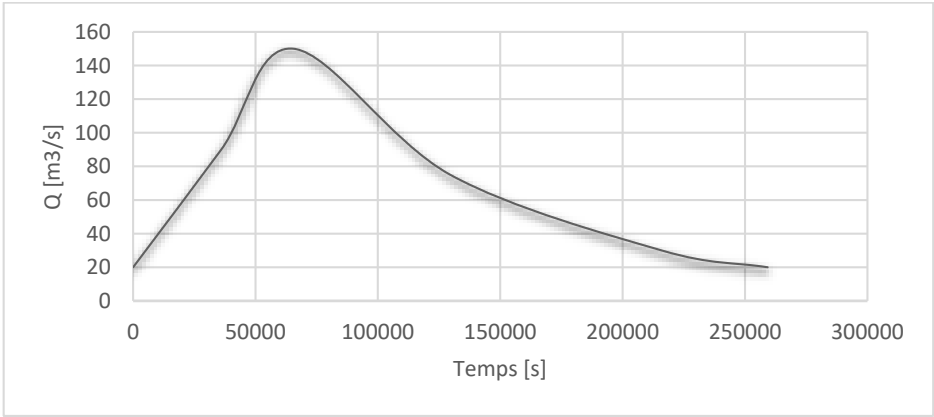


Figure 4 : Hydrogramme à l'entrée de chaque modèle

Les logiciels employés sont des solveurs libres incorporés dans des interfaces graphiques simples et populaires (Best Open Source Software in Water Resources). Chaque solveur est mis en œuvre pour un cas réel, c'est à dire une même géométrie (Tableau 1).

Tableau 1 : Logiciels (solveurs) et la méthode numérique utilisée

Logiciel (solveur)	Méthodes numérique	Maillage	Sites
BASEMENT	Volumes finis	Triangulaire non structuré	https://basement.ethz.ch/
IRIC (Nays2DFlood)	Différences finies	Quadrangle non structuré	https://i-ric.org/en/solvers/nays2dflood/

La Figure 5 montre une vue globale de la méthodologie, des données et des solveurs adoptés.

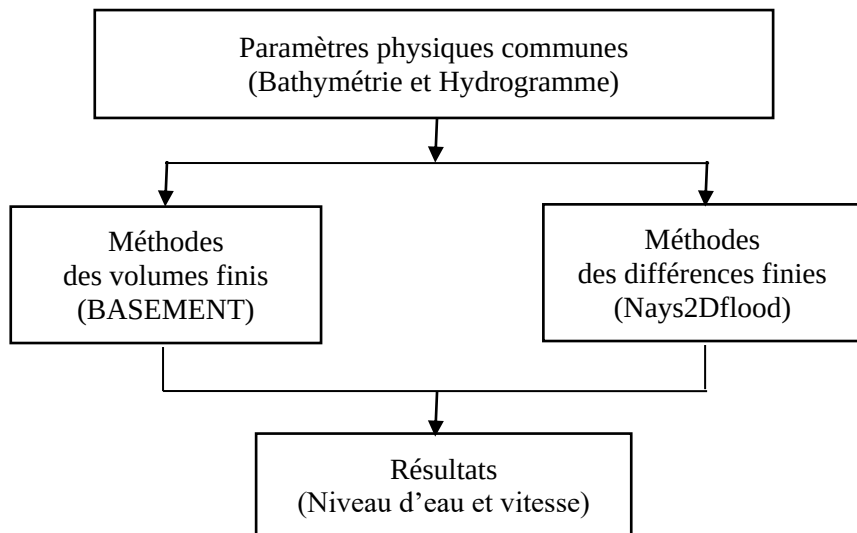


Figure 5 : Synthèse des méthodes et des logiciels utilisés

En se référant au Tableau 1, il est constaté que chaque solveur utilise des maillages différents. La Figure 6 montre chaque type de maillage.

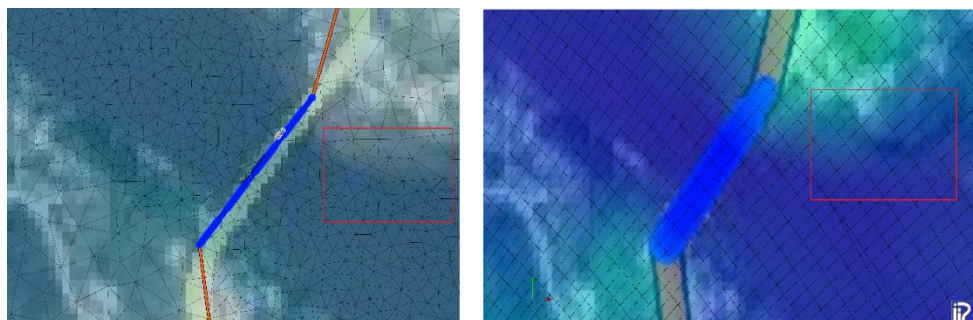


Figure 6 : Gauche : grille de calculs pour BASEMENT (triangulaire non structuré) et grille de calculs pour Nays2D flood (quadrangle curviligne)

Ces illustrations (Figure 6) montrent les maillages sous le pont du Sambirano. Il peut être visualisé dans le rectangle rouge que le maillage triangulaire permet de représenter facilement les courbures des berges contrairement au maillage en quadrangle.

BASEMENT est un logiciel de simulation numérique qui a été développé par le Laboratoire d'hydraulique, d'hydrologie et de glaciologie (VAW) de l'ETH de Zurich. C'est un modèle hydro et morphodynamique par volumes finis qui résout le système d'équation de Saint Venant. La principale motivation du recours à ce logiciel est qu'il représente un outil puissant et convivial qui facilite les applications de base

pour les praticiens, et une configuration de modèle avancé pour la recherche. La méthode des volumes finis consiste à discrétiser le domaine de l'écoulement en une multitude de volumes de contrôle, puis à effectuer des bilans de masse et de quantité de mouvement sur ces petits volumes. L'intérêt de la méthode des volumes finis réside dans le fait qu'elle assure la conservation de la masse, propriété importante à respecter par tous les calculs des écoulements de fluides, et permet de réduire un ordre de dérivées des équations aux dérivées partielles. En maillage non structuré, la méthode des volumes finis nous offre, par ailleurs, une prise en compte parfaite de la géométrie complexe du domaine de calcul. Le solveur HLLC (Harten-Lax-van Leer-Contact) a été introduit par Toro (Toro E. F., 1994). Il restaure l'onde de raréfaction manquante par certaines estimations, comme les linéarisations, qui peuvent être simples mais aussi plus avancées, comme l'utilisation de la vitesse moyenne de Roe pour la vitesse de l'onde moyenne. Ces logiciels sont assez robustes et efficaces mais un peu plus diffusifs (Quirk, 1996).

NAYS2DFLOOD est un solveur d'analyse de crue en 2 dimensions. Il résout les Equations (1) et (2) en utilisant un système de coordonnées curviligne et prend en compte les coordonnées ajustées aux limites par la méthode des différences finies. La méthode CIP (*Constrained Interpolation Pseudo-Particules* ou *Cubic Interpolated Propagation*), qui est une des options du solveur Nays2D Flood, a été utilisée pour la résolution des termes d'advection des équations. C'est une méthode qui a été posée en premier en 1985 par (Takewaki H., 1985) et qui a connu par la suite de nombreux développements, par exemple par (Yabe, 1988) et (Yabe T., 1991).

Mise en œuvre des simulations

Pour la méthode des différences finies la simulation a été effectuée avec le solveur Nays2D Flood version 5.0 et le logiciel IRIC version 2.3.9.6034 et avec les caractéristiques suivantes :

- Une grille de $251 * 31$ soit 7781 mailles ;
- Pas de temps de calculs $\Delta t = 0,1$;
- Nombre maximal d'itérations pour le calcul de la surface = 10 ;
- Profondeur minimale de l'eau = 0,20 m.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

Les Figures 7, 8 et 9 qui suivent montrent les profondeurs et les vitesses de l'écoulement à différents instants de l'hydrogramme. Les figures de gauche concernent les résultats obtenus à partir de l'utilisation de BASEMENT tandis que celles de droite montrent les résultats après exploitation d'IRIC, et ce, au même moment.

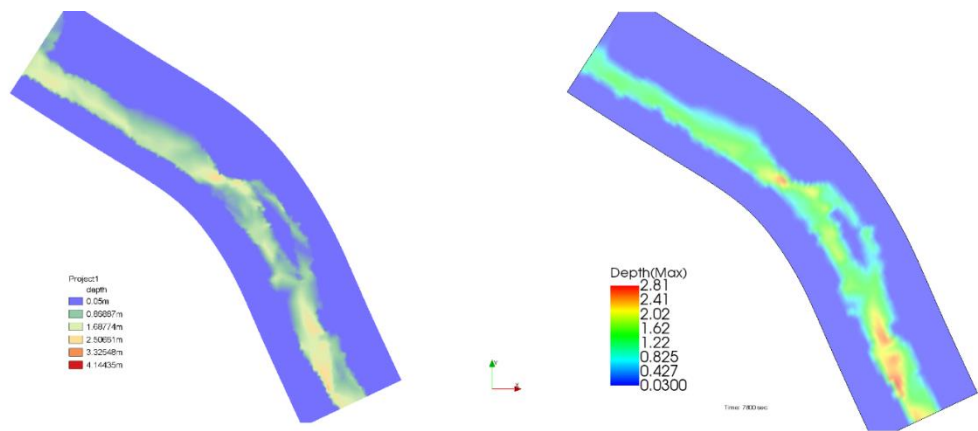


Figure 7 : Profondeur d'eau dans le domaine de calcul à t=7200s

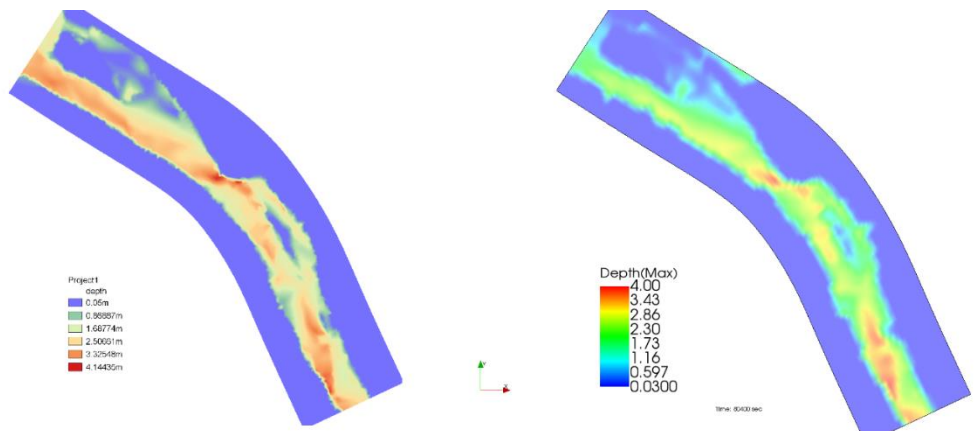


Figure 8 : Profondeur d'eau au pic de l'hydrogramme t=80400s

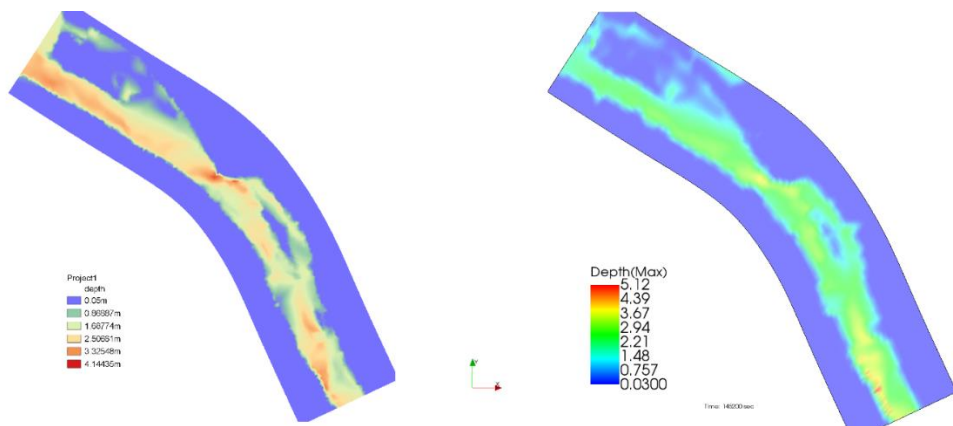


Figure 9 : Profondeur d'eau pendant le décrue à $t=145200s$

L'analyse de ces figures met en évidence les points suivants :

- Les résultats obtenus reproduisent globalement la réalité (observation visuelle d'un évènement de crue) malgré le manque de donnée à disposition ;
- Les résultats numériques obtenus avec les deux méthodes diffèrent peu ;
- Les deux codes de calcul sont parallélisables c'est-à-dire que l'on peut pour l'un et l'autre exploiter le maximum de threads possible pour le matériel informatique utilisé ;
- Le terme source qui modélise les précipitations dans la zone d'étude pendant l'évènement n'est pas considéré. Il peut être considéré dans le schéma numérique Nays2D flood au contraire de BASEMENT.

D'un point de vue global les deux outils sont fiables pour la modélisation des crues en utilisant un MNT de haute résolution.

L'absence de données sur la zone d'études a empêché la calibration et la validation quantitative du modèle. Cependant, des enquêtes sur le terrain ainsi que l'examen de différentes photos et vidéos pendant l'inondation ont permis de conclure à un accord acceptable entre les résultats de la simulation numérique et l'extension spatiale qui ont été réellement produite dans la zone d'étude. Cette calibration qualitative est une démarche commune qui a été effectuée avec succès un peu partout dans le monde (Jamal, 2016), (Komia, 2017), (Mohammad S., 2018), (Mukhsan P., 2019), (Fani Y. S., 2019) et (Thidarat K., 2017) avec l'utilisation de Nays2D Flood et BASEMENT car ces solveurs ont justement été élaborés pour les pays en développement où les données manquent (Takuya I., 2012).

CONCLUSION

Moyennant les avancées dans le domaine de l'hydraulique numérique, les ingénieurs et chercheurs ne cessent d'améliorer les différentes méthodes et approches afin de faciliter et de se rapprocher de la réalité en termes de modélisation. Elles permettent de faire des choix en matière d'applications. L'objectif de cet article a été alors d'utiliser les deux méthodes numériques habituelles dans la résolution des équations de l'écoulement en formulation bidimensionnelle afin d'évaluer leurs pertinences. Les résultats des simulations ont montré que les deux méthodes sont utilisables pour la résolution de l'équation de Saint Venant en utilisant un modèle numérique de terrain de haute résolution. Pour les deux méthodes l'algorithme implicite permet d'utiliser des pas de temps de calcul plus importants que les méthodes explicites. En ce qui concerne la méthode des différences finies le maillage n'est pas forcément orthogonal ; dans le cas contraire, l'algorithme est plus simple et efficace. La méthode des volumes finis fournit une augmentation de la stabilité et de la robustesse améliorée par rapport à techniques traditionnelles de différences finies et d'éléments finis.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Arheime A., Montanari, Young G., Savenije, Hughes D. et al. (2013). "Panta Rhei—Everything Flows": Change in hydrology and society—The IAHS Scientific Decade 2013–2022. (T. & Francis, Éd.) *Hydrological Sciences Journal*, 58(6), 1256-1275. doi:10.1080/02626667.2013.809088
- 2) Chaperon P., Danloux J., et Ferry L., *Fleuves et Rivières de Madagascar*. Ed. ORSTOM, Paris (France), 883 p. (1993)
(<https://www.documentation.ird.fr/hor/fdi:37307>)
- 3) Dalila L., Roger F. et Binliang L. (2015, Avril). Méthode des volumes finis et précision des modèles numériques des écoulements souterrains. *La houille Blanche* (2), 39-44.
doi:<https://doi.org/10.1051/lhb/20150017>
- 4) Fani Y. S., Muhammad S. P., Rita T. L. et Muhammad A. T.. (2019). Model of Peak Discharge Reduction Using Side Channel. *International Journal of Civil Engineering and Technology (IJCIET)*., 137-146.
doi:<http://www.iaeme.com/ijciyet/>
- 5) Jamal A. N. S., Jun-Ichiro G. T. et Kazuhito S.. (2016). Flood Modeling and Simulation using iRIC: A Case Study of Kabul City. *FLOODrisk 2016 - 3rd European Conference on Flood Risk Management*.

