

**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série Sciences Technologiques

N°4 - 2020

Antananarivo - Madagascar

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

ISSN 1025 - 3459



**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série

Sciences Technologiques

N° 4

2020

Membres du Comité de lecture :

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

Ce numéro a été édité avec le concours de

Université d'Antananarivo

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

et

Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique

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

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

**RECHERCHES
POUR
LE DEVELOPPEMENT**

Série Sciences Technologiques

N°4

2020

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



MINISTÈRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPÉRIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Centre d'Information et de Documentation
Scientifique et Technique



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

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

SOMMAIRE

L'énergie solaire photovoltaïque, une alternative pratique et pertinente pour le développement durable	
par ANDRIAMBEROMANGA Merthon, RAZAFIMAHENINA Jean Marie	7
Valorisation des balles de riz pour la fabrication des bétons géopolymères drainants	
par RASOLONIAINA A. Koera, RATSIMBAZAFY Mikaela H., RAKOTOSAONA Rijalalaina, Ranaivoniarivo Gabriely	15
Modelling of a Newtonian fluid flow in the reservoir with an orifice	
par RATOVARIVO Noarijaona, ANDRIANANTENAINA Marcelin H., ZEGHMATI Belkacem	25
Analyse de stabilité de la tension de systèmes photovoltaïques connectés au réseau électrique utilisant la commande MPPT à base de la logique floue et les algorithmes génétiques	
par BOTORONONO Parfait, RAFANOTSIMIVA Liva. F., RAZAFINJAKA Nirinason J., RAKOTOARISOA Armand. J. C.	39
Isolement et identification du virus de la maladie de Newcastle à Madagascar	
par RAZAFINDRAFARA Mirantsoa S., MAMINIAINA Olivier F. ANDRIANTSIMAHAVANDY Abel A., GIL Patricia, RENATA S. de Almeida, EMMANUEL Albina	53
Détection et reconnaissance du troupeau en déplacement par un Drone	
par TSIMITAMBY Briand, SAMBATRA E. J., RAMANANTSOA H., RAZAFINDRADINA H. B., ANDRIANIRINA C. B.	61
Commande non linéaire d'un réseau d'énergie électrique intégrant les dispositifs FACTS	
par VELOTSANGANA Davida Ndalana, RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa, RAZAFIMAHENINA Jean Marie	74

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



L'ÉNERGIE SOLAIRE PHOTOVOLTAÏQUE, UNE ALTERNATIVE PRATIQUE ET PERTINENTE POUR LE DÉVELOPPEMENT DURABLE

par

ANDRIAMBEROMANGA Merthon^(1,2), RAZAFIMAHENINA Jean Marie^(1,2)

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

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

RESUME

Actuellement, le choix de l'énergie renouvelable comme ressource énergétique fiable fait partie intégrante du développement d'un pays. Plus particulièrement, l'énergie solaire photovoltaïque tant propre qu'économique, disponible partout et inépuisable, est l'une des options et alternatives en terme de transition énergétique.

Cet article a pour objectif de montrer l'efficacité et la rentabilité économique de l'utilisation de l'énergie solaire photovoltaïque comme étant source d'énergie électrique propre et autonome en vue de transformation des fruits de saison en jus naturel fraîchement mixé et servi aux clients pour une activité génératrice de revenu. Dans le but d'aboutir aux résultats des études scientifiques et économiques, on trouve aussi dans cet article les démarches respectives sur le comportement physique d'un module solaire photovoltaïque en fonction des charges relatives aux besoins d'utilisateur et aussi sur l'impact au développement durable du pays.

A l'issue des enquêtes menées, cet article nous montrera aussi les résultats sur l'employabilité des jeunes visant aux impacts économiques considérables ainsi que la pérennité et fiabilité de la source énergétique renouvelable telle le solaire photovoltaïque. Les travaux sont traités sous l'environnement et outil Power Simulation ou PSIM.

Mots clés : Energie solaire photovoltaïque, Energie alternative

ABSTRACT

Currently, the choice of renewable energy as a reliable energy resource is an integral part of a country's development. More particularly, solar photovoltaic energy, as well clean as economic, available everywhere and inexhaustible, is one of the options and alternatives in terms of energy transition.

This article aims to show the efficiency and economic profitability of the use of solar photovoltaic energy as being source of clean and autonomous electric energy for a revenue-generating activity in a city or village. In order to arrive at the results of the scientific and economic studies, we will find in this article the respective approaches to the physical behavior of a photovoltaic solar module according to the loads related to user needs and also to the impact on sustainable development of the country.

At the end of the surveys conducted, this article will also show us the results on the employability of young people aimed at considerable economic impacts as well as the durability and reliability of the renewable energy source such as solar photovoltaic. The Jobs in this article are processed in Power Simulation tool or PSIM.

Key words : Photovoltaic solar energy, alternative Energy

INTRODUCTION

Le rayonnement solaire fait partie d'une source inépuisable d'énergie afin d'obtenir de l'électricité, de la chaleur par le biais d'un procédé de transformation via un module solaire photovoltaïque. A l'exposition à la lumière du soleil, ce dernier, grâce à un phénomène physique appelé « effet photovoltaïque », transforme l'irradiation solaire et produit des forces électromotrices (Lorenzo E., 1994). L'exploitation de l'énergie solaire reste encore un défi à relever au niveau de tous les domaines de recherche. On envisage actuellement de parler et de concrétiser verbalement la transition énergétique, non seulement dans le domaine de grandes industries mais aussi dans les petites et moyennes entreprises afin de marquer le développement économique d'un pays.

Afin de montrer les résultats et efficacités d'utilisation d'un système solaire photovoltaïque dans un projet de transformation des fruits de saison en jus naturel tout en utilisant des robots mixeurs transportés dans un chariot mobile, un optique d'un système de production d'énergie électrique autonome sera abordé avec différent étude tant sur la rentabilité économique et aussi sur le domaine scientifique. Quelques caractéristiques seront mises en évidence dans cet article et nous travaillerons avec un outil de simulation tel que le « PSIM ».

METHODOLOGIE ET MISE EN SITUATION

Principe de fonctionnement

Un chariot mobile équipé d'un système solaire photovoltaïque assurant la production d'électricité autonome tout au long de la journée de travail pour fournir aux clients des produits de transformation de fruits en jus naturel fraîchement mixé

et instantané. Le fonctionnement est de faire alimenter les robots mixeurs par le courant électrique du module solaire pour mixer les fruits comme montré sur la figure suivante.



Figure 1 : Présentation d'un chariot équipé d'un module solaire en fonctionnement

Processus de production d'électricité et bilan matériel

Sous l'effet de l'éclairement du soleil, le module composé de l'assemblage de plusieurs cellules solaires produit de l'électricité qui est finalement exploitable selon les besoins de l'utilisateur (Mrabti T., 2008). Un schéma synoptique est présenté ci-dessous.

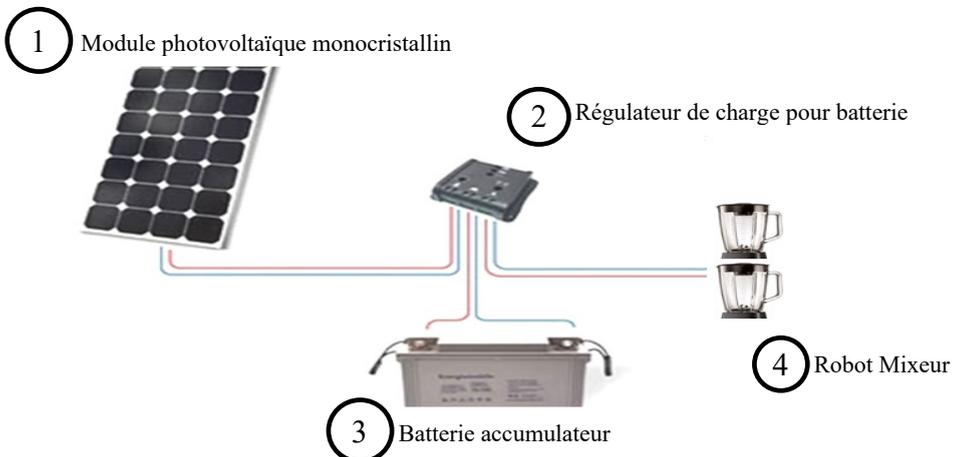


Figure 2 : Schéma synoptique de fonctionnement du système de production

Les caractéristiques techniques de tous les appareils utilisables dans le chariot sont données dans le tableau 1

Tableau 1 : Liste des matériels

Appareils	Caractéristiques	Nombre
Panneau solaire pv	Monocristallin, 200W, 12V, 72 cellules	01
Régulateur	CM3024Z, 12/24V, 30A	01
Batterie	GEL, 12V, 100Ah	01
Robot Mixeur	12V, 150W	02
Chariot mobile	150cm x 80cm x 75cm (L x l x h) avec support de panneau de 200cm de hauteur	01

Bilan énergétique

La consommation journalière est estimée selon la charge unique constante présentée dans le tableau suivant (Mrabti T., 2008, Motahhir S., Abdelaziz E., Derouich A., 2015).

Tableau 2. Consommation journalière en énergie électrique

Appareils	Puissance unitaire	Nombre	Durée d'utilisation journalière	Consommation journalière
Robot Mixeur	150W	02	9h	2 700Wh

RESULTATS DE SIMULATION DU CHOIX DU MODULE SOLAIRE PV

Face au multiple et variété de gamme de produits type panneau solaire pv, on a mis à disposition un outil de simulation « PSIM » afin de pré-visualiser la performance directe du module pv (Villalva M., Gazoli J., Filho E., 2009).