- 6) Kossi K., Jeffrey N., Mark A. T. et Diekkrüger B. (2017). Modelling of Flood Hazard Extent in Data Sparse Areas: a Case Study of The Oti River Basin, West Africa. *Journal of Hydrology: Regional Studies*(10), 122-132.
doi:<http://dx.doi.org/10.1016/j.ejrh.2017.03.001>
- 7) Meesuk V., Vojinovic Z., Mynett A.E. et Abdullah A. F. (2014). Urban flood modelling combining top-view LiDAR data with ground-view SfM observations. *Advances in Water Resources*, 75, pp. 105-117.
- 8) Melisa C. K., Gokmen T. et Oguz G. (2017). Predicting flood plain inundation for natural channels having no upstream gauged stations. *Journal of Water and Climate Change*, p. jwc2017307.
- 9) Mohammad S., Carolyn S., Eizo N., Yasuyuki S. et Mohammad T. S. (2018). Applicability of IRIC (Nays2D Flood) for the prediction of flash flood inundation area of Balkhab River. *Proceedings of ISER 149th International Conference*, (pp. 23-28). Kyoto, Japan.
doi:[http://ijmas.iraq.in/paper_detail.php?paper_id=14707&name=Applicability_of_IRIC_\(Nays2DFlood\)_for_the_Prediction_of_Flash_Flood_Inundation_Area_of_Balkhab_River](http://ijmas.iraq.in/paper_detail.php?paper_id=14707&name=Applicability_of_IRIC_(Nays2DFlood)_for_the_Prediction_of_Flash_Flood_Inundation_Area_of_Balkhab_River)
- 10) Mohammed B., Farid B. , Imad E. et Hamid A. (2005). Résolution des équations de Saint Venant par un schéma éléments finis et un schéma volumes finis. *Revue Européenne des Éléments*, 14(8), 999-1013. Récupéré sur <http://dx.doi.org/10.3166/reef.14.999-1013>
- 11) Mukhsan P. H., Vickky A. et Evi A. (2019, Novembre). Simulation of the Effect of Flow Velocity on Floating Sediment Concentration at the Jeneberang River Estuary with the Nays2DH Model. *International Journal of Engineering Research and Application*, 9 (11 (series-II)), 01-07.
- 12) Punpim P. M. et Nutchant S. (2009). Estimation of the URBS model parameters for flood estimation of ungauged catchments in the upper Ping river basin, Thailand. *ScienceAsia*, 35, 49-56.
doi:10.2306/scienceasia1513-1874.2009.35.049
- 13) Quirk J. J. (1996). A contribution to the great Riemann solver debate. *Journal methods in fluid*(18), 555–574. doi:0.1002/flid.1650180603
- 14) Randriamparany M. (2016). *Modélisation et simulation numériques d'inondation. Application à la ville d'Ambanja*. Mémoire d'Ingénieur : Ecole Supérieure Polytechnique d'Antsirananana.
- 15) Randriamparany M., Ratsaramody J. et Randriazanamparany M. A. (2019). Cartographie et évaluation rapides des dégâts d'une inondation avec des données

gratuites et logiciels libres : cas de la zone inondable du Sambirano, Madagascar. *Afrique SCIENCE*, 2, pp. 24-31.

- 16) Sriwongsitanon, Punpim P. M. et Nuchanart (2009). Estimation of the URBS model parameters for flood estimation of ungauged catchments in the upper Ping river basin, Thailand. *ScienceAsia*, 35, pp. 49–56.
- 17) Takewaki H., Nishiguchi A. et Yabe T. (1985). The cubic-interpolated pseudo-particle (CIP) method for solving hyperbolic-type equations. *Journal of Computational Physics*, 261-268.
doi:<https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1985JCoPh..61..261T/>
- 18) Takuya et Toshiki I. (2012). *Nays2D Flood Solver Manual*. iRIC Project.
doi:<http://iric.org/en/>
- 19) Teng, J. (2017). Flood inundation modelling : A review of methods, recent advances and uncertainty analysis. *Environmental Modelling and Software*.
- 20) Thidarat K. et Sanit W (2017). Impact of Heavy Rainfall Cause by Climate Change on Urban Area in Bangkok, Thailand.
doi:<http://aseanacademicnetwork.com/node/Files/TA126-1.pdf>
- 21) Toro E. F., Spruce M. et Speares W. (1994). Restoration of the contact surface in the HLL-Riemann solver. *Shock Waves*(4), 25-34. Récupéré sur <https://doi.org/10.1007/BF01414629>
- 22) Toshiharu K. et Narantsetseg C. (2019). Long Term Changes in Flooding around Gifu City. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W8, 421-427.
doi:<https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W8-421-2019>
- 23) US Army Corps of Engineers (2016). *HEC RAS - 2D Modeling User's Manual*. Davis CA 95616.
- 24) Yabe T. et Takei E. (1988). A new higher-order Godunov method for general hyperbolic equations. *Journal of The Physical Society of Japan*, 2598-2601.
doi:<https://journals.jps.jp/doi/abs/10.1143/JPSJ.57.2598>
- 25) Yabe T., Ishikawa T., Wang P. Y., Aoki T., Kadota Y. et Ikeda F. (1991). A universal solver for hyperbolic-equations by cubic-polynomial interpolation. II. Two- and three-dimensional solvers. *Computer Physics Communications*, 233-242. doi:<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/001046559190072S>

HYDRODYNAMIQUE DES ECOULEMENTS TURBULENTS BIPHASIQUES APPLIQUEE DANS LA CONCEPTION DES DECANTEURS LAMELLAIRES

par

ANDRIANTOVOHASINA Tsifoimbola⁽¹⁾

(1) Ingénieur de Projet JIRAMA, Madagascar

RESUME

L'exploitation des eaux de surface reste l'un des axes stratégiques pour résoudre les problèmes d'accès à l'eau potable des périphéries de la ville d'Antananarivo. Cependant, les eaux de surface présentent une forte concentration en matériaux en suspension apportés par les érosions des bassins versants. La technique de décantation lamellaire présente des avantages considérables par sa capacité élevée de séparation liquide-solide comparé avec un simple ouvrage. Les modèles hydrodynamiques permettent de calculer avec précision les champs de vitesse et de concentration en tout point d'un volume de contrôle. L'hypothèse simplificatrice d'écoulement plan monophasique en régime permanent nous a permis d'effectuer un nombre élevé de simulation pour différentes configurations géométriques. Les résultats ont montré une compréhension claire de la distribution de vitesse dans l'ouvrage en fonction de différentes configurations. La variante retenue est celle qui répond au mieux au critère d'optimisation qui est la répartition uniforme du débit dans chaque module lamellaire. La prochaine étape consiste à monter un modèle de simulation en régime non permanent et en écoulement biphasique de la configuration géométrique retenue.

Mots-clés : Hydrodynamique, Décantation lamellaire, Computational Fluid Dynamic, Eau de surface, Antananarivo, Madagascar

ABSTRACT

The exploitation of surface water remains one of the strategic axes to solve the problems of access to drinking water of the peripherals of the city of Antananarivo. However, surface water has a high concentration of suspended materials brought about by erosion from watersheds. At a reasonable cost and by its high liquid-solid separation capacity, the lamellar settling technique finds its application advantages. Hydrodynamic models allow accurate calculation of velocity and concentration fields at any point in a control volume. The simplifying assumption of single-phase

planar steady-state flow allowed us to perform a high number of simulations for different geometric configurations. The results showed a clear understanding of the velocity distribution in the structure as a function of different configurations. The chosen variant is the one that best meets the optimization criterion, which is the uniform distribution of the flow in each lamellar module. The next step consists in setting up a simulation model in non-steady state and in two-phase flow of the geometrical configuration adopted.

Key-words : Lamellar settling, Computational Fluid Dynamic, Surface water, Hydrodynamic model, Antananarivo, Madagascar

INTRODUCTION

L'exploitation des rivières reste un axe stratégique parmi différentes possibilités pour l'alimentation en eau potable des périphériques de la ville d'Antananarivo. Notons cependant que dans la plupart des captages, les dessableurs ne peuvent contenir qu'une proportion réduite de matériaux en suspension. Les ouvrages de clarifications (décanteur et filtre) sont fortement sollicités surtout pendant la période de pluie. Dans le souci de répondre aux besoins croissants des consommateurs et face aux variations accentuées de la qualité de l'eau à traiter, des projets de recherches, au niveau de la JIRAMA, sont en cours menés pour apporter des solutions innovantes à un coût raisonnable. C'est dans cette optique qu'on trouve tout l'intérêt d'approfondir la recherche pour l'application de la technique de décantation lamellaire. En effet, cette technique présente des avantages majeurs tels que :

- Performance élevée de séparation liquide-solide ;
- Faible emprise au sol ;
- Augmentation de performance des ouvrages existants ;
- Faible coût.

En 1986, I. Ramammonjisoa proposait l'application des lamelles pour l'aménagement des décanteurs existants de la station de traitement de Farafaty (Toamasina). Mais l'application restait du domaine théorique sur le principe de dimensionnement de l'ouvrage. La technique est évoquée de nouveau en 2014 au sein de la JIRAMA pour la rénovation des techniques des unités de traitement. Le mode de conception est axé dans le domaine des calculs numériques exploitant les avantages offertes par l'apparition des codes de calculs résolvant les équations de l'hydrodynamique. La présente étude est une grande partie de la recherche axée sur la modélisation des phénomènes physiques dans l'ouvrage. Cela consiste à prévoir

au préalable le comportement hydrodynamique de l'ouvrages faces aux contraintes imposées par la qualité de l'eau à traiter.

MATERIELS ET METHODES

Description du système à modéliser-le décanteur lamellaire

Le système fait partie d'une chaîne hydraulique de traitement d'eau de surface comprenant un système de captage incluant les prétraitements (dégrilleur et dessableur), un coagulateur/floculateur pour l'injection des réactifs coagulants et formation des floccs, un décanteur lamellaire pour retenir les particules lourdes, et un filtre pour retenir les surverses du décanteur. L'eau filtrée est désinfectée avant d'être distribuée.

La technique de la décantation lamellaire repose sur le phénomène de décantation dans une tube inclinée. Le temps de décantation y est plus rapide que dans un tube vertical. La technique consiste à reproduire ce phénomène dans les ouvrages de décantation pour en augmenter la performance. Le positionnement des faisceaux lamellaires (tubes ou plaques parallèles) dans la zone de décantation crée un grand nombre de cellule élémentaire de séparation liquide-solide. Afin d'assurer l'évacuation des boues, il est nécessaire d'incliner les lamelles d'un angle α par rapport à l'horizontale.

Les paramètres caractéristiques de l'ouvrage sont :

- Débit : 50 m³/h
- Largeur de décantation : 2 m
- Longueur de décantation : 6 m
- □ Vitesse de chute : 1m/h
- Espace inter-lamellaire : 8 mm
- Inclinaison des lamelles : 60°
- Hauteur : 1,7 m
- Forme : plaque parallèle.

Description du modèle Physique

L'avènement des ordinateurs combinés avec le développement des algorithmes de résolution numérique des problèmes physiques ont révolutionné l'étude de l'hydrodynamique. La méthode de résolution numérique est ainsi la troisième approche reliant l'approche purement expérimentale et l'approche purement théorique du dynamique des fluides. Le module CFD (Computational Fluid

Dynamics) est un package optionnel qui étend l'environnement de modélisation avec des interfaces physiques personnalisés et des fonctionnalités optimisées pour l'analyse de tous les types d'écoulement. Comme modèle d'écoulement, nous utilisons les équations de Navier-Stokes en régime turbulent utilisant les équations de fermeture type K-ε. C'est un modèle de turbulence simple mais offrant des performances satisfaisantes pour des applications industrielles [VERSTEEG 1995].

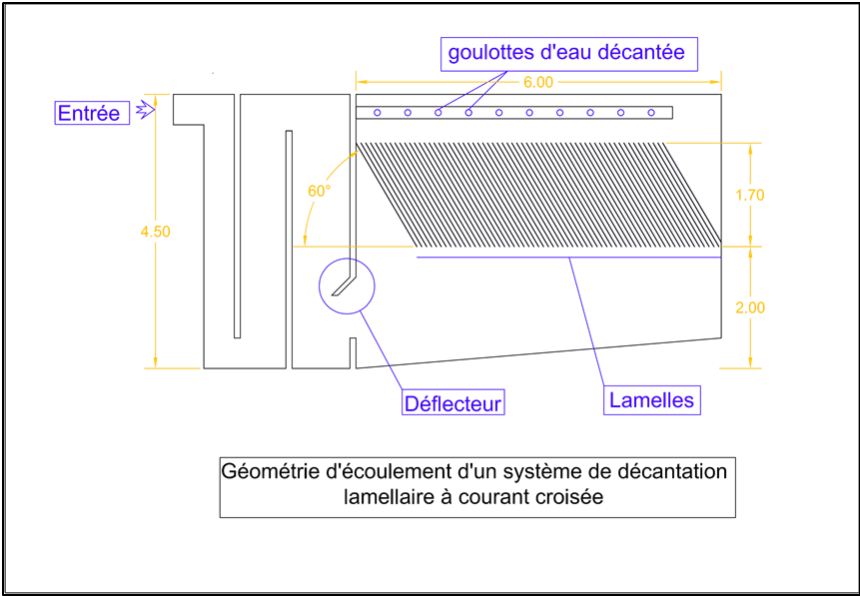


Figure 1 : description géométrique du système physique à modéliser

Notons cependant, une difficulté particulière du système étudié est à noter. Le nombre important de lamelles nécessite un nombre élevé de maillage du domaine, augmentant le nombre de calcul à effectuer. Ainsi, en 2007, Morin propose de représenter l'ensemble des lames par une zone de résistance à l'écoulement comme s'il s'agissait d'un bloc poreux décrit par sa perméabilité. En 2010, José Vasquez a monté un modèle tridimensionnel d'un décanteur lamellaire à flux croisé. Ces modèles sont limités selon les modes de calculs car le modèle d'écoulement en milieux poreux ne peut modéliser les écoulements multiphasiques et le modèle d'écoulement en trois dimensions est trop volumineux en termes de calcul et un calcul en régime non permanent est presque impossible pour les ordinateurs qu'on utilise.