Dans notre cas, le Tableau 3 nous indique les caractéristiques techniques du panneau utilisé sur le chariot :

Tableau 3 : Spécification du module solaire PV

Puissance maximale, Pmax	200W
Tension de Pmax, Vmp	38,8V
Courant de Pmax, Imp	5,15A
Tension à circuit ouvert, Voc	45V
Courant de court-circuit, Isc	5,8A

Coefficient de Température à Voc, Kv	-0,34%/°C
Coefficient de Température en Isc, Ki	0,06%/°C
Nombre de cellules	72

En tenant compte de ces caractéristiques, le logiciel nous démontre les résultats issu de la Figure 3, en Courant I(A) et Puissance P(W), présentés dans les courbes de la Figure 4a et 4b (Guéraud V., Pernin J-P., Cagnat J-M., Cortés G., 1999) :

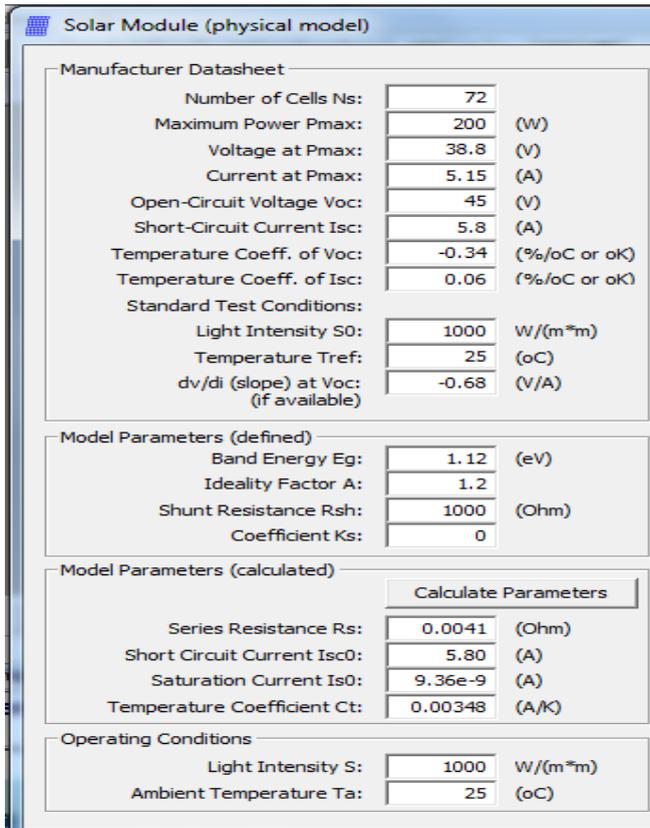


Figure 3 : Fenêtre de commande utilité - Solar Module (physical model) sous PSIM

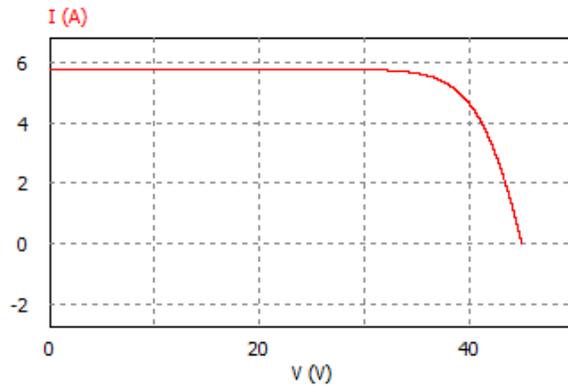


Figure 4a. Courbe I-V d'un module pv

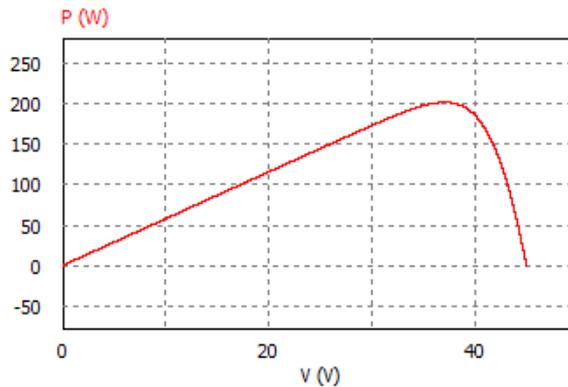


Figure 4b. Courbe P-V d'un module pv

DISCUSSIONS ET ILLUSTRATIONS

- On pourrait estimer la performance du module pv tout en prenant en compte les résultats montrés en Figure 5, caractérisant les valeurs de fonctionnement maximal (Astier S., 2008),

Maximum Power Point (calculated)		
Pmax:	202.46	(W)
Vmax:	37.10	(V)
Imax:	5.46	(A)

Figure 5 : Caractéristique des valeurs maximales d'un module pv

- Avec la charge effective de la batterie 100Ah, elle peut supporter le besoin en énergie de l'installation pour une journée de travail en se basant à la consommation journalière établit dans le tableau 2 ;

- On constate aussi que pendant l'activité de vente, les robots mixeurs ne fonctionnent pas simultanément en permanence à toute heure, donc c'est un autre facteur qui le rend encore plus bénéfique en énergie stocké pour assurer la journée de travail ;

- En terme de développement durable, une création d'emploi est constatée au niveau local avec une capacité possible d'employer plus de deux personnes dans le domaine dont deux sur place et le reste dans le domaine préparatif et administratif ;

- Le prix de vente des produits sur place sera calculé en fonction d'achat des fruits aux fournisseurs et les matériels de ménage utilisable dans le chariot. A titre indicatif, on commercialise le jus en verre de 0,25L à 500 Ariary et fait employer quatre (04) personnes dont un homme et trois femmes.

CONCLUSION

L'utilisation de système à énergie renouvelable dans le cadre du développement durable reste encore un défi à relever et dans cet article on a évoqué qu'indépendamment de source d'électricité locale comme JIRAMA, nous pouvons en générer afin de produire des produits commercialisables à l'échelle économique. On a constaté qu'avec un effort d'investissement moyen ou prêt de 2.500.000 Ariary, nous pouvons envisager et garantir un retour mensuel de chiffre d'affaires avoisinant de 1.800.000 Ariary, ce qui est très rentable.

Une production autonome en électricité permanente est aussi garantie avec un système installé bien estimé techniquement via l'outil PSIM, et cette estimation allant de 10 ans avec peu d'entretien matériel.

Ainsi, un indice de développement durable d'une région est prouvé avec la participation fiscale de l'entreprise et pour une vision rayonnante à travers la ville, c'est une attraction potentielle des clients de tout genre vue la présentation et l'exigence en matière d'hygiène de la production alimentaire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Astier S. (2008) *Conversion photovoltaïque : de la cellule aux systèmes*. Techniques de l'Ingénieur, D3936.
- 2) Guéraud V., Pernin J-P., Cagnat J-M., Cortés G. (1999), Environnements d'apprentissage basés sur la simulation. *Sciences et techniques éducatives*. 6 (1).
- 3) Lorenzo E. (1994). *Solar Electricity: Engineering of Photovoltaic System*, Progensa, Sevilla.

- 4) Motahhir S., Abdelaziz E., Derouich A. (2015). *Modélisation et commande d'un panneau photovoltaïque dans l'environnement PSIM*. CIGIMS, EST de Fès - 21, 22 et 23 mai 2015.
- 5) Mrabti T. (2008). Conception, modélisation et réalisation d'un système photovoltaïque de moyenne puissance. *Revue des Energies Renouvelables*, 11 (4), pp. 567 – 575.
- 6) Villalva M., Gazoli J., Filho E. (2009). Comprehensive approach to modelling and simulation of photovoltaic arrays. *IEEE Transactions on Power Electronics*, (24) 5, pp. 1198-1208.

REMERCIEMENTS

Mes remerciements s'adressent très particulièrement aux comités d'organisation de la 5^{ème} édition de Doctoriales qui s'est déroulé à Mahajanga-Madagascar pour leur acceptation de mon article, de mon intervention et de la présentation des fruits de ma recherche au niveau national dans le cadre des « Sciences et Innovations pour le Développement Durable ».

Je remercie également la Directrice Générale de l'Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana d'avoir soutenu mes travaux et pour son soutien financier.

Je voudrais dire merci à l'ensemble de tous les doctorants participants pour tous les échanges conviviaux durant la période très agitée et sous pression passée ensemble à Mahajanga.

Mes grands mercis aussi sont adressés à ma famille pour leur soutien moral et affectif.

VALORISATION DES BALLES DE RIZ POUR LA FABRICATION DES BÉTONS GÉOPOLYMÈRES DRAINANTS

par

RASOLONIAINA A. Koera⁽¹⁾, RATSIMBAZAFY Mikaela H. ^(1, 2),
RAKOTOSAONA Rijalalaina ⁽³⁾, Ranaivoniarivo Gabriely⁽¹⁾

(1) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Mention Science et Ingénierie des Matériaux, BP 1500 Antananarivo Madagascar

(2) Centre National de la Recherche Industrielle et Technologique, Département Matériaux et Génie civil BP 6294 Antananarivo 101 Madagascar

(3) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Département Génie Chimique, BP 1500 Antananarivo Madagascar.

RESUME

Les balles de riz, déchets de production, Madagascar enregistre environ 800 000 tonnes chaque année. Calciniées à une température voisine de 600 °C, elles produisent des cendres siliceuses. Le métakaolin, produit de calcination de kaolin à environ 700 °C, est mélangé avec la cendre de balle de riz pour former un mélange d'aluminosilicate, qui est activé avec de la solution de soude 12M pour obtenir le liant géopolymères.

Pour la fabrication de notre béton, on a utilisé 5 formulations différentes de liant. Mélangé avec du granulats 4/8, le béton a été conçu avec un moule prismatique 4x4x16 cm. Démoulé après 24 heures, les éprouvettes sont séchées à température de laboratoire avant d'effectuer les essais mécaniques et le test de perméabilité.

Les tests de flexion et de compression nous ont donné des valeurs très intéressants, le liant composé de 50% de métakaolin et 50% de cendre de balle de riz a donné le meilleur résultat ($R_c = 11.21$ MPa et $R_f = 1.93$ MPa), presque le double de la valeur du béton témoin. Le test de perméabilité a montré que tous les échantillons comportent une propriété drainante très intéressante, qui est comprise entre l'état des sables et du gravier.

Mots clés : Cendre, kaolin, soude, liant, perméabilité, résistance, compression.

ABSTRACT

Rice husks, production waste, Madagascar records around 800 Thousand tons each year. Calcined at a temperature around 600° C, they produce silica ash. Metakaolin, calcination product of kaolin at around 700° C, will be mixed with rice

husk ash to give us an aluminosilicate mixture, which will be activated with soda (sodium hydroxide concentration 12M) to obtain the geopolymeric binder.

For the manufacture of our concrete, 5 different formulations of binder were used. Mixed with 4/8 aggregate, the concrete was designed with a 4x4x16 prismatic mold. Unmolded after 24 hours, they will be dried at laboratory temperature, before performing mechanical and permeability test.

The bending and compression tests gave us very interesting values, the binder composed of 50% metakaolin and 50% rice husk ash gave the best result ($R_c = 11.21$ MPa and $R_f = 1.93$ MPa), almost double value had obtain compare of the concrete witness. The permeability test has given that all of the samples had a very interesting draining property, which is between the state of the sand and gravel.

Key Word: Ash, kaolin, soda, binder, permeability, strength, compressive.