Equations de Navier Stokes en Régime turbulent utilisant les équations de fermeture k-ε

Les équations de mouvement en fluide incompressible deviennent :

- Conservation de la masse (équation de continuité) :

$$\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

- Equations de Navier-Stokes

$$\rho \bar{u}_j \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} = \frac{\partial \bar{p}}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\mu \frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} - \rho \overline{u'_i u'_j} \right) \quad (2)$$

Où

$$u_i = \bar{u} + u'_i$$

$$p = \bar{p} + p'$$

Les termes $-\rho \overline{u'_i u'_j}$ apparaissent et sont appelés contraintes de Reynolds proviennent de la décomposition de Reynolds. Le but de l'ensemble des modèles de transport de quantités moyennes consiste à estimer ces contraintes.

Les grandeurs relatives du modèle de turbulence :

- μ_T appelé viscosité turbulente. Contrairement à la viscosité moléculaire, cette viscosité n'est pas un paramètre intrinsèque au fluide, mais dépend essentiellement de l'écoulement et de son niveau de turbulence.
- k représentant l'énergie cinétique turbulente donnée par l'expression :

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'^2_i} \quad (3)$$

Les équations régissant le modèle statistique de turbulence sont obtenues en injectant dans les équations de mouvement la décomposition de Reynolds des grandeurs en grandeurs moyennes et fluctuantes. La non-linéarité de ces équations entraîne, dans ce mode de traitement, l'apparition d'inconnues supplémentaires qui rendent « ouvert » le système classique d'équations (nombre d'inconnues supérieur au nombre d'équations). Il convient donc de formuler des équations complémentaires dites équations de fermeture afin de résoudre le problème.

On écrit sur k , énergie cinétique de turbulence, une équation de bilan dans laquelle apparaît un nouveau terme ε appelé dissipation de l'énergie cinétique de turbulence. On établit une autre équation de bilan sur ε avec des simplifications pour

faciliter l'exploitation. Ces deux équations à deux nouvelles inconnues k et ε permettent, par une formule empirique, l'estimation de la viscosité turbulente.

$$\mu_T = \frac{\rho C_\mu k^2}{\varepsilon} \tag{4}$$

Où C_μ est une des constantes du modèle.

Tableau 1 : Constantes du modèle turbulence k-ε

Constantes	Valeurs
C_μ	0,09
C_{ε^1}	1,44
C_{ε^2}	1,92
σ_k	1,0
σ_ε	1,3

L'équation de transport pour k s'écrit :

$$\rho u.\nabla k = \nabla.\left[\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k}\right)\nabla k\right] + P_k - \rho\varepsilon \tag{5}$$

Où

$$P_k = \mu_T \left(\nabla u (\nabla u + (\nabla u)^T) - \frac{2}{3} (\nabla.u)^2 \right) - \frac{2}{3} \rho k \nabla.u$$

L'équation de transport pour ε s'écrit :

$$\rho u.\nabla \varepsilon = \nabla.\left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon}\right)\nabla \varepsilon\right) + C_{\varepsilon^1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon^2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{6}$$

Méthodologie de modélisation proposée

Pour contourner ces difficultés, des hypothèses simplificatrices simplificatrices sont proposées. La première consistait à ramener le problème à un système d'écoulement plan. La seconde utilise l'écoulement monophasique en régime permanent dans la conception de la géométrie d'écoulement. Ces hypothèses

permettent de simplifier le calcul et ainsi de simuler plusieurs configurations géométriques. Ces différentes configurations permettent de comprendre la distribution de la vitesse dans tout le domaine. L'objectif des simulations est d'avoir une répartition uniforme du débit dans chaque compartiment lamellaire.

- Les propriétés physiques sont :

- Masse volumique du fluide : 1000 kg/m^3
- Viscosité dynamique du fluide : 10^{-3} Pa.s

- Les conditions aux limites sont :

- Entrée : Vitesse normale à la surface 0.014 m/s
- Sortie : sortie à la pression atmosphérique au niveau des goulottes de récupération d'eau décantée

- Le maillage : le maillage consiste à subdiviser le domaine et ses frontières en éléments discrets. La convergence des calculs dépend de la finesse de la dimension de ces éléments. La taille des mailles que nous choisissons permet d'avoir 1% d'uniformité de vitesse dans chaque élément.

- Maillage des domaines (Surface) : 9 mm à 203 mm
- Maillage des frontières (lignes) : 1.8 mm à 126 mm

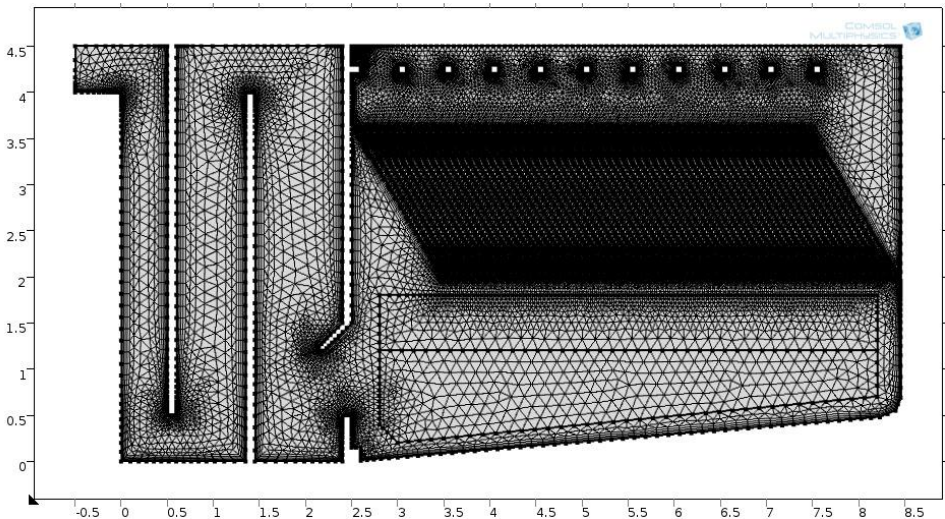


Figure 2 : Maillage du domaine physique

- La résolution des équations : Les équations sont résolues en régime permanent. Les inconnus sont les vitesses, pressions en tout point, l'énergie cinétique turbulent k , et la dissipation d'énergie cinétique turbulent ϵ .

RESULTATS

Conception de la géométrie d'écoulement

Pour chaque cas de variante, l'appréciation de la distribution de vitesse dans l'ouvrage s'observe à travers trois résultats :

- Vitesse en tout point de l'ouvrage, dont l'intensité est appréciée à travers les couleurs et les directions à travers les vecteurs ;
- Lignes de courant, servant à localiser les chemins préférentiels d'écoulement ;
- Profil de vitesse au milieu de la Zone de décantation, qui est notre principal intérêt de la recherche sert à apprécier le critère d'optimisation (répartition uniforme de vitesse).

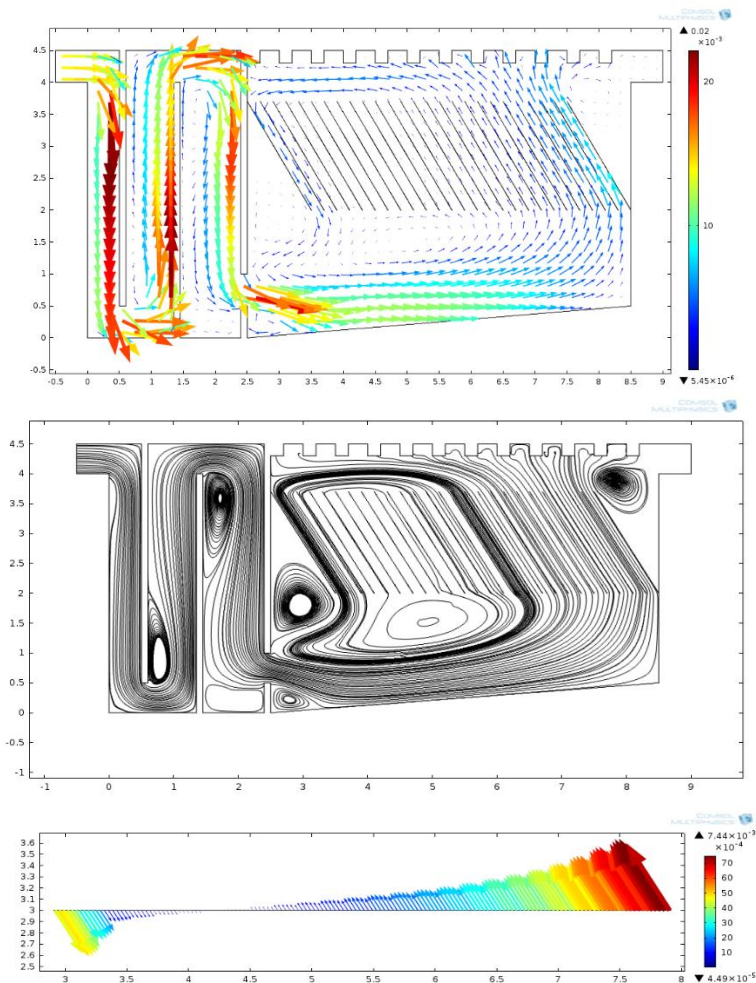


Figure 3 : Ouvrage avec orifice d'ouverture simple sans déflecteur et goulottes de récupération d'eau décantée

Orifice d'ouverture simple sans déflecteur : en disposant ainsi l'ouverture, l'entrée du flux d'écoulement est dirigée vers le bas, ce flux heurte le fond, remonte et passe dans la partie éloignée des compartiments lamellaires. Une zone de recirculation est localisée au niveau des compartiments plus proches de l'entrée. Le profil de vitesse montre un fort gradient dans la zone de décantation. Cette configuration d'entrée ne convient donc pas à notre la conception du présent travail.

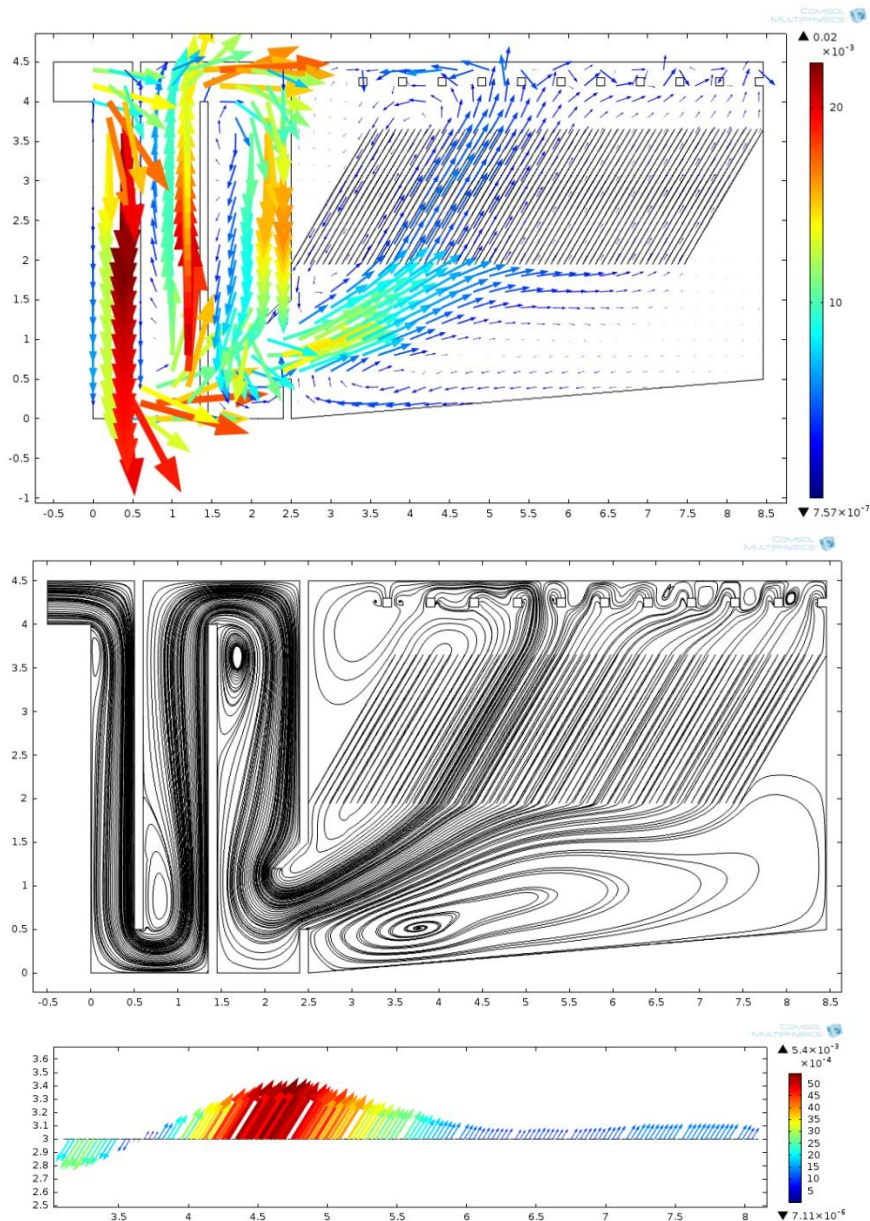


Figure 4 : Ouvrage avec lamelles dirigées dans le sens de l'écoulement, ouverture munie d'un déflecteur et goulottes de récupération d'eau décantée

Lamelles dirigées dans le sens de l'écoulement : en disposant les lamelles dans le sens de l'écoulement, on observe que la répartition de l'écoulement au niveau des lamelles est loin d'être satisfaisante (variation de couleur dans le profil de vitesse). L'on observe une zone de recirculation de l'eau dans la partie proche de l'ouverture des compartiments lamellaires, cette partie ne peut donc plus assurer le rôle auquel il est consacré. Cette disposition des lamelles fait, ainsi, partie donc des cas le plus défavorable pour la répartition des flux.

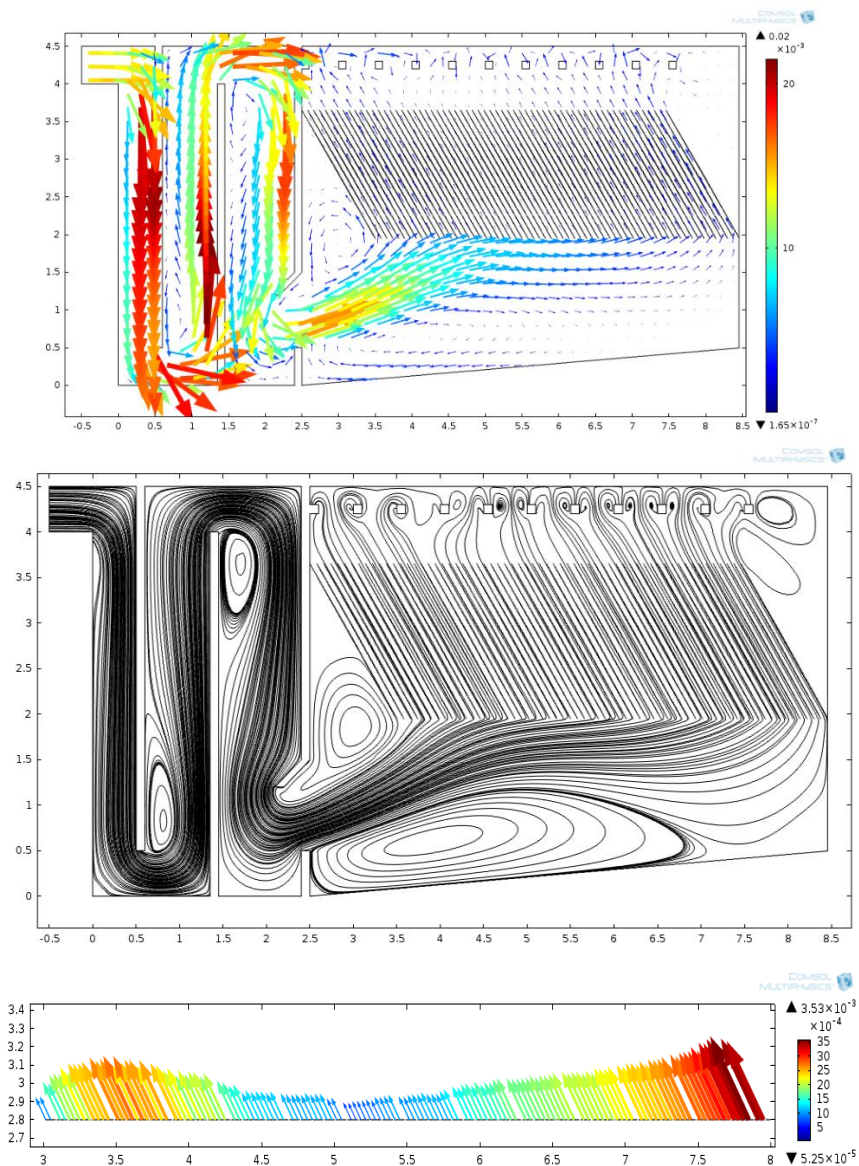


Figure 5 : Ouvrage avec lamelles dirigées dans le sens opposé de l'écoulement, ouverture munie d'un déflecteur et goulottes de récupération d'eau décantée

Lamelles dirigées dans le sens opposé d'écoulement : la comparaison avec la variante précédente rend compte de la différence que peut engendrer l'orientation des compartiments lamellaires. Ce qui nous conduit à adopter l'orientation dans le sens opposée à l'écoulement.

Concernant la configuration de l'entrée dans la zone de décanteur, en combinant l'ouverture simple avec le déflecteur, on arrive à dévier vers le haut, le sens d'entrée du flux d'écoulement. L'énorme zone de recirculation aperçue dans la première variante est réduite et complètement déplacée dans les zones où il n'y a aucun écoulement. Les flux qui entrent dans la zone de décantation forment ensemble un tube de courant et sont canalisés totalement dans les lamelles. Cette configuration d'entrée reste le plus convenable parmi les possibilités que l'on peut exploiter.

Description de la variante retenue

La géométrie d'écoulement de la variante retenue est entièrement déterminée. Les résultats de simulation donnent les aménagements à effectuer sur l'ouverture de l'alimentation de la zone de décantation (r, s, t, ω), les goulottes de récupérations d'eau décantée (p, q, δ) et les supports des modules lamellaires. Si les dimensions des modules lamellaires (e, h, α) étant fixées à l'avance, la position dans la zone de décantation est repérée par la grandeur (d). Ces dimensions sont développées clairement dans la figure ci-dessous.

DISCUSSION

Les simulations effectuées ont permis de comprendre la répartition du débit à travers la répartition de vitesse. Ont été déduites non seulement la configuration stable et conforme aux critères d'optimisation, mais aussi les configurations à éviter. La répartition de vitesse dans la zone de décantation dépend en grande partie :

- De la position et de l'orientation des lamelles ;
- Du nombre de goulotte de récupération ;
- De la configuration de l'entrée.

Au stade actuel de conception, un optimum de configuration géométrique a été obtenu. Ceci est une étape importante grand stade dans la conception mais ne permet pas de confirmer l'optimum du débit maximal et la concentration maximale que peut supporter l'ouvrage.

Les résultats ont montré l'avantage de l'application du modèle de turbulence $K-\varepsilon$ car notre système physique ne présente pas de forte turbulence. Le fonctionnement de l'ouvrage à $50\text{m}^3/\text{h}$ génère un caractère plus ou moins homogène de turbulence.

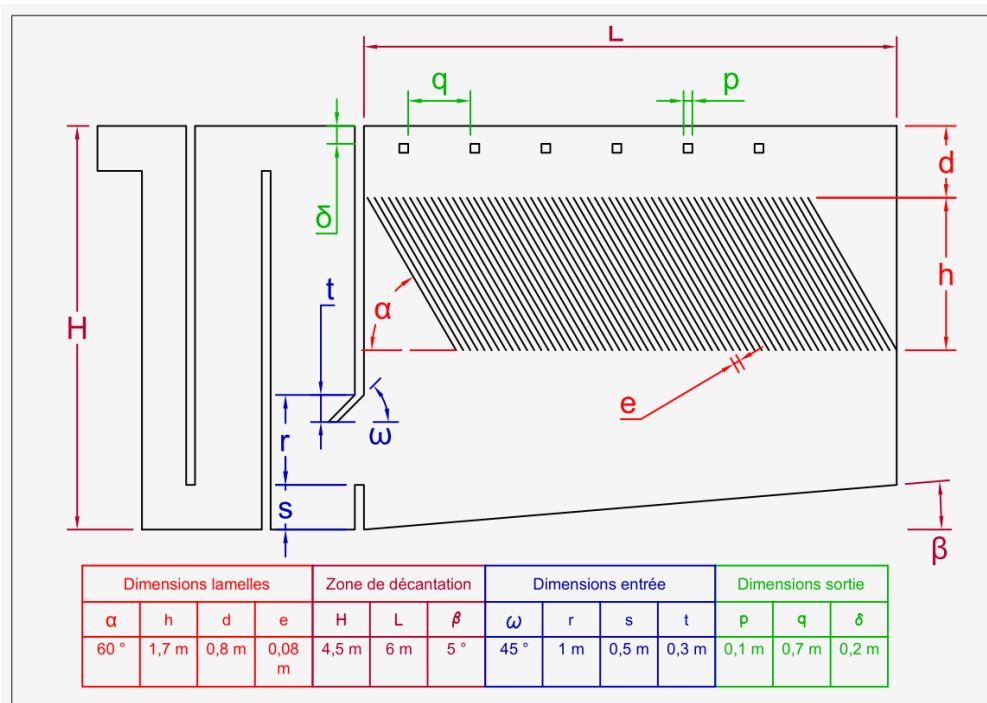


Figure 6 : Dimensions caractéristiques de la variante retenue

CONCLUSION

Au regard des avantages offerts par la technique de décantation lamellaire, la recherche dans le cadre de la conception du système coïncide avec les objectifs du développement durable. En effet, à un coût moindre, l'application de la technique permet de faire face aux fortes charges en matériaux en suspension des eaux de surface à traiter.

La simplification du modèle hydrodynamique nous permis d'effectuer un grand nombre de simulation. Les modèles ont offert une compréhension claire de la distribution de vitesse dans l'ouvrage et de retenir celle qui correspond au mieux au critère d'optimisation qui a été retenu. Cependant, ce niveau n'est que le début d'une longue chaîne de conception. Il reste à explorer les autres variables dans un modèle biphasique en régime non permanent en trois dimension tels que :

- Le débit
- L'espace inter lamellaire
- La hauteur des lamelles
- L'inclinaison des lamelles

- La dimension et forme des particules
- La masse volumique des particules
- La cohésion des particules.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) ANDERSON J. D. (1995) Computational Fluid Dynamics, the basics with applications. Département of Aerospace Engineering. 533p.
- 2) ANDRIANTOVHASINA T. (2016) *Modélisation et conception d'un système de décantation lamellaire pour la clarification d'eau brute.* 132p
- 3) CANLER J. P. (C.E.M.A.G.R.E.F). (1994) *La décantation lamellaire des boues activées*, Documentation technique F.N.D.A.E N°18, 46p.
- 4) CARDOT C. (2010) *Les traitements de l'eau pour l'ingénieur.* Edition Ellipses, 302p.
- 5) COMOLET R. (1976) *Mécanique expérimentale des fluides.* Masson 2è éd.
- 6) DEGREMONT. (1989) *Mémento technique de l'eau.* Edition du Cinquanteaire, Neuvième édition, 2 tomes. 1 426p.
- 7) FIGUE J-F., MORIN A. et AIRES N. (2009) *Simulations numériques des écoulements dans un décanteur lamellaire à contre-courant..* 14p.
- 8) LAVRENTIEV M. et CHABAT B. (1977) *Effet hydrodynamique et modèles mathématiques.* Edition MIR. Moscou, 363p.
- 9) LIPEME G. (2004) *Expérimentations et modélisations tridimensionnelles de l'hydrodynamique et de la séparation particulaire dans les déversoirs d'orage.* Thèse doctorat de l'Université Louis Pasteur – Strasbourg I, 274p.
- 10) RAMAMONJISOA I. V. Antananarivo (1986), *Aménagement d'une décantation existant : " essai sur l'application des lamelles "*. Mémoire de fin d'étude DH-ESPA, 83p.
- 11) VAZQUEZ J., MORIN A., DUFRESNE M. et WERTEL J. (2010) « *Optimisation de la forme des décanteurs lamellaires par la modélisation hydrodynamique 3D* ». NOVATECH, 10p.
- 12) VERSTEEG H. K., MALALASEKERA W. (1995) *An introduction to computational fluid dynamics, the finite volume method*, Prentice Hall., 257 p.

INSERTION D'UN FACTS SERIE POUR L'AMELIORATION DE LA STABILITE D'UN RESEAU ELECTRIQUE

par

VELOTSANGANA Ndalana Davida⁽¹⁾, RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa⁽²⁾,
RAZAFIMAHENINA Jean Marie⁽³⁾

(1) Ecole Doctorale Thématique Energies Renouvelables et Environnement, Université d'Antsiranana, Madagascar

(2) Ecole du Génie Industriel, Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana, Madagascar

(3) Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar

RESUME

Le gestionnaire du réseau électrique fait face aux problèmes majeurs sur l'accroissement de la capacité du transfert de puissance du système de transport existant. L'émergence des nouvelles technologies et l'accroissement de la population engendrent l'augmentation des besoins en énergie électrique. Elles imposent, par conséquent, de nouvelles exigences sur la condition de stabilité et de sécurité du réseau électrique. L'instabilité du réseau électrique provient de déséquilibre entre la demande et la production en énergie. L'objectif de cet article est de maintenir la stabilité d'un réseau électrique existant en utilisant un nouveau dispositif appelé FACTS (Flexible Alternating Current for Transmission Systems), ou systèmes de transmission à courant alternatif flexible, placé en série dans la ligne électrique. Dans cette optique, nous avons proposé une étude de la commande non linéaire basée sur la fonction dynamique à faible perturbation d'un réseau électrique associé avec un dispositif FACTS type série.

La méthodologie adoptée est l'utilisation de l'équation du modèle classique du second ordre du système seule machine raccordée à un bus infini (SMIB) avec le modèle d'injection du compensateur série à commande par thyristors (TCSC). Les simulations et les résultats obtenus sous l'environnement MATLAB-SIMILINK, pour un réseau SMIB ont montré l'efficacité d'un FACTS série type TCSC. Ce dispositif améliore la stabilité de l'angle de transmission de la puissance injectée et donne une nouvelle marge au niveau de la puissance active transitée, afin de rendre le réseau électrique robuste qui peut être utilisé jusqu'à sa limite thermique admissible.

Mots-clés : Dispositif FACTS, TCSC, Réseau électrique, SMIB, Stabilisation, Limite thermique admissible

ABSTRACT

The power grid operator is facing major issues on increasing the power transfer capacity of the existing transmission system. The emergence of new technologies and the increase in the population, generate an increase in the need for electrical energy. They consequently impose new requirements on the condition of stability and security of the electricity network. The instability of the electricity grid stems from an imbalance between energy demand and production. The objective of this article is to maintain the stability of an existing power grid by using a new device called FACTS (Flexible Alternating Current for Transmission Systems) or flexible alternating current transmission systems placed in series in the power line. With this in mind, we have proposed a study of nonlinear control based on the dynamic function at low disturbance of an electrical network associated with a series type FACTS device.

The methodology adopted is the use of the equation of the classical second order model of the single machine system connected to an infinite bus (SMIB) with the injection model of the thyristor controlled serial compensator (TCSC). The simulations and the results obtained under the MATLAB-SIMULINK environment, for a SMIB network have shown the efficiency of a serial FACTS type TCSC. This device improves the stability of the transmission angle of the injected power and gives a new margin in the level of the transited active power, in order to make the electrical network robust which can be used up to its allowable thermal limit.

Key-words : FACTS device, TCSC, Electrical network, SMIB, Stabilization, Allowable thermal limit

INTRODUCTION

L'émergence des équipements électriques est due à la forte croissance du nombre d'abonnés. L'intégration des énergies renouvelables et la légalisation du marché de l'électricité rendent la production de l'énergie imprévisible. L'évolution intense de la capacité de transit dans le réseau par de nouvelles centrales électriques incite les gestionnaires du réseau à construire de nouvelles lignes électriques.

Le présent article consiste à faire présenter une étude d'un dispositif Flexible Alternating Current for Transmission Systems (FACTS) type série inséré dans les lignes électriques, dans le but de contrôler la variation de la puissance échangée dans le réseau de transport. Ceci entre dans le cadre d'étude d'intégration de tout type de FACTS dans la commande de réseau électrique.

Ces dispositifs ont de diverses fonctions telles que le maintien de la tension, le contrôle des flux de puissance, l'amélioration de la stabilité du réseau y compris l'augmentation de la puissance maximale transmissible.

MATERIELS ET METHODES

En général, un réseau électrique est constitué de centrale de production, des lignes de transport et des consommateurs.

Les FACTS peuvent travailler comme sources de courant (CSC : Current Source Converter) ou comme sources de tension (VSC : Voltage Source Converter).

Dans le cadre de ce travail, les matériels considérés sont le réseau électrique, le dispositif FACTS et le logiciel de simulation Matlab/Simulink.

Par définition, le compensateur série commandé par thyristor ou en Anglais Thyristor Controlled Series Compensator (TCSC) est un dispositif de compensation série utilisant l'électronique de puissance comme élément de base. Il est connecté en série sur le réseau pour contrôler le transit de puissance.

Le TCSC équilibre les courants de charge et assure également l'amortissement des oscillations de puissance ainsi que la stabilité de la tension. (Mojtaba N., 2001).

$$K = \frac{X_{TCSC}}{X_L} \text{ pour un TCSC} \quad (1)$$

$$X_{TCSC} = \frac{X_C X_{ind}}{X_C + X_{ind}} \quad (2)$$

avec X_{TCSC} est la réactance série du TCSC. Et X_L , X_C , X_{ind} sont les réactances respectives (ligne électrique, inductive et capacitive de TCSC).

Un TCSC comprend une bobine en série et un condensateur mis en parallèle avec des thyristors.