INTRODUCTION

Le secteur de la construction ne cesse d'évoluer et utilise beaucoup de matériaux. Actuellement, les pays émergents construisent de plus en plus de gros ouvrages, tandis que les pays du Nord un peu moins (planetoscope.com, 2019). Le ciment reste toujours le matériau le plus utilisé dans la construction, après l'eau. Son utilisation est toujours jugée nocive à l'environnement, mais son remplacement semble encore inenvisageable, surtout pour les constructions qui demandent plus de résistance et d'une durée de vie plus longue.

Madagascar est un pays producteur de riz ; la FAO a enregistré en 2017 une production annuelle de 3,4 millions de tonnes de paddy. Cela produit à peu près 700 000 tonnes de balles de riz, actuellement utilisées pour la cuisson des briques de terre et l'alimentation animale. D'après RATSIMBAZAFY (2012) et Halleux (2013), les cendres de balles de riz calcinées correctement peuvent contenir un taux de silice variant de 86 à 97 % et possèdent une bonne propriété pouzzolanique. Les cendres de balles de riz peuvent être utilisées dans le domaine de la construction : en substituant une quantité de ciment dans un mélange de mortier ou de béton, ou encore utilisé pour la fabrication d'un liant. Notre but est d'utiliser ces balles de riz (cendre) comme ressources secondaires pour la préparation d'un liant à utiliser dans la fabrication des bétons drainants géopolymères.

Des travaux de laboratoires seront nécessaires afin de connaître les caractéristiques et propriétés physico-chimiques des matériaux utilisés, suivis des tests mécaniques pour comprendre l'efficacité du mélange réalisé.

MATERIELS ET METHODES

D'après Sore et *al.* (2016), un liant géopolymère est fabriqué à partir de l'aluminosilicate (Si-Al), activé avec une solution alcaline. La recherche menée par Ratsimbazafy (2012) a démontré que l'utilisation du métakaolin et des cendres de balles de riz peut donner un béton géopolymère de bonne résistance mécanique. La solution de soude n'est pas énergivore et dégage peu de gaz à effet de serre.

Maa et *al.* (2018) a aussi expliqué qu'on peut avoir beaucoup de sortes d'aluminosilicate utilisable, mais les plus utilisés sont les cendres volantes, le laitier, les cendres de bois à haute teneur en silice, les cendres de balles de riz, le métakaolin, et la combinaison de ces éléments. Les solutions alcalines utilisées habituellement sont l'hydroxyde de sodium (NaOH), l'hydroxyde de potassium (KOH), le silicate de sodium (Na_2SiO_3) et de potassium (K_2SiO_3).

Les matières premières

Dans notre recherche, le liant utilisé est fabriqué par le mélange de deux aluminosilicates, la cendre de balle de riz et du métakaolin activé par une solution de soude.

Les cendres de balle de riz sont obtenues par calcination des balles de riz, déchets de production de riz de la région d'Itaosy Antananarivo Madagascar, à 600°C pendant deux à quatre heures. Après broyage, les valeurs des analyses chimiques obtenues sont illustrées dans le tableau (1). Les métakaolins sont obtenus par calcination du kaolin à une température de 700°C durant 3 heures environs. Les valeurs de l'analyse chimique sont données dans le tableau (1) suivant.

Tableau 1: Analyse chimique de la CBR et du MK

	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI
MK	50,63	0,90	39,62	0,83	0,00	0,88	1,19	0,00	0,03	0,26	6,14
CBR	91,24	0,07	1,34	0,41	0,13	0,21	0,42	0,00	1,80	0,40	3,38

Les courbes granulométriques de la cendre de balle de riz et du métakaolin est la suivante :

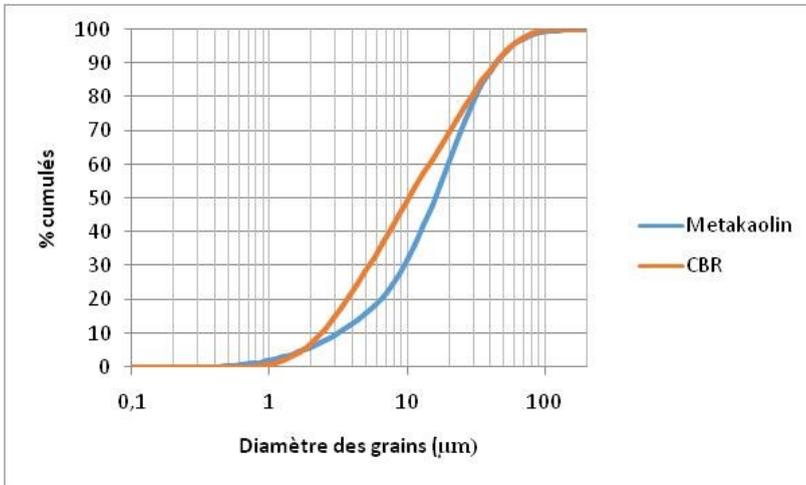


Figure 1: Courbes granulométriques de la CBR et du MK

Pour la fabrication du béton, on va utiliser des granulats quartzites monodimensionnels 4/8. Sa courbe granulométrique est la suivante :

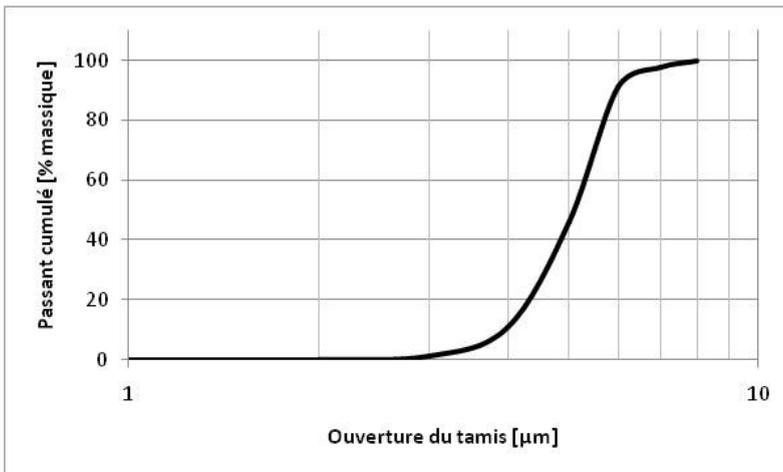


Figure 2: Courbe granulométrique du granulat

Les formulations choisies

La composition d'un béton géopolymère est le mélange du liant géopolymère avec des granulats (avec ou sans fines), ajouté ou non avec de l'eau et des adjuvants selon les caractéristiques des bétons voulues. Selon l'étude de Pouhet (2016), la résistance maximale d'un béton peut avoir une résistance à la compression jusqu'à 65,5 MPa à 7 jours de séchage.

La formulation utilisée pour l'expérimentation a été basée sur les études de Sore et *al.* (2016), et les recherches effectuées par Ratsimbazafy (2012) pour la fabrication de la pâte du liant géopolymère. Celle de la fabrication du béton drainant est conduite selon l'étude faite par Kabagire (2013) et de Rabenandrasana (2018).

On en déduit :

Tableau 2 : Paramètres de la formulation des éprouvettes

	E/C	Vp/Vvg	Métakaolin/solution_soude	Granulats (mm)
Echantillon	0,35	0,40	0,8	4/8

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

Tableau 3 : Proportions générales des matériaux utilisés

Echantillon	F1	F2	F3	F4	F5
Mélange	Granulat Ciment 100% Eau	Granulat MK 100% Sol soude	Granulat MK 80% CBR 20% Sol soude	Granulat MK 70% CBR 30% Sol soude	Granulat MK 50% CBR 50% Sol soude

RESULTATS

Les tests de résistance à la flexion et à la compression sont utilisés pour déterminer les caractéristiques mécaniques des briquettes. Ils ont été faits en utilisant la machine INSTRON 5585, avec une charge de 250 kN.

Le test de perméabilité est aussi indispensable. Il sera mesuré en utilisant un perméamètre.



Figure 3 : Machine INSTRON 5585

Les valeurs moyennes des tests sont données par les figures 1, 2 et 3



Figure 4: Perméamètre

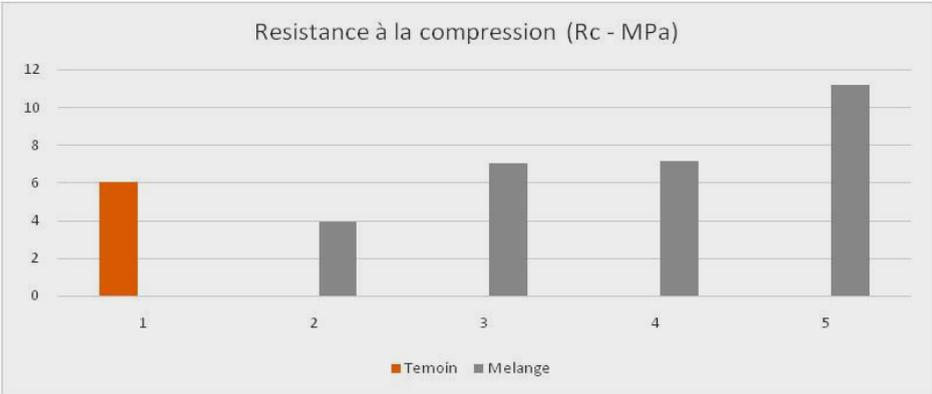


Figure 5: Courbe de la résistance à la compression

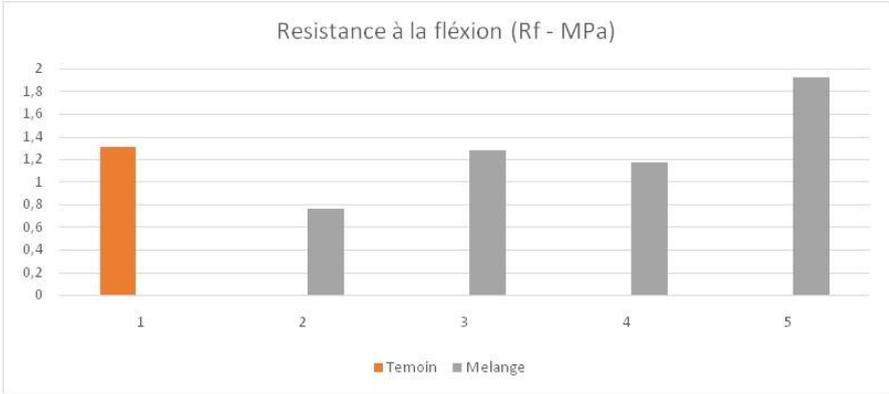


Figure 6 : Courbe de la résistance à la flexion

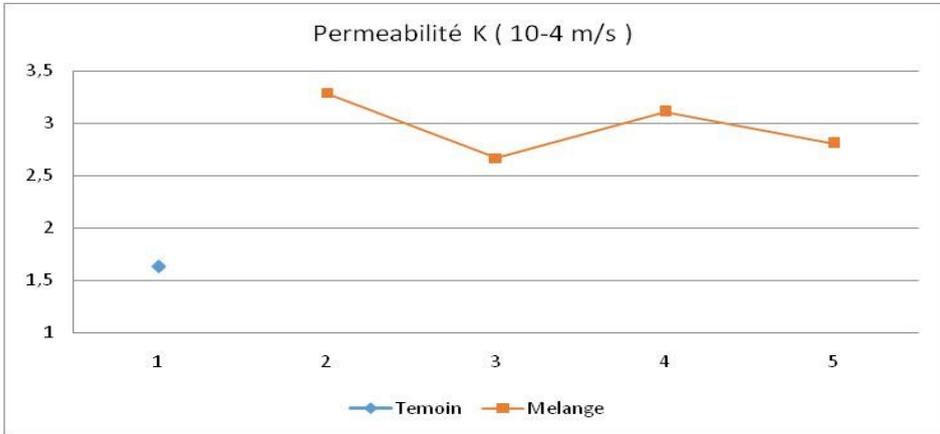


Figure 7: Courbe de la perméabilité

Ces graphes représentent la moyenne de valeur des tests sur les éprouvettes de même formulation. Les résultats pour les bétons témoins sont représentés dans la partie gauche de chaque figure, et ceux des bétons géopolymères par les autres histogrammes.

On peut constater que, suivant la quantité de cendre de balle de riz utilisé, la performance mécanique des bétons s'accroît pour atteindre une valeur supérieure à celle du témoin.

Les tests de perméabilité nous donnent la potentialité du béton à se laisser traverser par l'eau. Selon ce graphe (Fig 7), les valeurs de la perméabilité des bétons géopolymères sont largement supérieures à celle du béton témoin. Selon Ababou (2007), on peut classer notre matériau parmi les bétons drainants avec une bonne infiltration comprise entre les sables et les graviers.

DISCUSSION

La valorisation de la balle de riz dans le domaine de la construction nous permet d'obtenir un béton drainant géopolymère très intéressant. En augmentant la quantité de cendre de balle de riz utilisé, la résistance mécanique augmente. Elle a presque doublé quand on a utilisé 50% de cendres de balle de riz et 50% de métakaolin.

Notre recherche nous montre l'efficacité de l'utilisation des cendres dans la fabrication des bétons géopolymères. Selon les études faites par Kabagire (2013) et Ratsimbazafy (2012) ; la quantité d'ajout de cendre se limiterait entre 10% et 15%, ce qui n'est pas démontré dans notre cas. La qualité de cendre serait le responsable de cette différence.

La perméabilité de notre nouveau béton est largement supérieure à celle du béton témoin. Le volume de la pâte utilisée est jugé optimal ce qui donne un bon écoulement d'eau à l'intérieur du béton.

On a obtenu un béton dur avec un bon indice de perméabilité.

CONCLUSION

La valorisation des déchets prend une ampleur dans notre société. Pour notre recherche les balles de riz ont été choisies. Madagascar possède une ressource importante de ces déchets par sa production du riz. La fabrication d'un nouveau liant, qui est le géopolymère, a été étudiée en utilisant les cendres de balles de riz, du métakaolin, activé par une solution d'hydroxyde de sodium.

Le métakaolin et les cendres de balles de riz ont été obtenus par calcination de kaolin et de balles de riz. Durant notre recherche, le mélange de 50 % de métakaolin, 50 % de cendres de balles de riz, à une solution de soude à 12 M de concentration, a donné les résultats les plus intéressants soient 11,21 MPa en résistance à la compression et 1,93 MPa pour la résistance à la flexion. En comparant ces résultats à ceux du béton témoin, nous avons obtenu des valeurs presque doublées.

Ces résultats aident beaucoup sur la continuité des études concernant l'utilisation des cendres de balles de riz et du métakaolin pour la fabrication des bétons géopolymères. Les paramètres clés à considérer seront basés sur l'optimisation de l'ajout des cendres de balles de riz, et sur l'utilisation optimale de la concentration de la soude pendant l'activation alcaline.

REMERCIEMENTS

Nos premiers remerciements s'adressent aux responsables de l'Ecole Doctorale INGE, pour leur soutien et leur aide pour le bon déroulement de nos recherches.

Nous remercions également l'ARES et l'Université de Liège pour le stage de recherche qu'ils m'ont accordé. Les travaux de recherches ont été bien menés grâce aux conseils des personnels de l'Université et la mise à disposition des différents équipements dans les laboratoires.

Merci à toutes les personnes qui nous ont aidés durant ces années de travail.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Ababou, R. (2007). *Éléments d'Hydrologie souterraine*. Toulouse : ENSEEIHT-IMFT. 314 p.
- 2) FAO (2018). Suivi du marché de riz de la FAO. 21(1). 9 p. <http://www.fao.org/3/I9243FR/i9243fr.pdf>. Consulté le 24 Mai 2019.
- 3) Halleux, E. (2013). *Valorisation des cendres de balles de riz pour la production de matériaux pouzzolaniques à Madagascar*. Travail de fin d'études, Faculté des Sciences Appliquées, Université de Liège. 111 p.
- 4) Kabagire, K.D. (2013). *Nouvelle approche de formulation des bétons drainants aux propriétés mécaniques et drainantes améliorées*. Travail de fin d'études, Département Génie Civil, Faculté de Génie, Québec : Université de Sherbrooke. 129 p. <https://savoirs.usherbrooke.ca/bitstream/handle/11143/6185/MR96224.pdf;sequence=1>. Consulté le 12 Mai 2019.
- 5) Lian, C. et Zhuge, Y. (2010). Optimum mix design of enhanced permeable concrete – An experimental investigation. *Constr. Build. Mater.* 24, 2664–2671. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2010.04.057>
- 6) Maa, C., Awang, A.Z. et Omar, W. (2018). Structural and material performance of geopolymerconcrete : A review. *Constr. Build. Mater.* 186, 90–102. <https://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.07.111>
- 7) NRMCA (2011). *Pervious Concrete Pavement*. National Ready Mixed Concrete Association. <http://www.perviouspavement.org/>. Consulté le 18 Mai 2019.
- 8) Pouhet, R., et Cyr, M. (2016). Formulation and performance of flash metakaolin geopolymer concretes. *Constr. Build. Mater.* 120, 150–160. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.05.061>
- 9) Rabenandrasana, N.M. (2018). *Essai de formulation des bétons drainants*. Travail de fin d'études, Mention Science et Ingénierie des Matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo. 84 p.
- 10) Rakotoarimanana, S. (2019). *Etude et essai d'élaboration d'un liant géopolymère à base de cendre de balle de riz*. Travail de fin d'études, Mention Science et Ingénierie des Matériaux, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo. 79p.
- 11) Ratsimbazafy, H.M. (2012). *Contribution à l'étude de la production d'un ciment géopolymérique à base de métakaolin, et de cendres de balle de riz*. Thèse de Doctorat, Département Science des Matériaux et Métallurgie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo. 190 p.

- 12) Sore, S.O., Messan, A., Prud'homme, E., Escadeillas, G. et Tsobnang, F. (2016). Synthesis and characterization of geopolymer binders based on local materials from Burkina Faso – Metakaolin and rice husk ash. *Constr. Build. Mater.* 124, 301–311. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.07.102>
- 13) Zhong, R. et Wille, K. (2015). Material design and characterization of high performance pervious concrete. *Constr. Build. Mater.* 98, 51–60. <http://dx.doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.08.027>.
- 14) Planetoscope (2019), *La production mondiale de ciment*. <https://www.planetoscope.com/matieres-premieres/1708-production-mondiale-de-ciment.html>, consulté le 23 Juin 2019.

MODELLING OF A NEWTONIAN FLUID FLOW IN THE RESERVOIR WITH AN ORIFICE

par

RATOVONARIVO Noarijaona⁽¹⁾, ANDRIANANTENAINA Marcelin Hajamalala⁽¹⁾,
ZEGHMATI Belkacem⁽²⁾

(1) Laboratory of Energy Mechanics and Environment, University of Fianarantsoa, Madagascar

(2) Laboratory of Mathematics and Physics, Université de Perpignan via Domitia, France

ABSTRACT

The numerical study of a laminar and stationary flow of a Newtonian fluid in a rectangular vertical reservoir with an orifice on the right bottom is presented. The objective of this study is to determine the velocities and pressure in the reservoir in order to improve the efficiency and performance of its use in various areas. The Navier Stokes equations in two-dimensional cartesian coordinates were used to model the system.

The model equations based on velocity and pressure parameters are solved numerically by the finite volume method. The pressure velocity coupling is provided by the SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations) algorithm. The system of algebraic equations thus obtained is solved by the Thomas algorithm. The numerical simulation of the proposed model shows the proportionality between the longitudinal velocity v according to the flow direction y and pressure P . It also allows to assess the effect of the number of Reynolds on the velocity or pressure.

A parametric study was also carried out to determine the effects of several parameters on the velocity or pressure of the liquid during the flow in this reservoir. Taking $l=L$, $x/L=1$ and $y/L=0.025$ (case of a vertical rectangular duct), the results obtained are in good agreement with those of the literature especially with the results of B. Rama Bhupal Reddy.

Keywords : Modelling, Flow, Reservoir, Rectangular, Newtonian fluid

RESUME

L'étude numérique d'un écoulement laminaire et stationnaire d'un fluide newtonien dans un réservoir vertical rectangulaire comportant un orifice sur le fond droit est présentée. L'objectif de cette étude est de déterminer les vitesses et la pression dans le réservoir pour pouvoir améliorer le rendement et la performance de

son utilisation dans divers domaines. Les équations de Navier Stokes en coordonnées cartésiennes à deux dimensions ont été utilisées pour modéliser le système.

Les équations du modèle basées sur les paramètres vitesses et pression sont résolues numériquement par la méthode de volume fini. Le couplage vitesse-pression est assuré par l'algorithme SIMPLE (Semi Implicit Method for Pressure Linked Equations). Le système d'équations algébriques ainsi obtenues est résolu par l'algorithme de Thomas.