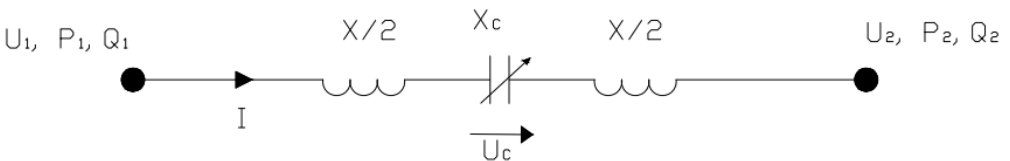


Figure 1 : Schéma équivalent d'un TCSC

X_C Représente l'inductance du condensateur. Les équations des puissances actives et réactives transmises deviennent alors :

$$P=(V_1*V_2)*\sin(\delta)/(X-X_c) \quad (3)$$

$$Q=V_1*(V_1-V_2)*\cos(\delta)/(X-X_c) \quad (4)$$

L'équation dynamique de la réactance variable du TCSC est donnée par la relation suivante :

$$\dot{X}_c(t)=(-X_c+K_c*X_{ref}+K_c*U_c)/T_c \quad (5)$$

La méthodologie adoptée est l'application des modèles dynamiques du réseau électrique, de TCSC ainsi que ses lois de commande pour assurer la stabilisation des systèmes non linéaires.

La meilleure répartition des charges assure l'amplitude de la tension et de la phase pour des conditions de fonctionnement données afin de nous permettre de calculer les puissances générées transitées, y compris les pertes.

La puissance active P transitée entre deux réseaux de tension V1 et V2 connectée par une liaison d'impédance X présente un angle de transport δ . Elle est donnée par l'équation suivante :

$$P=\frac{V_1*V_2}{X}\sin(\delta) \quad (6)$$

A partir de l'équation précédente, il est possible d'augmenter la puissance active transitée en agissant sur l'amplitude de tension, ou par l'angle de transport ou encore sur l'impédance de la ligne.

Dans le cadre de ce travail, nous allons utiliser le modèle d'une machine synchrone qui alimente un réseau infini au travers des lignes et d'un transformateur. (Rafanotsimiva L. F., 2013).

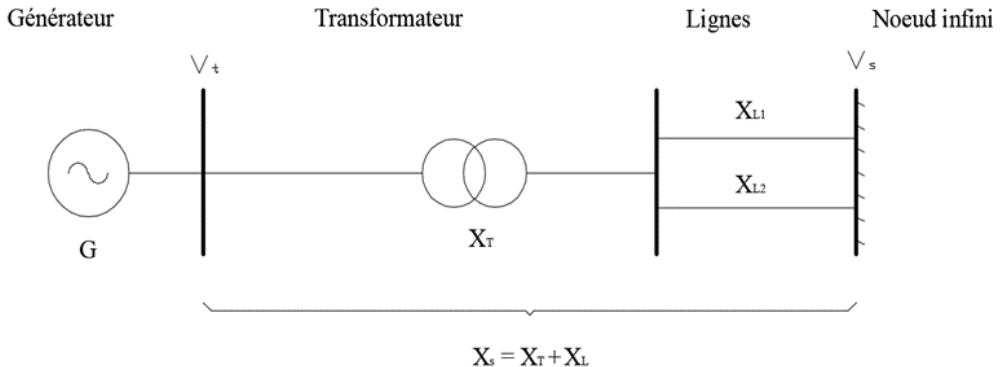


Figure 2 : Modèle d'une machine connectée à un nœud infini

En utilisant un modèle valable pour des perturbations modérées dont les variables d'état sont l'angle de puissance δ , la vitesse relative de rotation électrique ω et la tension interne en quadrature E_q du générateur, la relation devient comme suit :

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{\delta}(t) = \omega(t) \\ \dot{\omega}(t) = -\frac{D}{H} \omega(t) - \frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{x_{ds}} V_s \sin \delta(t) E_q(t) + \frac{\omega_0}{2H} P_{m0} \\ \dot{E}_q(t) = \frac{x_d - x'_d}{x'_{ds}} V_s \sin \delta(t) \omega(t) - \frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} E_q(t) + \frac{x_{ds}}{x'_{ds}} \frac{k_c}{T'_{d0}} U_f(t) \end{array} \right. \quad (7)$$

A la sortie, la tension de jeux de barres du générateur et la puissance électrique transitant dans les lignes, l'équation est la suivante :

$$\begin{aligned} V_t^2(t) &= \frac{x_s^2}{x_{ds}^2} \left[E_q^2(t) + V_s^2 + \frac{2x_d}{x_s} V_s \cos \delta(t) E_q(t) \right] \\ P_e(t) &= \frac{1}{x_{ds}} V_s \sin \delta(t) E_q(t) \end{aligned} \quad (8)$$

Les données utilisées pour la comparaison du résultat obtenu est celui de (Rafanotsimiva L F. 2013). Les paramètres décrivant les éléments du système sont les suivants :

$$f_0 = 50\text{Hz} ; \quad \omega_0 = 314.159\text{rad/s} ; \quad D = 5\text{pu} ; \quad H = 4\text{pusec} ; \quad T'_{d0} = 8\text{sec} ;$$

$$k_c = 200\text{pu} ; \quad x_d = 1.81\text{pu} ; \quad x'_d = 0.3\text{pu} ; \quad x_T = 0.15\text{pu} ; \quad x_{L1} = 0.5\text{pu} ;$$

$$x_{L2} = 0.93\text{pu} ; \quad x_{ds} = x_T + x_d + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1} + x_{L2}} = 2.28518 ;$$

$$x'_{ds} = x_T + x'_d + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1} + x_{L2}} = 0.77518 \quad x_s = x_T + \frac{x_{L1}x_{L2}}{x_{L1} + x_{L2}} = 0.47518 ;$$

$$\max |k_c U_f(t)| = 7\text{pu}.$$

$$\delta_0 = 67.5^\circ (\delta_0 = 1.18\text{rad}) ; \quad P_{m0} = 0.9\text{pu} ; \quad V_{t0} = 1.0\text{pu}$$

RESULTATS

Nous avons étudié un système mono-machine connecté à un jeu de barres infini (ou SMIB : Single Machine Infinite Bus).

Le système comporte une machine synchrone connectée à un jeu de barres infini à travers deux lignes de transport parallèles et un TCSC qui est installé dans la ligne.

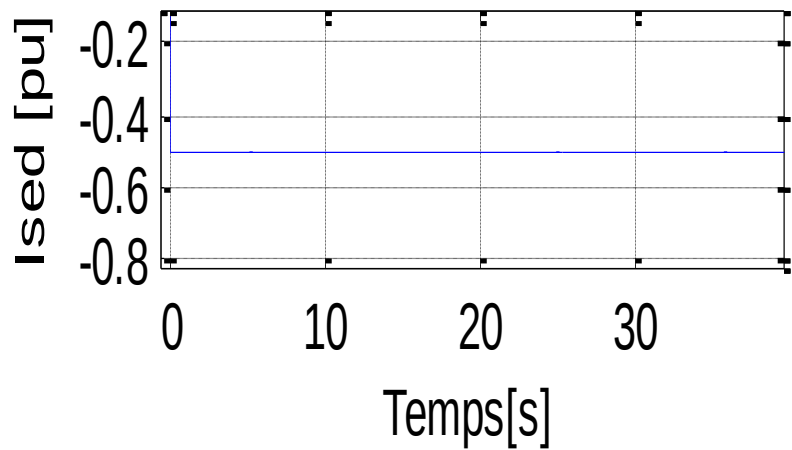


Figure 3 : Courant injecté par le TCSC

Le TCSC injecte le courant fixe qui permet de diminuer l'impédance et la longueur de la ligne électrique.

Etant donné que l'impédance de la ligne a été réduite de X_l à $(X_l - X_c)$, alors le transit de puissance est augmenté.

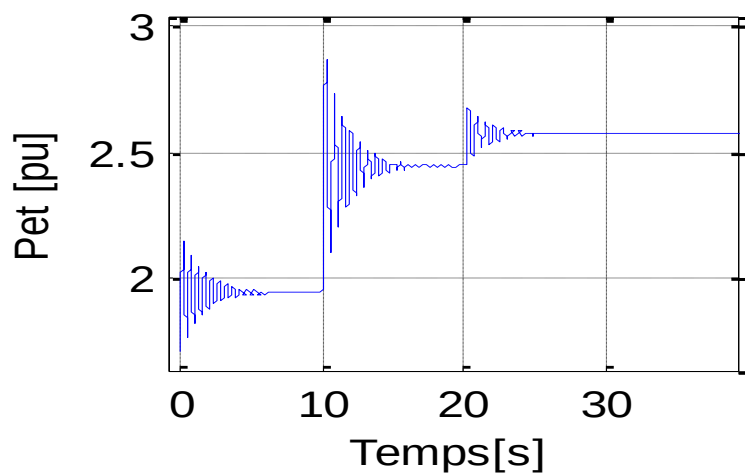


Figure 4 : Puissance transitée dans le réseau avec TCSC

L'injection du courant de 0,5pu (série) dans le réseau illustré dans les figures (3) et (4) a amélioré le transit de la puissance active de 1,8pu à 2,8pu. Ce transfert de puissance s'est stabilisé à partir de 22s.

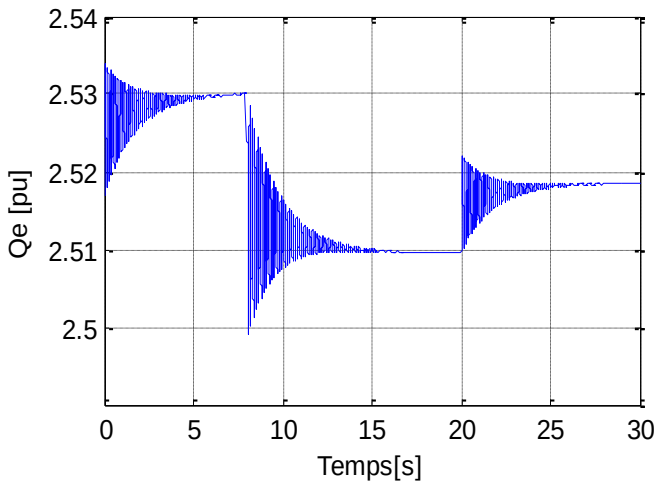


Figure 5 : Puissance réactive Q_e

La puissance réactive Q_e augmente de 2.52 pu à 2.53 pu de 0s à 8s, lorsqu'elle est absorbée par le compensateur (comportement inductif). Et par contre, elle diminue à 2.51 pu jusqu'à 20s (comportement capacitif), lorsqu'elle est fournie par le compensateur. Ces relations sont prises en compte sur la Figure 5.

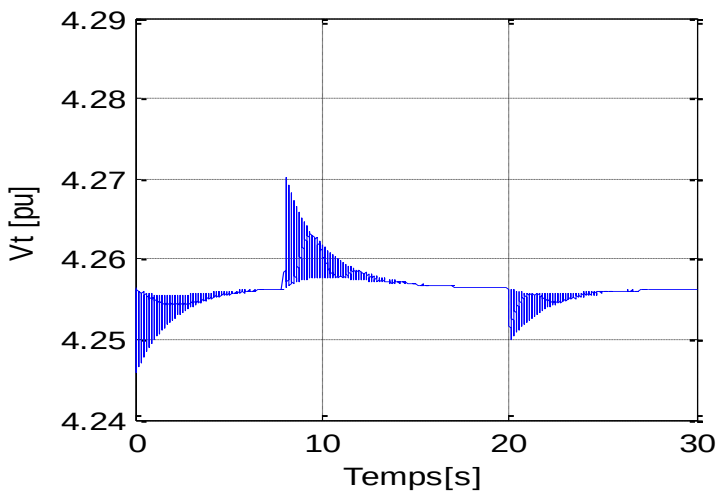


Figure 6 : Tension V_t

Dans la figure 6, Lorsque le réseau n'est pas ou peu chargé, c'est-à-dire que l'impédance de la charge est très élevée, la tension sur la ligne a tendance à monter considérablement.

Le TCSC augmente son impédance caractéristique pour réduire la tension en bout de ligne.

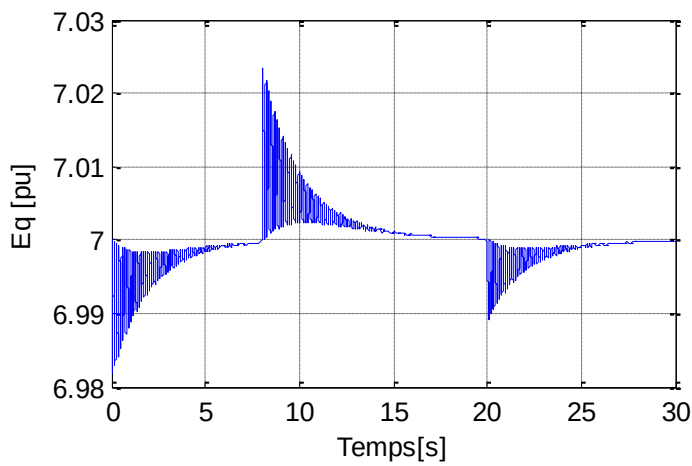


Figure 7 : Tension E_q avec TCSC

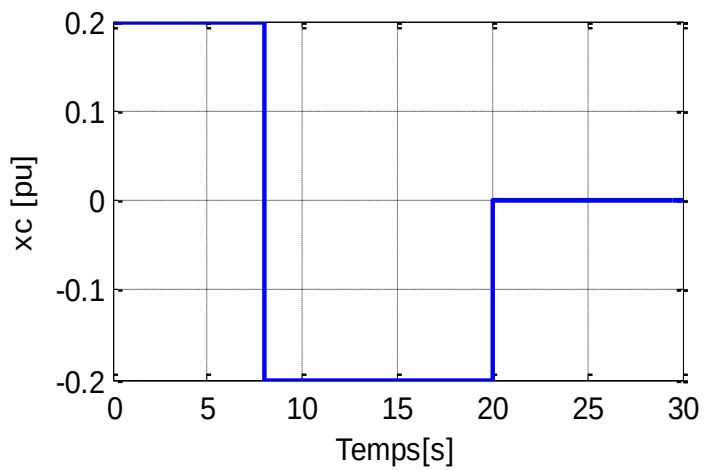


Figure 8 : Réactance X_c du TCSC

Le TCSC utilisé modifie rapidement la capacité de transfert de la puissance réactive, figure 5, dans le réseau SMIB et varie aussi la tension à la sortie du jeu de barre infini ainsi que la tension interne en quadrature de la machine, Figures 6 et 7.

Les grandeurs de sortie mesurées sont améliorées dans le système constitué de l'ensemble réseau SMIB et TCSC en raison de la capacité de stabilisation du

dispositif. Ainsi, la réactance du TCSC peut être fonction du taux de variation des grandeurs d'entrées et les variables à la sortie déclarées. Cela peut être mis en œuvre par un schéma de contrôleur comme le montre la Figure 8.

DISCUSSION

Nous avons constaté qu'une perturbation régulière s'est introduite à deux reprises à $t=10s$ et à $t=20s$.

L'allure de la puissance active transitée est oscillatoire et amortie. Le TCSC améliore considérablement la réponse du système par élimination rapide des oscillations à basse fréquence. Avec l'utilisation d'un compensateur série TCSC, le réseau a pu retrouver le synchronisme et garder sa stabilité en élargissant sa marge de stabilisation.

La compensation de la puissance réactive au niveau de la ligne électrique réduit les pertes et améliore le profil de tension.

Dans la figure 5, la puissance réactive passe de 2,53 pu à 2,50 pu pendant la période t entre 8s à 20s.

Le TCSC agit à t entre 8s à 20s dans la figure 7, la tension interne quadrature de la machine passe de 6,98pu à 7,02pu avec signal d'oscillation.

L'allure de la puissance réactive transitée est oscillatoire et amortie. Le TCSC améliore considérablement la réponse du système par modification rapide des oscillations à basse fréquence. Avec l'utilisation d'un compensateur série TCSC, le réseau a pu retrouver le synchronisme et garder sa stabilité en élargissant sa marge de stabilisation.

Etant donné que le modèle (δ , ω , E_q) a été utilisé, la commande PDC agit plus vite et assure le maintien du point de fonctionnement du réseau.

Sur la base des résultats obtenues, le TCSC inséré sur le réseau électrique donne essentiellement une modification de l'écoulement de puissance et la condition initiale et pour chaque période de temps de la simulation qui montre le point faible de réseau qui nécessite de renforcer.

Dans la Figure 7, nous avons constaté une petite perturbation transitoire parce que la tension aux bornes des thyristors est minimale.

Dans cette catégorie de compensation, le TCSC utilisé dans le réseau sous forme d'éléments variables, et réglables au moyen des thyristors. Dans la figure4, il sert surtout à répartir des flux de puissances entre les lignes électriques de transport

et améliore la stabilité transitoire d'alternateurs, en modifiant la réactance globale de la ligne où il est installé.

CONCLUSION

Les FACTS assurent un contrôle précis, tant sur l'optimisation des transits de puissance dans les installations existantes que sur l'amélioration de la stabilité dynamique du réseau électrique. Ils permettent aussi aux consommateurs industriels de réduire les déséquilibres de charges et de contrôler les fluctuations de tensions créées par des variations rapides de la demande en puissance réactive. Par conséquent, ils agrandissent les productions, réduisent les pertes, les coûts et allongent la durée de vie des équipements.

Cet article présente le schéma de contrôle basé sur un dispositif FACTS type série d'améliorer l'angle de transport de la puissance transitée dans le réseau électrique, ou de modifier la valeur de l'impédance de la ligne électrique.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Ayachi B., Oukadoun A. B., Leuhmi S., Bahri A., (1955). *Amélioration de la stabilité transitoire par l'utilisation des FACTS : UPFC, Université Skikda, Algérie.*
- 2) Besançon G., Georges D., Rafanotsimiva L. F., Razafimahenina J. M., (2012). *Commande backstepping avec contraintes d'un générateur connecté à un réseau électrique, Conférence Internationale Francophone d'Automatique, Grenoble, France.*
- 3) Cong L., Wang Y., and Hill D. J. (2005). *Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC, Electrical Power & Energy Systems, 27:121–130.*
- 4) Dash P. K., Mishra S., (2003). *Damping of multimodal power system oscillations by FACTS devices using non-linear Takagi-Sugeno fuzzy controller, Electrical Power and Energy Systems 25:481–490.*
- 5) Mojtaba N. (2001). *A Robust Control Strategy for Shunt and Series Reactive Compensators to Damp Electromechanical Oscillations, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.16, No.4*
- 6) Panda S., Padhy N. P. (2007). *Power System with PSS and FACTS Controller: Modelling, Simulation and Simultaneous Tuning Employing Genetic Algorithm, World Academy of Science, Engineering and Technology 27.*

- 7) Panda S., Swain S. C., Rautray P. K., and Malik R. K. (2010). *Design and analysis of SSSC-based supplementary damping controller, Simulation Modelling Practice and Theory*, Vol.18, no.9, pp.1199-121.,
- 8) Rafanotsimiva L. F. (2013). *Etude de commandes non linéaires pour réseaux électriques- Application à un système SMIB*, Thèse de doctorat, Université d'Antsirananana.

COMPORTEMENT CHAOTIQUE ET STABILITE D'UN SYSTEME SMIB

par

TSARALAHY Zazad^(1, 2, 3), RAZAFINDRAKOTO Eliasy^(1, 2),
RAFANOTSIMIVA Liva⁽²⁾, SAMBATRA Eric⁽²⁾

(1) Ecole Doctorale Thématique Energies Renouvelables et Environnement, Université d'Antsiranana, Madagascar

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

(3) Laboratoire des Machines Electriques, Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antsiranana, Madagascar

RESUME

Le chaos représente un des aspects non linéaires d'un système dynamique. Dans le cadre de ce travail, le comportement chaotique d'une machine synchrone connectée sur un réseau de puissance infinie, appelée système SMIB (de l'anglais Single Machine Infinite Bus) a été examiné. La désignation systématique du contrôleur d'excitation non linéaire est présentée par ce système d'énergie SMIB représentée par son système d'équations dynamiques non linéaire. Cette approche peut être appliquée pour construire un contrôleur non linéaire dans cette application. Ce qui satisfait les conditions nécessaires et suffisantes pour la linéarisation exacte en boucle de retour. Pour obtenir la condition nécessaire et suffisante pour l'existence du chaos, la méthode de Melnikov a été utilisée. La condition nécessaire en vertu de laquelle le chaos existe dans un système non linéaire a été obtenue. La contribution principale de ce travail se situe dans le fait qu'il fournit les conditions nécessaires simples pour l'existence du chaos ou l'état suffisant pour l'éviter.

Mots-clés : Chaos, Linéarisation, Machine synchrone, Melnikov, Rétroaction

ABSTRACT

Chaos is one of the nonlinear aspects of a dynamic system. As part of this work, the chaotic behavior of a synchronous machine connected to a network of infinite power, called the SMIB (from English Single Machine Infinite Bus) system examined. The systematic designation of the nonlinear excitation controller presented by this SMIB energy system represented by its system of nonlinear dynamic equations. This approach can be applied to build a nonlinear controller in this application. This satisfies the necessary and sufficient conditions for the

feedback linearization. To obtain the necessary and sufficient condition for the existence of chaos, we used the Melnikov's method. The necessary condition under which chaos exists in a nonlinear system has been obtained. The main contribution of this work lies in the fact that it provides the simple necessary conditions for the existence of chaos or the state sufficient to avoid it.

Key-words : Chaos, Linearization, Synchronous machine, Melnikov, Feedback

INTRODUCTION

Avec le développement rapide de l'économie et l'augmentation de la consommation d'énergie, les systèmes d'alimentation électrique sont devenus plus énormes et plus compliqués. Les problèmes de stabilité sont devenus plus complexes à mesure que les interconnexions deviennent plus étendues (Ajit Kumar, 2018). Le comportement chaotique est un comportement dynamique non linéaire, dû au changement de l'état stable vers un état instable, qui peut endommager des matériels concernés. Vis à vis de l'importance de l'énergie électrique dans les industries ou sur la centrale électrique, il est important de savoir quand ce comportement peut se former dans un système d'énergie électrique, et comment peut-on l'éviter pour qu'il n'y ait pas de défaillance sur la génératrice ou sur d'autres matériels afin de ne pas avoir des pertes sur l'économique et sur les utilisateurs. Une perturbation peut conduire le système électrique à perdre sa stabilité partielle ou totale. Par conséquent, de nombreux chercheurs se concentrent sur la stabilité des systèmes d'alimentation électrique dans les études scientifiques et d'ingénierie. Dans le présent article, on étudie le comportement chaotique d'une machine synchrone à pôles saillants connecté sur un réseau de puissance infinie.

On va chercher les conditions d'existence du chaos dans un système SMIB non linéaire à l'aide de la méthode de Melnikov et une simulation numérique, et de le résoudre pour qu'on puisse voir ce comportement avec la variation de la charge ou de la perturbation. Zhu et coll. (M. Jazaeri et M. Khatibi, 2009) ont réalisé une analyse de bifurcation de Hopf pour un système d'alimentation SMIB à résonance subsynchrone (SSR) en appliquant le théorème de bifurcation de Hopf. En outre, la méthode de Melnikov fonctionne efficacement pour discuter des bifurcations des orbites périodiques et de l'orbite homo-(hétéro) cliniques pour les systèmes dynamiques.

Dans le cadre de cette, a été utilisé la linéarisation par boucle de retour (Feedback Linearization) (Jyo Deshmukh, 2019), (Pratik Vernekar, Zhongkui Wang et *al.*, 2015), pour contrôler le système considéré comme SISO (Single Input Single Output) après la linéarisation, qui sera résolue à l'aide du logiciel de simulation MATLAB.

MATERIELS ET METHODES

Comportement chaotique sur un système d'énergie

Un système d'énergie électrique est un système dynamique non linéaire. En fait, un certain nombre d'instabilités dynamiques ou des oscillations ont été observées dans un système d'énergie. L'un de ces phénomènes observés dans un système d'énergie est compliqué, imprévisible, et le comportement apparemment aléatoire ne semble avoir aucune relation évidente entre la cause et l'effet. Ce genre de phénomène est souvent appelé le chaos. Le chaos signifie un état de désordre, et en théorie du chaos, la limite est définie avec précision. Pour qu'un système dynamique soit classifié comme chaotique, il doit avoir les propriétés suivantes :

- Etre sensible aux conditions initiales ;
- Ses orbites périodiques doivent être denses.

La méthode de Melnikov nous fournit un outil analytique pour avoir les conditions nécessaires pour le chaos et ce, en utilisant l'analyse de perturbation. Le théorème approprié déclare que les bifurcations subharmoniques successives (dédoublment de périodes) mèneront au chaos.

Théorie de la méthode de Melnikov

Considérons le système dynamique perturbé suivant :

$$\dot{x} = f(x) + \varepsilon \cdot g(x) \quad (1)$$

Avec : $x(t)$ un variable d'état, $f(x)$ est la fonction continue différentiable, $g(x,t)$ est la fonction périodique dans le temps de période T , et ε est le coefficient de perturbation du système d'équation.

Le système $\dot{x} = f(x)$ est un système Hamiltonien, il existe un Hamiltonien $H(x_1, x_2) = C$, où C est une constante de telle sorte que

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} f_1(x) \\ f_2(x) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\delta}{\delta x_1} H(x_1, x_2) \\ \frac{\delta}{\delta x_2} H(x_1, x_2) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Pour la partie non perturbée du système, les conditions suivantes tiendront :

- a) Le système $\dot{x} = f(x)$ a une orbite homoclinique $\Gamma_Z^\theta = \{q^\theta(t), \forall t \in]-\infty, +\infty[\}$ passant par un point de selle hyperbolique à x_0 .
- b) Le système $\dot{x} = f(x)$ a une famille à un paramètre d'orbite périodique

$\Gamma^\theta = \{q^\theta(t), \forall t \in]-\infty, +\infty[\}$ de la période T_α à l'intérieur de l'orbite homoclinique, $\frac{q^\alpha(0)}{\delta\alpha} \neq 0$

Pour le système perturbé dans l'équation (1), la fonction chaotique de Melnikov $M(t_0)$ peut être définie par :

$$M(t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} [f(q^0(t)) \wedge g(q^0(t).t + t_0)].dt \quad (3)$$

Où le produit extérieur des deux fonctions vectorielles est défini comme

$$f \wedge g = f_1 \cdot g_2 - f_2 \cdot g_1$$

Théorème 1 : Si la fonction chaotique de Melnikov (3) a un zéro simple pour $t_0 \in [0, T]$ alors, pour un petit $\varepsilon > 0$, la stabilité et la variation instables $w^s(x_\varepsilon)$ et $w^u(x_\varepsilon)$ de la carte Poincaré ρ_ε se coupent transversalement ; cela équivaut à dire que ρ_ε a un point homoclinique transversal qui est la condition nécessaire à l'existence du chaos dans le sens de Smale-Birkhoff.

Dans la prétention que la période de la fonction $g(x, t)$ de la perturbation est T l'orbite avec la période mT s'appelle subharmonique dans le système dynamique dans l'équation (3), si une famille des orbites $q^\alpha(t)$ se trouvant en dessous de Γ^0 sont périodiques, de période $T_\alpha = mT/n$ de même, la fonction subharmonique de Melnikov est définie comme :

$$M^{m/n}(t_0) = \int_0^{mT} f(q^\alpha(t)) \wedge g(q^\alpha(t), t + t_0).dt \quad (4)$$

Modèle du réseau SMIB considéré

Beaucoup de travaux ont été faits par rapport à la commande non linéaire des réseaux électriques [3], [7]. Un réseau SMIB est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau infini au travers de lignes et d'un transformateur comme indique la figure 1 ci-dessous.

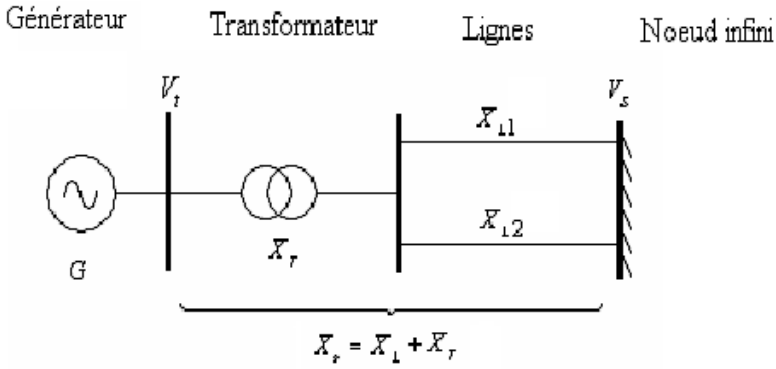


Figure 1 : Modèle d'une machine connectée à un nœud infini

Le modèle mathématique du réseau SMIB est défini par :

$$\begin{aligned}
 \frac{d\delta}{dt} &= \omega - \omega_0; \\
 \frac{d\omega}{dt} &= \frac{\omega_0}{2H} \left[P_m + \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) v_t^2 \cdot \sin 2\delta - T'_{q0} \frac{1}{x_q} \left(1 - \frac{x'_q}{x_q} \right) v_t^2 \cdot \omega \cdot \cos^2 \delta - \frac{1}{x'_d} v_t \cdot e'_q \cdot \sin \delta \right] \\
 \frac{de'_q}{dt} &= \frac{1}{T'_{d0}} \left[e_{fd} - \frac{x_d}{x'_d} e'_q + \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} v_t \cdot \cos \delta \right]; \quad (5)
 \end{aligned}$$

Pour simplifier, le système est défini comme suit :

$$\begin{aligned}
 x_1 &= \delta, x_2 = \omega - \omega_0, x_3 = e'_q, P_0 = \frac{\omega_0}{2H} P_m; P_1 = \frac{\omega_0}{2H} \frac{v_t}{x'_d}; \\
 P_2 &= \frac{\omega_0}{2H} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{x'_q} - \frac{1}{x'_d} \right) v_t^2; P_3 = \frac{1}{T'_{d0}} \frac{x_d}{x'_d}; \\
 P_4 &= \frac{1}{T'_{d0}} \frac{(x_d - x'_d)}{x'_d} v_t; D = \frac{\omega_0}{2H} T'_{q0} \frac{1}{x_q} \left(1 - \frac{x'_q}{x_q} \right) v_t^2; u = E_{fd}. \quad (6)
 \end{aligned}$$