La simulation numérique du modèle proposé permet de constater la proportionnalité entre la vitesse longitudinale v suivant la direction de l'écoulement y et la pression P . Elle permet aussi d'évaluer l'effet du nombre de Reynolds sur le profil de vitesse ou de pression. Une étude paramétrique a également été réalisée pour déterminer les effets de plusieurs paramètres sur la vitesse ou la pression du liquide lors de l'écoulement dans ce réservoir. En prenant $l=L$, $x/L=1$ et $y/L=0,025$ (cas d'une conduite rectangulaire verticale), les résultats obtenus sont en bon accord avec ceux de la littérature particulièrement avec les travaux de B. Rama Bhupal Reddy.

Mots clés : Modélisation, Ecoulement, Réservoir, Rectangulaire, Fluide newtonien

INTRODUCTION

In general, the reservoir can play the role of storage of fluids such as water. It is often encountered in the hydraulic and industrial field such as hydraulic ram, drinking water supply and rural electrification. But the current problem is that researchers focus their studies on the design of new system but they ignore the system improvement that already exists. For this reason, the idea was to carry out research on this system with the aim of improving the performance of its use by knowing the velocities and pressure.

When we talk about the water reservoir, it often comes in mind its emptying like Fadhilah Mohd Sakri (Fadhilah M. S., 2017), who studied numerically the emptying time of a cylindrical reservoir. Other researchers are focusing their studies on the flow of a Newtonian fluid into the shallow reservoir, that is, they have neglected the flow in the vertical direction. Matthieu Dufresne (Matthieu D., 2011) has experimentally and digitally studied the flow and deposition of sediments in shallow rectangular basins, which consists upstream of a sudden widening and downstream of a sudden narrowing.

His work aims to establish a classification of the flows that can take place in the basins and to determine the influence of the flow on the location of deposits and on the settling efficiency. The water flow at inlet and outlet is constant. To model his system, he uses the two-dimensional Colebrook Saint Venant equation and the Wolf finite volume method.

The flow rate and sediment models were studied experimentally and digitally by Erica Camnasio (Erica C., 2013) in shallow rectangular tanks with different asymmetric locations of the inlet and outlet channels. Velocity fields were measured throughout the reservoir for both water flow and sediment.

The experimental results were compared with numerical simulations carried out with the WOLF 2D deep-average flow model, using a $k-\epsilon$ turbulence model Kantoush (Kantoush A., 2010) also conducted experiments on suspended loads, which studied reservoir geometries characterized by a symmetrical position of the inlet and outlet channels, but with variable tank length and width.

The sediment deposition model was measured using an echo sounder and empirical relationships were established to predict the influence of reservoir geometry on trapping efficiency. He observed several examples of changes in the flow field when the thickness of sediment deposits exceeded approximately 0.15 times the depth of water. Numerical simulations of flow in shallow rectangular reservoir focus primarily on low and moderate Reynolds numbers, for which flow symmetry can be broken when the Reynolds number increases.

For this study, the flow of Newtonian fluid in a vertical reservoir with an outlet orifice on the bottom will be modeled in 2D so that high speeds and pressure can be achieved. The finite volume method was used to discredit Navier Stokes' equations. If the width l of the orifice and that of the reservoir are equal ($l=L$), our system is comparable to a vertical rectangular duct. In this case, the results of B. Rama Bhupal Reddy (Rama Bhupal Reddy B., 2010) who studied the Newtonian down flow in a vertical duct, was chosen to validate our model.

PHYSICAL DESCRIPTION AND MATHEMATICAL MODELING

Physical Description of the subject

Consider a rectangular reservoir filled with water, permanently supplied from the outside, of width L which is emptied by means of an aperture of width l . The flows coming in and out of the reservoir are proportional so that the fluid level is constant. S_1 and S_2 are respectively the reservoir and orifice sections (Figure 1)

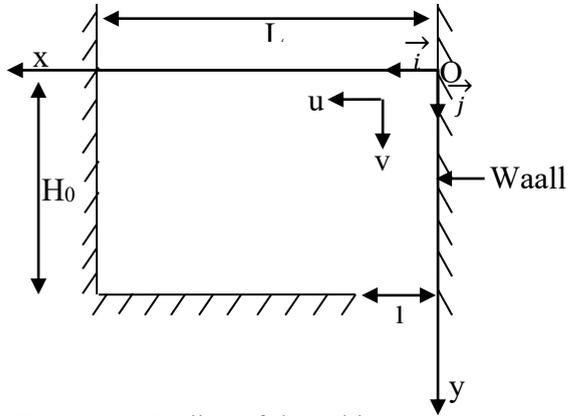


Figure 1 : Outline of the subject

Equations

The equation system governing this model is written in the following dimensional form, assuming that :

- The flows are two-dimensional, stationary and laminar ;
- The thermal transfers (convection, conduction and radiation) are negligible;
- The force exerted on this fluid is only the force due to the gravity field;
- The physical properties of water are assumed to be constant ($\rho = \text{cte}$ and $\nu = \text{cte}$);
- The water level in the reservoir is almost constant;
- The dimensions of the reservoir are very larger in front of that of the outlet;
- The flow of water from the reservoir is assumed to be constant.

Continuity equation

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} = 0 \quad (1)$$

Momentum equation

$$\begin{aligned} u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} &= - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial x} + n \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} &= - \frac{1}{r} \frac{\partial P}{\partial y} + n \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + g \end{aligned} \quad (2)$$

$$P = P(x, y)$$

Boundary conditions

Inlet :

For $y = 0$ et $0 \leq x \leq L$

$u = 0$;

$$v(x) = 6 \frac{V_m}{L^2} x(L-x) \text{ imposed (Velia Ferrara, 2018)} \quad (3)$$

$P = P_{atm}$;

At the walls :

For $y = H_0$ et $0 \leq x \leq 1$

$u = 0$;

$$v(x) = 6 \frac{V_m}{1^2} x(1-x) \text{ avec } V_m = S_1 \sqrt{\frac{2gH_0}{S_1^2 - S_2^2}} \text{ et } S_1 = L^2; S_2 = 1^2 \quad (5)$$

$$P = r g H_0 + \frac{1}{2} r V_m^2.$$

Outlet :

For $y = H_0$ et $0 \leq x \leq 1$

$u = 0$;

$$v(x) = 6 \frac{V_m}{1^2} x(1-x) \text{ avec } V_m = S_1 \sqrt{\frac{2gH_0}{S_1^2 - S_2^2}} \text{ et } S_1 = L^2; S_2 = L1 \quad (5)$$

$$P = r g H_0 + \frac{1}{2} r V_m^2.$$

For $y = H_0$ et $1 \leq x \leq L$

$u = v = 0$.

(6)

$P = r g H_0$.

With :

x : Abscissa (m);

y : Ordinate (m);

L : Reservoir width (m);

H_0 : Height of fluid in reservoir (m);

u : Fluid velocity component following x direction ($m \cdot s^{-1}$);

v : Fluid velocity component following y direction ($m.s^{-1}$);

v_m : Mean of fluid velocity at inlet ($m.s^{-1}$);

V_m : Mean of fluid velocity at outlet ($m.s^{-1}$);

S_1 : Section of the reservoir at the entrance (m^2);

S_2 : Section of the reservoir at the outlet (m^2);

P : Total pressure (Pa);

P_{atm} : Atmospheric pressure (Pa);

g : Acceleration of the gravity field ($m.s^{-1}$);

ρ : Density of fluid ($kg.m^{-3}$);

μ : Fluid dynamic viscosity ($kg.m^{-1}.S^{-1}$);

ν : Fluid kinematic viscosity ($m^2.S^{-1}$);

NUMERICAL METHODOLOGY

The equations (I.1), (I.2), associated with boundary conditions must render adimensional to appear the number of Reynolds and the number of Froude which characterizes the flow regime.

$$x^+ = \frac{x}{D_H}; y^+ = \frac{y}{D_H}; u^+ = \frac{u}{v_m}; v^+ = \frac{v}{v_m} \text{ et } P^+ = \frac{P - P_{atm}}{\rho v_m^2} \quad (7)$$
$$\text{with } D_H = \frac{4S_1}{2(L+1)}$$

Continuity equation adimensionalized

$$\frac{\partial u^+}{\partial x^+} + \frac{\partial v^+}{\partial y^+} = 0 \quad (8)$$

Momentum equation adimensionalized

$$\begin{cases} u^+ \frac{\partial u^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial u^+}{\partial y^+} = -\frac{\partial P^+}{\partial x^+} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 u^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 u^+}{\partial y^{+2}} \right] \\ u^+ \frac{\partial v^+}{\partial x^+} + v^+ \frac{\partial v^+}{\partial y^+} = -\frac{\partial P^+}{\partial y^+} + \frac{1}{Re} \left[\frac{\partial^2 v^+}{\partial x^{+2}} + \frac{\partial^2 v^+}{\partial y^{+2}} \right] + \frac{1}{Fr^2} \end{cases} \quad (9)$$

$$Re = \frac{\rho v_m D_H}{\mu} : \text{Reynolds number};$$

$$Fr = \frac{v_m}{\sqrt{g D_H}} : \text{Froude number};$$

$$\nu = \frac{\mu}{\rho} : \text{Kinematic viscosity}$$

D_H : Hydraulic diameter

Bondary conditions adimensionalized

Inlet :

$$\text{For } y^+ = 0 \text{ et } 0 \leq x^+ \leq 1$$

$$u^+ = 0;$$

$$v^+(x^+) = 6x^+(1-x^+) \quad (10)$$

$$P^+ = 0.$$

At the walls:

$$\text{For } 0 \leq y^+ \leq \frac{H_0}{L} \text{ et } x^+ = 0 \text{ ou } x^+ = 1 \text{ : } u^+ = v^+ = 0 \quad (11)$$

Outlet

$$y^+ = \frac{H_0}{L} \text{ et } 0 \leq x^+ \leq \frac{1}{L}$$

$$u^+ = 0.$$

$$v^+(x^+) = 6 \frac{V_m L^2}{v_m^2} x^+ \left(\frac{1}{L} - x^+ \right) \quad (12)$$

$$P^+ = \frac{g H_0 + 0,5 V_m^2}{v_m^2}.$$

$$\text{For } y^+ = \frac{H_0}{L} \text{ et } \frac{1}{L} \leq x^+ \leq 1$$

$$u^+ = v^+ = 0; \quad (13)$$

$$P^+ = \frac{g H_0}{v_m^2}.$$

With:

x^+ : Adimensional abscissa;

y^+ : Adimensional ordinate;

u^+ : Adimensional velocity fluid component following x^+ ;

v^+ : adimensional velocity fluid component following y^+ ;

P^+ : Total pressure;

These adimensionalized equations are discretized using the finite volume method.