On obtient alors l'expression (1) avec :

$$\begin{aligned}
 x &= \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}; f(x) = \begin{pmatrix} x_2 \\ P_0 - P_1 x_3 \cdot \sin x_1 + P_2 \cdot \sin 2x_1 - D \cdot x_2 \cos^2 x_1 \\ -P_3 x_3 + P_4 \cos x_1 \end{pmatrix}; \\
 g(x) &= \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T'_{d0} \end{pmatrix} \quad (7)
 \end{aligned}$$

Pour l'étude du comportement chaotique, l'équation de troisième ordre à une équation différentielle de seconde degré doit être réduite. La source des non linéarités du système est due à l'accouplement entre la partie électrique et la partie mécanique du système. Pour un système SMIB, l'équation d'oscillation peut se représenter comme suit :

$$M \frac{d^2 \delta(\tau)}{d\tau^2} + D(\delta) \frac{d\delta(\tau)}{d\tau} = P_o - P_e - \sum_{i=1}^l P_i \cdot \sin(\omega'_i \cdot \tau); \quad (8)$$

L'interprétation physique de cette équation est que l'accélération angulaire de la génératrice synchrone est proportionnelle à la différence entre la puissance mécanique de la génératrice, la puissance électrique absorbée par le réseau de puissance infinie et la charge. Le coefficient variable de l'amortissement de la machine est également pris en compte dans cette équation, qui est représentée comme suit :

$$\begin{aligned} D(\delta) &= \frac{v_0^2 (x'_q - x''_q) T'_{q0}}{(x'_q + x)^2} \cos^2 \delta + \frac{v_0^2 (x'_d - x''_d) T'_{d0}}{(x'_d + x)^2} \sin^2 \delta; \\ &= D_1 \cos^2 \delta + D_2 \sin^2 \delta; \\ &= D_2 + (D_1 - D_2) \cos^2 \delta; \end{aligned} \quad (9)$$

Pour une machine synchrone à pôles saillants connectée sur une ligne avec une réactance x et une susceptance B , la puissance électrique générée peut être exprimée comme :

$$P_e = P_M \sin \delta + P_s \sin 2\delta \quad (10)$$

Avec

$$\begin{aligned} P_M &= \frac{v_0 \cdot E'_q}{(x'_d + x - 2x \cdot x'_d \cdot B)}; \\ P_s &= \frac{v_0^2 (x'_d - x_q)}{[2(x'_d + x - x \cdot x'_d \cdot B)(x_q + x - x \cdot x'_d \cdot B)]}; \end{aligned} \quad (11)$$

P_M représente la plus grande quantité de l'énergie produite, et P_s est due au générateur saillant. Pour les machines spécifiques, $P_s \ll P_M$ tiendra.

Pour plus de commodité sur l'analyse théorique, les transformations suivantes sont définies :

$$x_1 = \delta; \frac{dx_1}{d\tau} = \sqrt{\frac{P_M}{M}} \cdot x_2; t = \sqrt{\frac{P_M}{M}} \cdot \tau; \omega_i = \omega'_i \sqrt{\frac{P_M}{M}} \quad (12)$$

L'équation d'oscillation (8) devient un système d'équation non linéaire suivant :

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\sin x_1 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{P_0}{P_M} - \frac{D(x_1)}{\sqrt{P_M M}} x_2 - \frac{P_s}{P_M} \sin 2x_1 - \sum_{i=1}^l \frac{P_i}{P_M} \sin \omega_i t \end{bmatrix} \quad (13)$$

Posons $\varepsilon = \frac{P_s}{P_M}$ avec $\varepsilon \neq 0$. Le système devient alors :

$$\begin{bmatrix} \frac{dx_1}{dt} \\ \frac{dx_2}{dt} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_2 \\ -\sin x_1 \end{bmatrix} + \varepsilon \begin{bmatrix} 0 \\ b - u(1 + d \cdot \cos^2 x_1) \cdot x_2 - \sin 2x_1 - \sum_{i=1}^l a_i \cdot \sin \omega_i t \end{bmatrix} \quad (14)$$

$$\text{Avec } b = \frac{P_0}{P_s}; u = \frac{D_2}{P_s} \sqrt{\frac{P_M}{M}}; d = \frac{D_1 - D_2}{D_2}; a_i = \frac{P_i}{P_s}.$$

Le système a la forme usuelle pour l'analyse de la perturbation $\dot{x} = f(x) + \varepsilon \cdot g(x, t)$; où $x(t) \in \mathbb{R}^2$ et la variable d'état, $f(x) \in \mathbb{R}^2$ est une fonction dérivable continue et $g(x, t) \in \mathbb{R}^2 \times \mathbb{R}$ est une fonction périodique dans t de période T .

Application de la méthode de Melnikov

Basée sur la définition de la fonction chaotique de Melnikov, on va trouver la condition nécessaire pour l'existence du chaos sur le système SMIB. Considérons le système Hamiltonien imperturbable suivant :

$$\begin{aligned} \frac{dx_1}{dt} &= x_2 \\ \frac{dx_2}{dt} &= -\sin x_1 \end{aligned} \quad (15)$$

L'Hamiltonien est alors :

$$H(x_1, x_2) = \frac{1}{2} x_2^2 - \cos x_1 = h \quad (16)$$

Ce système a un centre à l'origine (0,0) et deux selles à $(\pm\pi, 0)$, Avec $h = 1$, deux orbites homocliniques peuvent être obtenues.

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2 = \pm \sqrt{2(h + \cos x_1)} = \pm \sqrt{2} \sqrt{1 + \cos x_1} \quad (17)$$

On a $q_{\pm}^0$

$$\begin{aligned} x_{1\pm} &= \pm 2. \arcsin(\tanh t); \\ x_{2\pm} &= \pm 2. \operatorname{sech} t; \end{aligned} \quad (18)$$

En appliquant l'équation (3), on obtient l'équation chaotique de Melnikov comme suit :

$$M_+(t_0) = \int_{-\infty}^{+\infty} x_{2+}(t) [b - u. x_{2+}(t) - u. d. x_{2+}(t). \cos^2 x_{1+}(t) - c. \sin 2x_{1+}(t) - \sum_{i=1}^l a_i. \sin \omega_i(t + t_0)] dt; \quad (19)$$

Après l'intégration, on a :

$$M_+(t) = 2\pi. b - 8u - \frac{56}{15}ud - 2. \sum_{i=1}^l \frac{a_i \pi}{\cosh\left(\frac{\pi \omega_i}{2}\right)} \sin \omega_i t_0 \quad (20)$$

Puisque $\sin \omega_i t_0 \leq 1$, posons $M_+(t_0) = 0$ et en substituant les rapports des paramètres de l'équation (13) dans l'équation ci-dessus, la possibilité de l'existence du chaos est obtenue par la condition suivante :

$$\left| P_0 - \frac{1}{15\pi} \sqrt{\frac{P_M}{M}} (28D_1 + 32D_2) \right| \leq \sum_{i=1}^l P_i \operatorname{sech} \frac{\omega_i \pi}{2} \sqrt{\frac{M}{P_M}} \quad (21)$$

Donc cette équation est la condition nécessaire pour que le chaos apparaisse.

La linéarisation en boucle de retour (Feedback linearization)

La linéarisation en boucle de retour (Feedback) est une des approches pour concevoir les régulateurs non linéaires. L'idée fondamentale de la linéarisation d'un régulateur non linéaire est de commander la non linéarité dans un système non linéaire de telle sorte que la dynamique en circuit fermé apparaisse sous une forme linéaire. Puis basé sur l'équation linéaire, on peut facilement concevoir le contrôleur. Cette idée est représentée clairement dans le schéma fonctionnel de linéarisation en boucle de retour sur la Figure 2.

Il y a deux boucles dans le système de commande non linéaire. Etant donné le système non linéaire original $\dot{x} = f(x, u)$, la boucle externe doit trouver la transformation non linéaire appropriée $z = T(x)$, et dérive la loi de commande linéaire $v = w(K, z)$. Avec la transformation obtenue et la loi de commande, la boucle intérieure est employée pour commander la non linéarité du système original et stabiliser le système sous l'entrée $u = \alpha(x, v)$.

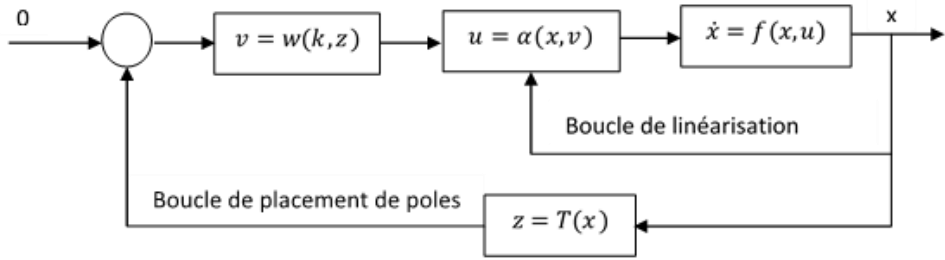


Figure 2 : Schéma fonctionnel de linéarisation en boucle de retour

On va calculer les paramètres du contrôleur en boucle de retour. Le régulateur sera développé pour le système réduit de troisième ordre.

On calcule les champs de vecteurs $g, ad_f g, \dots, ad_f^{n-1} g$.

En réécrivant l'équation (6) :

$$f(x) = \begin{pmatrix} x_2 \\ P_0 - P_1 x_3 \cdot \sin x_1 + P_2 \cdot \sin 2x_1 - D \cdot x_2 \cos^2 x_1 \\ -P_3 x_3 + P_4 \cos x_1 \end{pmatrix};$$

$$g(x) = \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ 1/T'_{d0} \end{pmatrix} \quad (22)$$

On obtient

$$ad_f g = [f, g] = \nabla f - \nabla g = \begin{bmatrix} 0 & \frac{P_1 \sin(x_1 - x_{10})}{T'_{d0}} & \frac{P_3}{T'_{d0}} \end{bmatrix}^T \quad (23)$$

$$ad_f^2 g = \begin{bmatrix} \frac{-P_1 \sin(x_1 - x_{10})}{T'_{d0}} \\ \frac{P_1 x_2 \cos(x_1 + x_{10}) + DP_1 \sin(x_1 + x_{10}) \cos^2(x_1 + x_{10}) + P_1 P_3 \sin(x_1 + x_{10})}{T'_{d0}} \\ \frac{P_3^2}{T'_{d0}} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Vérification de la contrôlabilité et de l'involutivité.

On exprime la matrice de contrôlabilité comme suit : $[g, ad_f g, ad_f^2 g]$

Il est facile de voir que cette matrice est de troisième rang, qui implique que le système original (8) est contrôlable, si $\sin(x_1 + x_{10}) \neq 0$.

Théorème 2 : Théorème de la linéarisation en boucle de retour

Un système non linéaire est exactement linéarisable via la boucle de retour si, et seulement si, il existe une région Ω telle que les conditions suivantes sont satisfaites :

- Le champ de vecteurs $(g, ad_f g, \dots, ad_f^{n-1} g)$ est complètement indépendant,
- L'ensemble $(g, ad_f g, \dots, ad_f^{n-2} g)$ est involutif dans Ω .

L'involutivité signifie que le crochet de Lie de chaque paire de vecteurs peut être exprimé comme une combinaison linéaire de l'ensemble de vecteurs initiaux.

$$[g, ad_f g] = \nabla ad_f g \cdot g - \nabla g \cdot ad_f g = [0 \quad 0 \quad 0]^T \quad (25)$$

C'est-à-dire que $\{g, ad_f g\}$ sont involutives. Donc, les deux conditions du théorème 2 sont satisfaites. Théoriquement, on peut tirer la transformation non linéaire $z = T(x)$.

Calcul de la transformation non linéaire

Supposons qu'il existe une transformation non linéaire $z = T(x)$ et une entrée spécifique.

$u = \alpha(x) + \beta(x)v$. On note que $z = T(x)$ peut être exprimé sous forme de champs de vecteurs : $T(x) = [T_1(x), T_2(x), \dots, T_n(x)]^T$.

On a alors :

$$\dot{z}_1 = \frac{dT_1}{dt} = \frac{\partial T_1}{\partial x} \frac{\partial x}{\partial t} = \frac{\partial T_1}{\partial x} (f + g \cdot u) = \frac{\partial T_1}{\partial x} f + \frac{\partial T_1}{\partial x} g \cdot u = L_f T_1 + (L_g T_1) \cdot u = T_2 \quad (26)$$

De même :

$$\begin{aligned} \dot{z}_2 &= \frac{dT_2}{dt} = \frac{\partial T_2}{\partial x} f + \frac{\partial T_2}{\partial x} g \cdot u = L_f T_2 + (L_g T_2) \cdot u = T_3 \\ &\vdots \\ \dot{z}_{n-1} &= \frac{dT_{n-1}}{dt} = \frac{\partial T_{n-1}}{\partial x} f + \frac{\partial T_{n-1}}{\partial x} g \cdot u = L_f T_{n-1} + (L_g T_{n-1}) \cdot u = T_n \\ \dot{z}_n &= \frac{dT_n}{dt} = \frac{\partial T_n}{\partial x} f + \frac{\partial T_n}{\partial x} g \cdot u = L_f T_n + (L_g T_n) \cdot u = v \end{aligned} \quad (27)$$

On a :
$$z = T(x) = \begin{bmatrix} x_1 \\ L_f T_1 \\ L_f^2 T_1 \end{bmatrix} \quad (28)$$

d'où

$$z = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ P_0 - P_1(x_3 + x_{30}) \sin(x_1 + x_{10}) + P_2 \sin 2(x_1 + x_{10}) - D x_2 \cos^2(x_1 + x_{10}) \end{bmatrix} \quad (29)$$

Ce qui donne :

$$\begin{aligned} x_1 &= z_1 \\ x_2 &= z_2 \\ x_3 &= -\frac{z_3 - (P_0 + P_2 \sin 2(z_1 + x_{10}) - D z_2 \cos^2(z_1 + x_{10}))}{P_1 \sin(z_1 + x_{10})} - x_{30} \end{aligned} \quad (30)$$

Si $\sin(z_1 + x_{10}) \neq 0$, la fonction dérivée $T(x)$ est difféomorphisme.

Dérivation de la loi de commande

La loi de commande non linéaire de la boucle de retour sous la forme $u = \alpha(x) + \beta(x).v$ est dérivable. En combinant les équations (26, 27), on obtient :

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= L_f T_1 = z_2 \\ \dot{z}_2 &= L_f^2 T_1 = z_3 \\ &\vdots \\ \dot{z}_{n-1} &= L_f^{n-1} T_1 = z_n \\ \dot{z}_n &= L_f^n T_1 + (L_g L_f^{n-1} T_1)u = v \end{aligned} \quad (31)$$

La solution de la dernière équation nous rapporte la loi de commande de la boucle de retour :

$$u = \alpha(x) + \beta(x).v = -\frac{L_f^n T_1}{L_g L_f^{n-1} T_1} + \frac{1}{L_g L_f^{n-1} T_1} v \quad (32)$$

Cette loi de commande est calculée en utilisant la formule

$$u = \alpha(x) + \beta(x).v = \frac{v - L_f^3 T_1}{L_g L_f^2 T_1} \quad (33)$$

Avec $L_g L_f^2 T_1 = -P_1 \sin(x_1 + x_{10})$

$$\begin{aligned}
L_f^3 T_1 = & -P_1 x_2 (x_3 + x_{30}) \cdot \cos(x_1 + x_{10}) + 2 \cdot P_2 x_2 \cos 2(x_1 + x_{10}) + \\
& D x_2^2 \sin 2(x_1 + x_{10}) - D \cos^2(x_1 + x_{10}) [P_0 - P_1 (x_3 + x_{30}) \sin(x_1 + x_{10}) + \\
& P_2 \sin 2(x_1 + x_{10}) - D x_2 \cos^2(x_1 + x_{10})] - P_1 \sin(x_1 + x_{10}) [-P_1 (x_3 + \\
& x_{30}) + P_4 \cos P_1 \sin(x_1 + x_{10})] \qquad \qquad \qquad (34)
\end{aligned}$$

Le contrôleur non linéaire est obtenu, basé sur le système de troisième ordre sur l'équation (5).