They result in the following general form:

$$A_{i,j}F_{i,j-1} + B_{i,j}F_{i,j} + C_{i,j}F_{i,j+1} = D_j \quad (14)$$

Φ perhaps velocity u , or velocity v , or pressure P .

The matching of velocity and pressure fields is ensured by the SIMPLE algorithm (Patankar S. V., 1980).

The systems of algebraic equations thus obtained are solved using the algorithm of Thomas and Gauss (Versteeg H.K. and Malalasekera W., 1995).

RESULTS AND DISCUSSIONS

The Matlab 7.0 software is used for numerical simulation. The geometric data of the reservoir are given in this table:

Data table :

Width of the reservoir	Width of the orifice	Height of the reservoir
$L = 10\text{cm}$	$l = 10\text{mm}$	$H_0 = 8\text{cm}$

The results obtained from the numerical simulations are presented by the visualization of the velocity profiles u , v and pressure P as well as the current lines. In this case, we adopted the 236X189 nodes meshes.

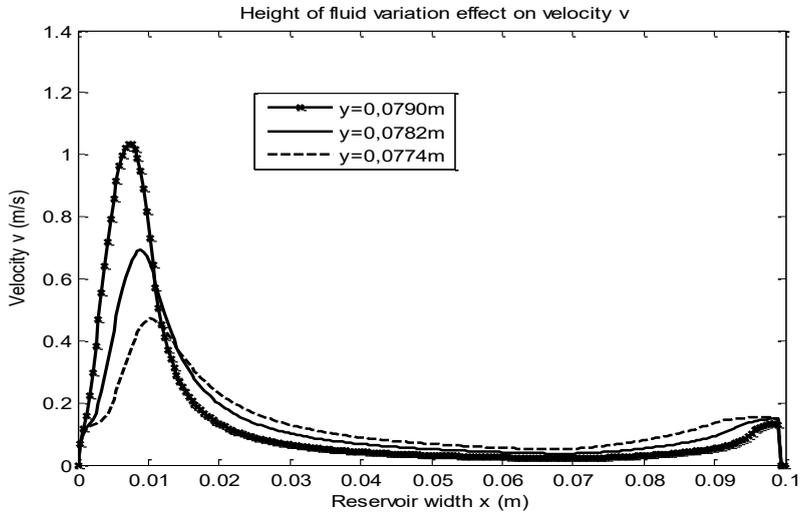


Figure (4.1) : Height of fluid in the reservoir effect on velocity v

Figure (4.1) shows the v-velocity evolution as a function of the width of the reservoir x for a variable of the water level in the reservoir just at the outlet with $Re=900$ and $Fr= 0,1271$.

It was found that:

- On the part where the orifice is located, the velocity v increases proportionally with the increase in y, that is, the velocity and pressure depend on the amount of fluid in the reservoir.
- Elsewhere, the velocity v of the fluid tends to zero following the increase of y which is due to the existence of the wall.

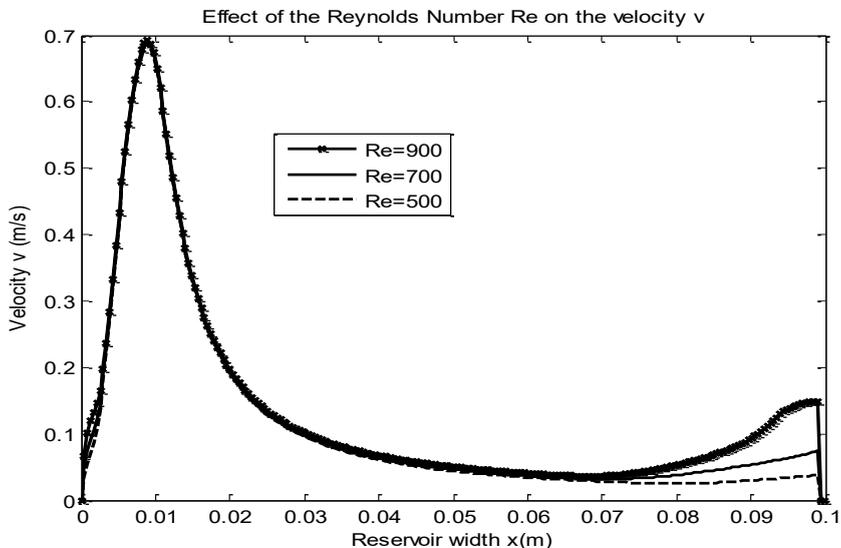


Figure (4.2) : Reynolds Number Influence on velocity v

Figure (4.2) shows the variation curve of the following velocity v as a function of the width of the reservoir x for different Reynolds numbers with $Fr = 0.1271$. We see from this figure that the increase in the number of Reynolds also leads to the increase in the velocity v of the fluid in the reservoir and vice versa. So the velocity v and the number of Reynolds are proportional.

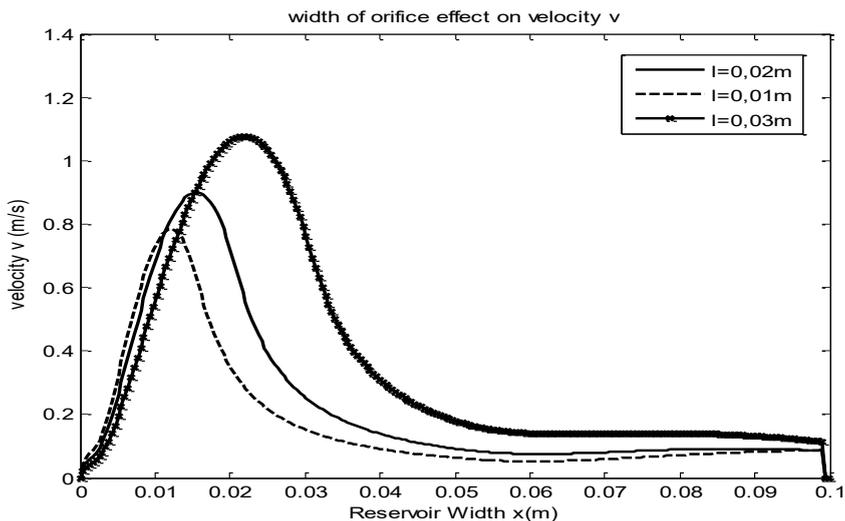


Figure (4.3): Width of orifice effect on velocity v

Figure (4.3) shows the evolution of the velocity v as a function of x for different aperture widths l with $Re=900$ and $Fr= 0.1271$. It can be seen from this figure that the velocity v increases with the opening of the orifice, that is, for a large orifice, the fluid is free to flow. We can say that the orifice can play the role of a valve.

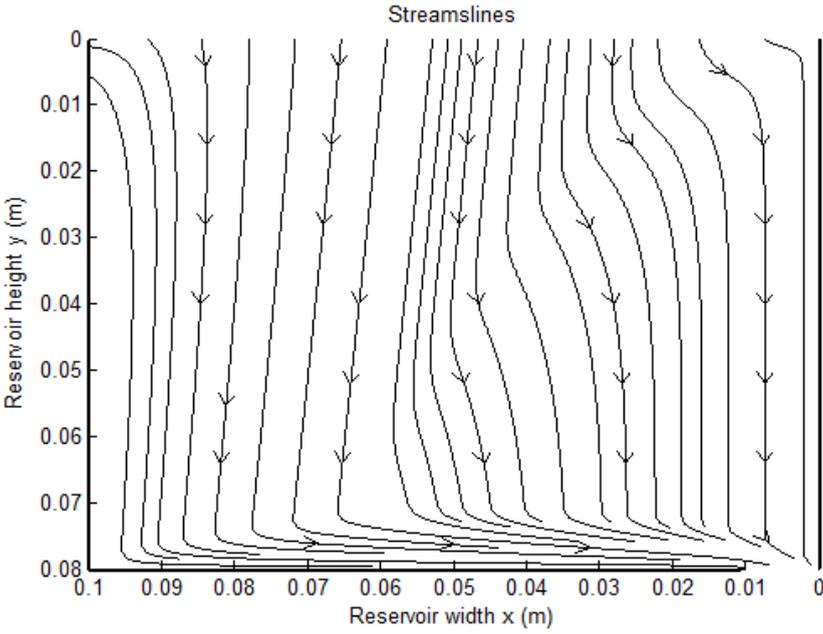


Figure (4.4) : Reservoir current lines

Figure (4.4) shows the current lines or trajectories of the water particles in the reservoir. We notice the fluid coming out of the orifice.

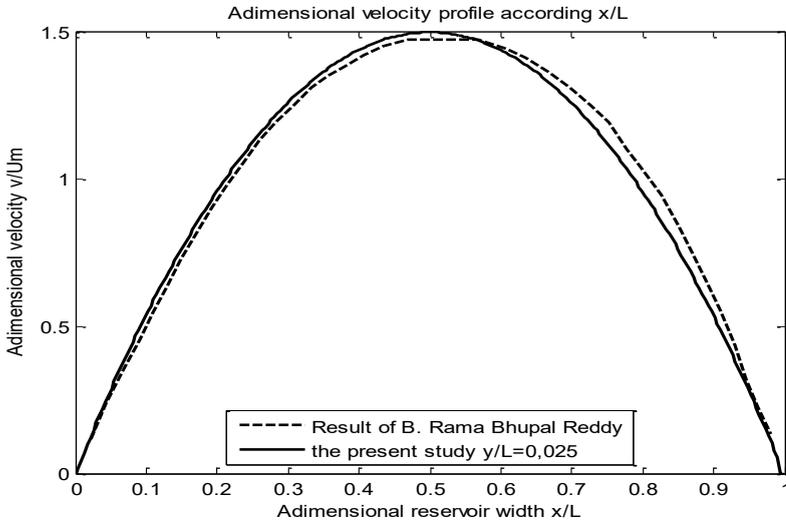


Figure (4.5) : Validation curves

Figure (4.5) shows the profiles of the adimensional velocity v according to direction y according to the adimensional variable x/L for our study and that of B. Rama Bhupal Reddy taking $x/L=1$ and $y/L=0.025$.

It is worth noting that the agreement is almost satisfactory.

CONCLUSIONS

The modelling of a laminar and stationary flow of a Newtonian fluid in a rectangular vertical reservoir with an orifice on the right bottom is very important because it allows us to know the velocity profiles and pressure and current lines in the tank to help improve the performance of its application in different areas.

The use of the Navier Stokes equations (momentum equation and continuity equation) in two-dimensional cartesian coordinates is reliable to model this system.

Model equations based on velocity and pressure parameters are solved numerically by the finite volume method. The pressure velocity coupling is provided by the SIMPLE algorithm. The system of algebraic equations thus obtained is solved by the Thomas algorithm.