RESULTATS

Résolution pour voir le comportement chaotique

Pour montrer comment le système évolue d'un état d'opération à un autre, il faut changer le niveau de la perturbation externe de charge P_i , alors que les autres paramètres de système sont gardés fixes. Liées aux approches numériques, il y a plusieurs techniques généralement utilisées comme : le portrait de phase, la carte de Poincaré et les exposants de Lyapunov. Le portrait de phase est appliqué pour analyser ce système SMIB.

Dans la simulation numérique, sont considérées les conditions initiales $\begin{pmatrix} x_1(0) \\ x_2(0) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0,5 \\ 0 \end{pmatrix}$.

Tableau 1 : Données des paramètres de la génératrice synchrone

Xd	0,9 p.u
Xq	0,7 p.u
x'd	0,2 p.u
x'q	0,2 p.u
T'do	5,00 s
T'qo	0,13 s
Vo	1 p.u
X	0,18 p.u
Omeg_o	377 rad/s

Pour obtenir les images complètes d'un portrait de phase, 5 cas sont récapitulés dans le tableau suivant avec la charge externe augmentée :

Tableau 2 : Cas typiques et les niveaux de charges correspondantes

Niveau de charge	Cas 1	Cas 2	Cas 3	Cas 4	Cas 5
P_i	0,0	0,1	0,197	0,2295	0,24205
Résultat	Stable	Période 1	Période 2	Période 4	Chaos

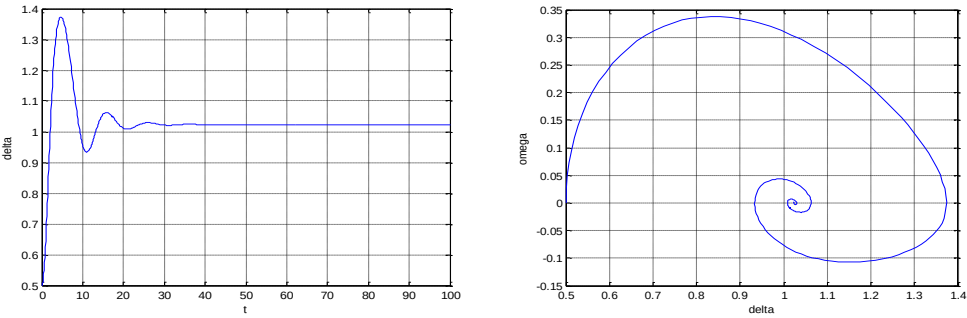


Figure 3 : Système asymptotiquement stable avec $P_i = 0,0[p.u]$

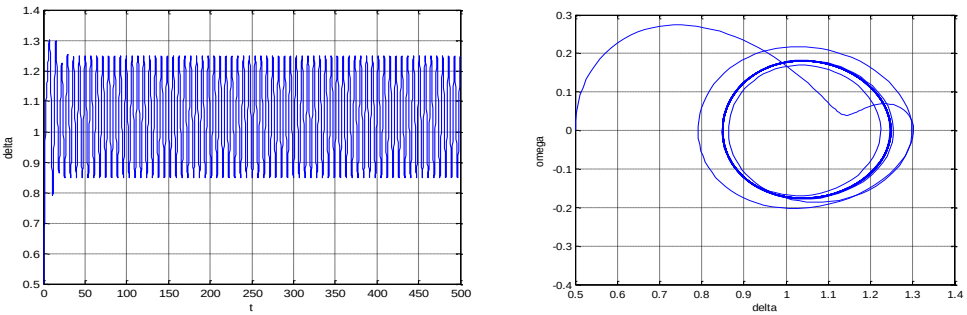


Figure 4 : Réponse avec la période 1 du système avec $P_i = 0,1[p.u]$

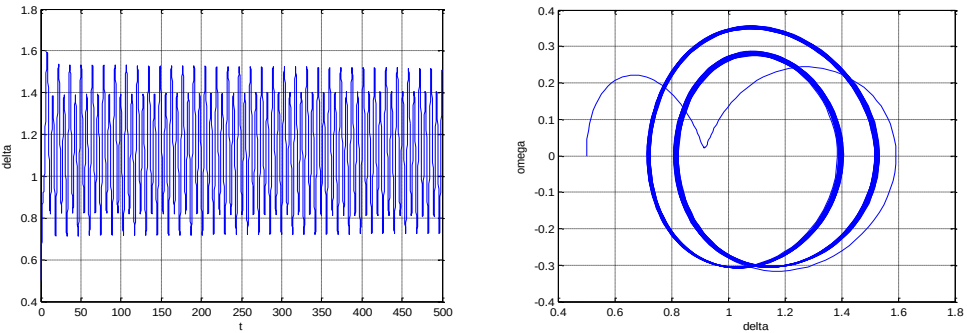


Figure 5 : Réponse avec la période 2 du système $P_i = 0,197[p.u]$

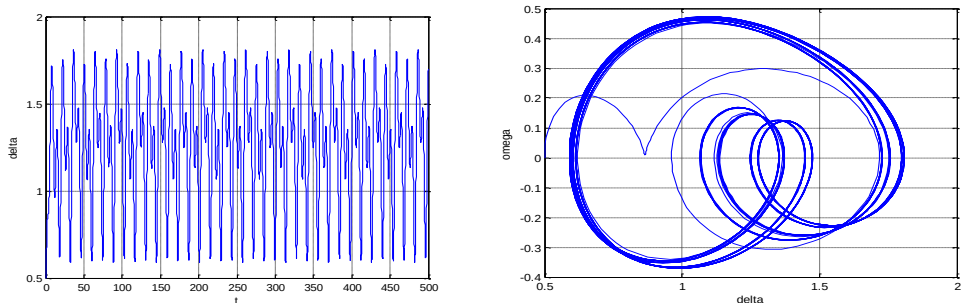


Figure 6 : Réponse avec la période 4 du système avec $P_t = 0,2295[p.u]$

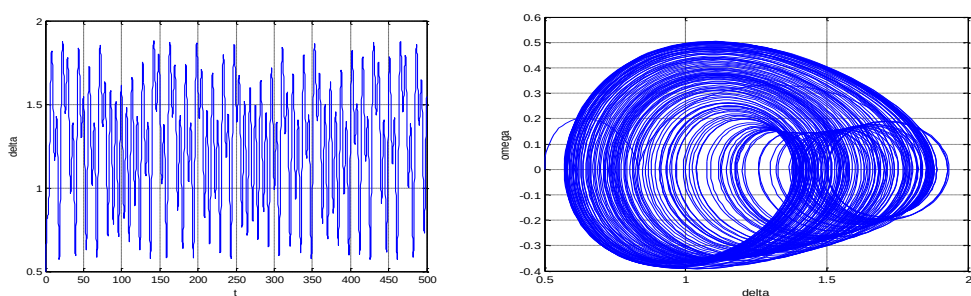


Figure 7 : Réponse du système en comportement chaotique $P_t = 0,24205[p.u]$

Sur les figures ci-dessus, les a) nous montrent l'allure de l'angle de la machine en fonction de temps, et les b) l'allure de la vitesse en fonction de l'angle.

Simulation de la stabilité par linéarisation en boucle de retour

Pour construire ce contrôleur, le logiciel Simulink sur Matlab a été utilisé à l'aide du schéma bloc et ce à partir des différentes équations qui constituent ce contrôleur. Ci-dessous le schéma équivalent au schéma du contrôleur non linéaire en boucle de retour.

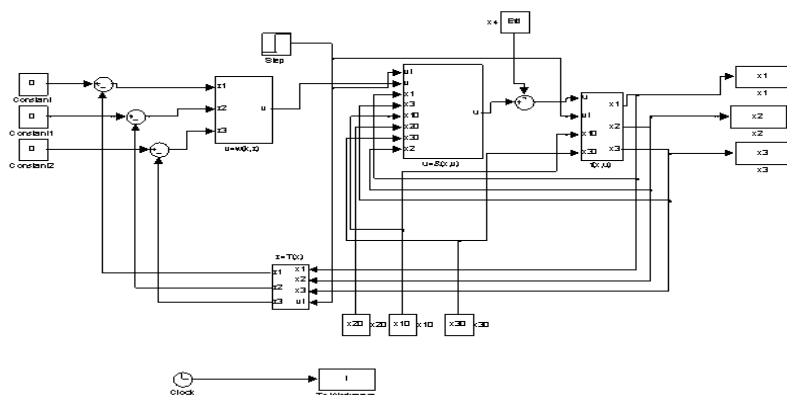


Figure 8 : Schéma bloc de la linéarisation en boucle de retour

Pour la simulation, la perturbation a été présentée par une augmentation de tension sur le bus infini v_t de 1,0 à 1,2 au temps $t=1$ [s].

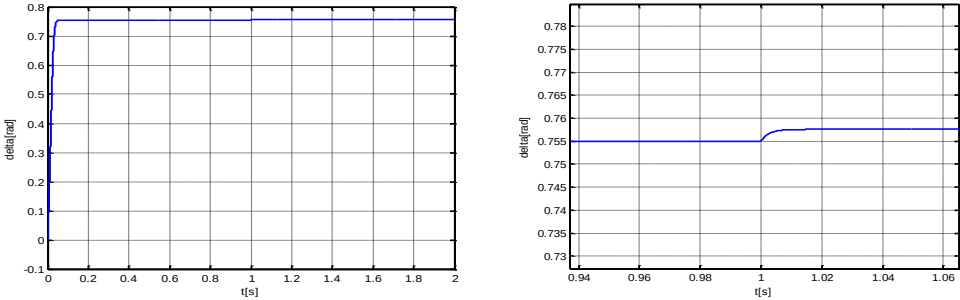


Figure 9 :Aallure de l’angle de la machine en fonction de temps

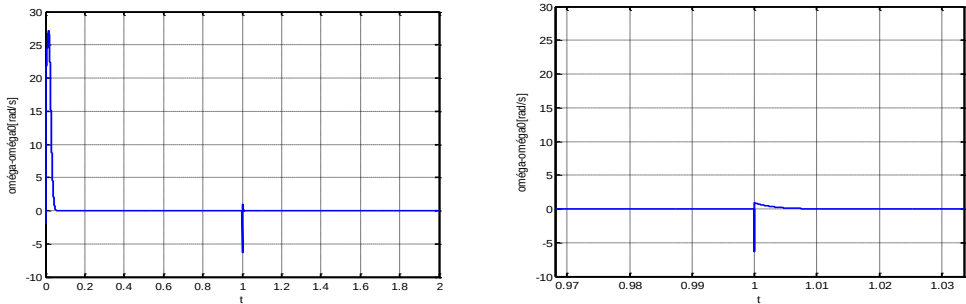


Figure 10 : Allure de la vitesse en fonction de temps

La Figure109 montre la réponse du système basé sur le modèle non linéaire de troisième ordre après la perturbation sur la tension au réseau infini. A $t=1$ [s], la tension v_t est augmentée de 0,2 [p.u]. L’on peut observer que la vitesse du système SISO a été stabilisée en employant la linéarisation en boucle de retour.

DISCUSSION

La méthode de Melnikov est utilisée pour donner la valeur seuil d’occurrence de mouvement chaotique. Dans le système considéré, il existe le phénomène de bifurcation en cascade doublant la période au chaos induit par l’excitation externe. Ces résultats obtenus peuvent donner une compréhension globale des comportements dynamiques complexes de ce système. L’approche peut être appliquée à la dérivation du contrôleur non-linéaire pour d’autres systèmes non-linéaires qui satisfont les conditions nécessaires et suffisantes.

On voit bien que le contrôleur non linéaire supporte bien le système. La question qui se pose est : jusqu’à quel moment ce contrôleur peut le supporter ? La durée de vie da la machine joue aussi un rôle important jusqu’à atteindre le comportement chaotique.

CONCLUSION

L'étude a porté sur les comportements dynamiques d'une machine synchrone connectée à un bus infini à une seule machine classique en appliquant une analyse théorique et des simulations numériques. Dans la figure (3), le système est asymptotiquement stable quand il n'y a aucune perturbation de charge externe, avec $P_i = 0,0$.

Le chemin de doublement de période au chaos est clairement présenté sur la figure 4, avec la charge externe P_i augmentée de 0,1 à 0,1975(p.u). Pour $P_i = 0,1976$, le système va passer d'une période à période 2 jusqu'à $P_i = 0,2$ comme montré sur la figure 5. Pour $P_i = 0,2295$, le système est de période 4 (figure 6), où l'on voit bien que c'est la route vers le chaos.

Et quand on augmente $P_i = 0,23$ à 0,2498, on a le comportement chaotique du système observé sur la figure 7.

Le contrôleur non-linéaire pour un système d'énergie de troisième ordre de SMIB est développé systématiquement en utilisant la linéarisation en boucle de retour. Les simulations numériques ont vérifié l'efficacité de la méthode proposée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Ajit Kumar (2018), Damping Enhancement for SMIB Power System Equipped with Partial Feedback Linearization AVR, Proceedings of the National Power Systems Conference (NPSC).
- 2) C Nono Dueyou Buckjohn, M Siewe Siewe, and All (14 June 2013), Investigating bifurcations and chaos in magnetopiezoelastic vibrating energy harvesters using Melnikov theory.
- 3) Du Qu Wei Bo Zhang and All (4 February 2010), Effect of noise on erosion of safe basin in power system Published.
- 4) Hanyuan Ma, Fuhong Min, and All (16 April 2019). Chaos and bifurcation behavior in a fundamental power system with electromagnetic disturbance and load disturbance.
- 5) JONATHAN H.B and DAVID C. HAMILL (July 1990), Instability, subharmonics, and chaos in power electronic systems, IEEE, Transactions on power electronics. Vol. 5.
- 6) Jyo Deshmukh (2019). Autonomous Cyber-Physical Systems: Basics of Control. Spring. CS 599

- 7) Liva F. RAFANOTSIMIVA, Gildas BESANCON and All, (2013). Modélisation multi-modèle et commande par Compensation Parallèle Distribuée d'un système SMIB, Mada-ENELSA Vol 1.
- 8) M. Jazaeri and M. Khatibi (January 31, 2009 from IEEE Xplore,) A Study on Hopf Bifurcations for Power System Stability Analysis,
- 9) Mohamed Zribi , Muthana T. Alrifai and All (Published 6 June 2018), Control of Chaos in a Single Machine Infinite Bus Power System Using the Discrete Sliding Mode Control Technique.
- 10) Pratik Vernekar, Zhongkui Wang and All. (2015), Feedback Control Methods for a Single Machine Infinite Bus System, the Ohio State University Neil Avenue,
- 11) Udaya D. Annakkage for Dynamic System Equivalents, Published 2015 by John Wiley & Sons, Ltd.