The numerical simulation of the proposed model shows the proportionality between speed and pressure P .

It can also be seen that the velocity of the fluid in the tank depends on its geometry such as its height, its width and the width of the hole.

The results obtained are in line with those of B. Rama Bhupal Reddy for $l=L$, $x/L=1$ and $y/L=0.025$ (case of a rectangular vertical line).

So we can say that the objective has been achieved.

REFERENCES

- 1) Boukerma K. (2007). Study of laminar flow accompanied by heat transfer in a rectangular duct with a change of section (Abrupt enlargement). *Thesis of Magister Faculty of Engineering Sciences, Fundamental Sciences Department Skikda University Algeria.*
- 2) Boukhadir N., Damak K., Ayadi A., Martine M. (2005). *Numerical contribution to the study of incompressible laminar flows in a porous tube with parietal mass transfer.* Tunisie : Laboratoire Radio Analyses et Environnement, Ecole nationale d'Ingénieur de Sfax.
- 3) Erica C. (2013). Coupling between flow and sediment deposition in rectangular shallow reservoirs. *Journal of Hydraulic Research* Vol. 51, No. 5
- 4) Fadhilah M. (2017). Numerical simulation of liquids draining from a reservoir using Openfoam. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering.* 226 012152.
- 5) Kantoush A. (2010). Geometry effect on flow and sediment deposition patterns in shallow basins. *Annual Journal of Hydraulic Engineering, JSCE,* 54.
- 6) Mathieu D. (2011). Numerical investigation of flow patterns in rectangular shallow reservoirs. *Engineering Application of computational Fluid Mechanics* 5(2), pp. 247-258.
- 7) Patankar S. (1980). Numerical heat transfer and fluid flow. *Hemisphere, Washington DC.*
- 8) Rama Bhupal Reddy B. (2012). Finite difference analysis of laminar mixed convection with vertical channel in downflow *IJREAS* 2, ISSN: 2249-3905.
- 10) Velia F. (2018). Flow field in shallow reservoir with varying inlet and outlet position. *Journal of Hydraulic Research* ISSN: 0022-1686 (Print) 1814-2079.
- 11) Versteeg H.K. & Malalasekera W. (1995). *An introduction to computational fluid dynamics: The finite volume method.* Ed. Longman, England.

THANKS

First, I want to thank Almighty God for giving me the strength and the will to do this work.

This work was carried out at the Laboratoire de Mécanique Énergétique et Environnement (LM2E), University of Fianarantsoa, Madagascar.

I address my sincere thanks to Mr ANDRIANANTENAINA Marcelin Hajamalala, Professor of the University of Fianarantsoa and Director of the Laboratory of Energetic Mechanics and Environment (LM2E), University of Fianarantsoa, for the trust he has placed in me, for the opportunity to pursue a doctorate in his Service, and for the valuable advice and encouragement he has given me. I thank him for his highly distinguished contribution to this work. His sense of scientific appreciation, his rigour for the work well done, his pertinent suggestions, his humour and especially his willingness to receive me without hesitation in his office many times to enlighten me on my wacky ideas.

I extend my heartfelt thanks to Mr Belkacem ZEGHMATI, Professor at the University of Perpignan Via Domitia, France, for his co-supervision, contribution, patience and assistance throughout this work. May he be assured of my deep gratitude.

My thanks also go to all the members of the Scientific Journal Reading Committees of the Centre d'Information et de Documentation Scientifique et Technique (CIDST) for the honour they give me by agreeing to participate in the article submission through the organizers of the 5th edition of the Doctoriales.

I cannot forget all those who, from near and far, encouraged me and offered me their support.

I offer you my deep gratitude and sincere thanks.

ANALYSE DE STABILITE DE LA TENSION DE SYSTEMES PHOTOVOLTAÏQUES CONNECTES AU RESEAU ELECTRIQUE UTILISANT LA COMMANDE MPPT A BASE DE LA LOGIQUE FLOUE ET LES ALGORITHMES GENETIQUES

par

BOTORONONO Parfait⁽¹⁾, RAFANOTSIMIVA Liva. F.⁽²⁾,
RAZAFINJAKA Nirinason J.⁽¹⁾, RAKOTOARISOA Armand. J. C.⁽¹⁾

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

(2) Ecole doctorale Génie Industrielle, Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana

RESUME

Cet article propose un algorithme génétique pour analyser la stabilité en tension de systèmes d'alimentation photovoltaïque (PV) connectés au réseau. Les principaux avantages de cet algorithme se résident sur sa vitesse de calcul, sa robustesse et sa capacité à surmonter la difficulté numérique proche du point d'effondrement de la tension. En utilisant l'algorithme proposé, une étude numérique est menée pour analyser la stabilité en tension des systèmes sous divers bus dans différentes conditions. Les résultats numériques montrent que des niveaux de pénétration PV supérieurs peuvent considérablement améliorer la stabilité de la tension globale du système. En ce qui concerne l'impact sur la stabilité, une évaluation des emplacements des installations photovoltaïques montre que chaque emplacement sur le réseau possède des différents degrés de pertinence. Ainsi, l'intégration de générations PV à des emplacements incorrects peut entraîner une dégradation grave de la stabilité de tension du système.

Mots-clés : Flux de puissance de synchronisation, algorithmes génétiques, stabilité de la tension, système photovoltaïque, commande MPPT par logique floue

ABSTRACT

This article proposes a genetic algorithm to analyze the voltage stability of photovoltaic (PV) power systems connected to the network. The main advantages of this algorithm lie in its speed of computation, its robustness and its capacity to overcome the numerical difficulty close to the point of collapse of the tension. Using the proposed algorithm, a numerical study is conducted to analyze the voltage

stability of the systems under various buses under different conditions. The numerical results show that higher PV penetration levels can dramatically improve the stability of the overall system voltage. With regard to the impact on stability, an evaluation of the locations of photovoltaic installations shows that each location on the network has different degrees of relevance. Thus, integrating PV generations into incorrect locations can result in severe degradation of system voltage stability.

Key words :

INTRODUCTION

La production d'énergie photovoltaïque (PV) est une source d'électricité fiable et économique dans les zones rurales, en particulier dans les pays en développement où la population a de faibles revenus et où l'alimentation du réseau n'est pas complètement étendue en raison de la viabilité et des contraintes financières. Il est essentiel de faire fonctionner les systèmes de conversion de l'énergie photovoltaïque près du point de puissance maximale (MPP) pour augmenter l'efficacité du système PV. Le courant et la puissance du générateur photovoltaïque varient de manière non linéaire avec la tension aux bornes, le rayonnement solaire et la température. En effet, l'énergie solaire devient alors un concurrent important sur le marché des énergies renouvelables. La topologie de puissance, la structure de contrôle et l'algorithme MPPT (maximum power point tracking) influencent la fiabilité et l'efficacité du système. Ainsi, un suiveur de point de puissance maximale est utilisé pour faire fonctionner le générateur photovoltaïque à son point de puissance optimal. Dans un onduleur photovoltaïque connecté au réseau, la distorsion harmonique totale (THD) du courant injecté et de la puissance réactive doit également être contrôlée pour répondre aux exigences du réseau. En raison de l'effet d'ombrage partiel, un simple algorithme MPPT entraînera d'énormes pertes d'énergie dans les systèmes à haute puissance et les micro-réseaux où les panneaux solaires sont connectés en série afin d'augmenter la tension d'entrée de l'onduleur.

L'effet d'ombrage partiel se produit lorsqu'il existe des conditions de non-concordance (tolérances du fabricant sur les caractéristiques des cellules, contraintes environnementales et différents niveaux de luminosité d'ombrage) entre les panneaux solaires d'une chaîne. Une solution pour protéger les panneaux PV de l'effet de point chaud consiste à utiliser des diodes de dérivation connectées en parallèle avec chaque module. Si le courant du panneau solaire ombré est inférieur au courant de la chaîne, ce module PV sera shunté par sa diode de dérivation. Tous les panneaux seront actifs lorsque le point de fonctionnement du système a un courant de chaîne

inférieur au courant de court-circuit du panneau solaire avec le niveau d'irradiance le plus bas.

Les diodes de dérivation d'un système photovoltaïque protègent les modules PV de l'effet de point chaud qui peut entraîner des dommages permanents. Les inconvénients des diodes de dérivation sont : la perte de puissance, l'augmentation des coûts et l'apparition de multiples LMPP (points de puissance maximale locale) sur la caractéristique de tension de fonctionnement (P-V). La plupart des algorithmes MPPT développés dans le passé concernent des systèmes avec un seul maximum. Deux des algorithmes les plus simples et les plus efficaces sont le P&O et la conductance incrémentielle, mais en cas d'ombrage partiel ils ne parviennent pas à suivre le GMPP (point de puissance maximale global) qui est une puissance maximale disponible extraite.

Afin d'en trouver le GMPP, il faut scanner toute la caractéristique P-V. Selon la chaîne de tension, cette méthode peut entraîner des pertes d'énergie. Les algorithmes génétiques ont été utilisés pour régler les fonctions d'appartenance de l'algorithme de logique floue afin de converger plus rapidement vers sa solution. Des algorithmes intelligents artificiels ont été combinés avec des algorithmes MPPT simples pour suivre le point de puissance maximale global dans les systèmes photovoltaïques affectés par un ombrage partiel [18-20].

Un algorithme de logique floue combiné avec le balayage de la caractéristique P-V, pour trouver le GMPP. Un algorithme GMPPT basé sur AG (algorithme génétique) [22] analyse les caractéristiques du panneau solaire (avec seulement deux LMPP) et de ces modèles certains paramètres sont extraits (température, niveau d'éclairement et charge) puis utilisés pour l'optimisation du algorithme génétique.

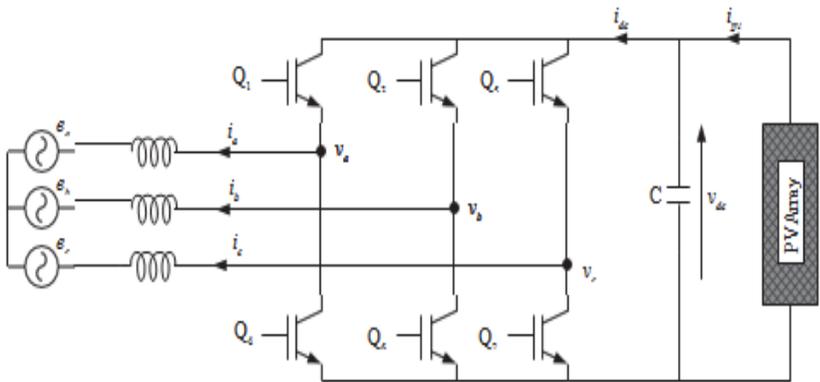


Figure 1 : Diagramme schématique de générateur photovoltaïque connecté au réseau électrique

DESCRIPTION DU SYSTEME

La structure du circuit d'alimentation est illustrée à la figure 1. Il se compose d'un générateur photovoltaïque, d'un condensateur de liaison CC, d'un onduleur triphasé à deux niveaux, d'une inductance de filtrage du réseau et d'une source alternative triphasée. Le générateur photovoltaïque peut produire une puissance maximale de 3 kW avec un rayonnement solaire de 1 kW/m^2 et une température ambiante de 25°C .

La partie innovante de l'article est le GMPPT proposé basé sur des algorithmes génétiques. Il est très important de définir l'application pour laquelle l'algorithme est le mieux adapté pour mieux montrer ses performances.

Dans un système photovoltaïque, la capacité de suivi de l'algorithme MPPT est améliorée par la structure de contrôle. Le système testé utilise un convertisseur Buck synchrone. Le contrôle numérique est utilisé pour les boucles de rétroaction. Trois boucles de contrôle sont implémentées à l'intérieur du DSP (processeur de signal numérique): 1) une boucle de courant rapide interne qui offre une protection contre les courts-circuits et simplifie la fonction de transfert du niveau de puissance; 2) une boucle de tension externe qui définit le point de fonctionnement sur la caractéristique P-V; 3) une boucle de puissance qui est également l'algorithme MPPT qui calcule la référence de la boucle de tension.

Le schéma utilisé pour tester le système est présenté sur la figure 6 (a). Il s'agit du convertisseur DC-DC équivalent (à petite échelle) utilisé sur la figure 4. Un convertisseur abaisseur connecte les panneaux solaires au bus DC (batterie 12 V). Ce convertisseur sera contrôlé pour adapter l'impédance de la source d'entrée à la charge afin d'obtenir un transfert de puissance maximum. La tension en circuit ouvert des panneaux solaires est de 36 V et la caractéristique P-V peut avoir jusqu'à quatre LMPP. Le LMPP le plus bas (situé en dessous de 12 V) ne peut pas être suivi et seuls trois MPP locaux peuvent être recherchés, car un convertisseur abaisseur est utilisé. En changeant la topologie du convertisseur de puissance (Sepic), tous les LMPP peuvent être trouvés. L'inductance est de 23 mH et le condensateur d'entrée est de 1 mF.

La boucle de courant transforme l'inductance en une source de courant réduisant ainsi l'ordre du système d'une unité. Un autre avantage de la boucle de courant est qu'elle rejette les perturbations de la tension de sortie.

Il a été démontré que la boucle de tension peut être compensée pour rendre la stabilité du système indépendante du point de fonctionnement sur la caractéristique P-V. Cette compensation a été démontrée par des équations mathématiques, des simulations et des résultats expérimentaux pour les formes analogiques et numériques.

La structure de commande utilise cette structure de commande pour obtenir un système stable sur une large gamme de tensions d'entrée. Un DSP spécialisé dans le contrôle SMPS (alimentations à découpage) est utilisé. Les ADC (convertisseurs analogiques-numériques) et DPWM (modulateurs numériques de largeur d'impulsion) sont spécialisés pour la mise en œuvre de boucles de rétroaction. Pour chaque boucle de contrôle (tension et courant), une structure PI (proportionnelle-intégrative) a été utilisée.

SYSTEME DE CONTROLE

Le circuit équivalent d'un inverseur de source de tension (VSI) connecté au réseau alternatif peut être représenté comme indiqué à la figure 3 (Diaz *et al.*, 2010). La puissance active (P) et la puissance réactive (Q) lorsque les pertes et les harmoniques sont négligées sont données par (1) et (2) (Zhang et Xu, 2001). V_s et V_c sont les composants fondamentaux de la tension de sortie du réseau alternatif et du réseau alternatif, respectivement, et X est la réactance du filtre de réseau de l'onduleur. V_c est décalé de V_s d'un angle δ . La valeur instantanée de la tension de sortie de l'onduleur est donnée par (3) où m est l'indice de modulation et V_{dc} la tension du bus continu. P et Q peuvent être contrôlés indépendamment en faisant varier m et δ .

$$P = \frac{V_s V_c}{X} \sin \delta \quad (1)$$

$$Q = \frac{V_s (V_s - V_c \cos \delta)}{X} \quad (2)$$

$$V_c(t) = m V_{dc} \sin(\omega t + \delta) \quad (3)$$

Le système de commande de l'onduleur est illustré à la figure 4. Le contrôleur fuzzy-PI génère la tension continue de référence qui garantit que la puissance maximale est extraite du générateur photovoltaïque. Le contrôleur PI du bus cc utilise la référence de tension pour générer la référence de courant de l'axe d. La référence de courant de l'axe q est définie sur zéro pour garantir le fonctionnement avec un facteur de puissance unitaire. La commutation de l'onduleur est contrôlée à l'aide de la modulation de largeur d'impulsion de vecteur spatial (SVPWM).

SVPWM est une technique PWM efficace qui exploite bien le bus continu et génère moins de distorsion harmonique dans un VSI triphasé (Buso et Mattavelli, 2006; Rathnakumar et al., 2005).

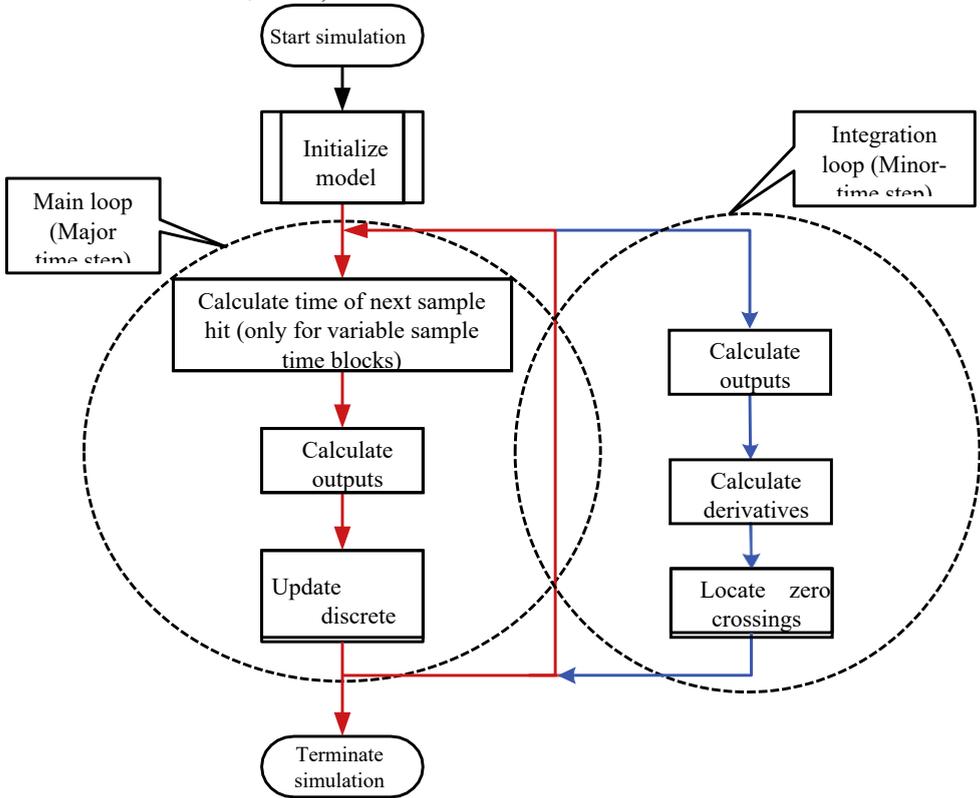


Figure 2 : Modèle de réalisation en Simulink

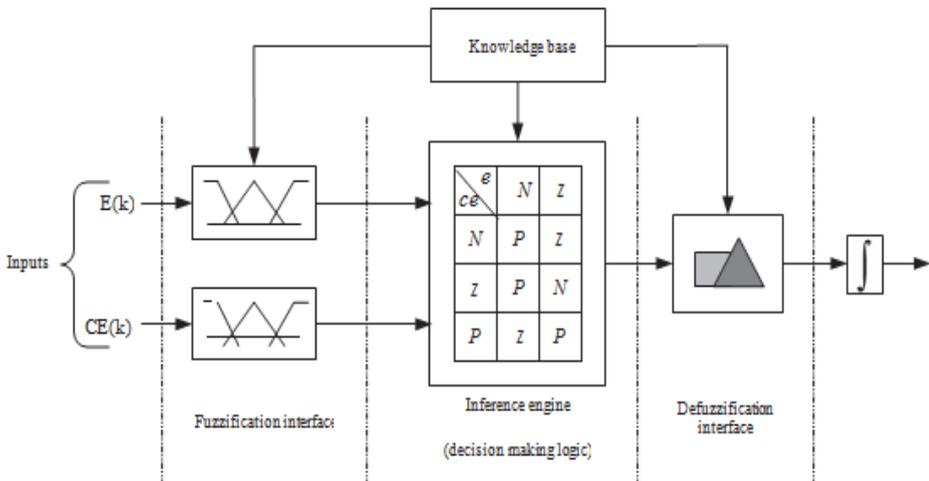


Figure 3 : Structure de fuzzy PI controller

Co-simulation dans PSIM et Simulink

Le logiciel PSIM intègre des fonctionnalités avancées dédiées à l'électronique de puissance et au contrôle de la machine avec des vitesses de simulation rapides, des algorithmes robustes, un traitement de forme d'onde puissant et une interface utilisateur conviviale. MATLAB / Simulink présente un environnement de simulation graphique adapté à la conception de contrôleurs et à la simulation de systèmes dynamiques. Cependant, la simulation de circuits électroniques de puissance dans MATLAB / Simulink présente des vitesses relativement faibles. Acciani et *al.*, (2009) ont réalisé une étude comparative de différents logiciels d'analyse du domaine temporel des circuits de commutation et ont indiqué que la co-simulation PSIM-Simulink donnait les meilleurs résultats. Khader et *al.*, (2011) recommandent également l'application de la co-simulation PSIM et Simulink dans les cours et les recherches en électronique de puissance. Une étude de Yongchang et *al.*, (2006) valide la plate-forme de co-simulation PSIM – Simulink en mettant en œuvre un variateur de vitesse à trois niveaux. PSIM fournit un module complémentaire basé sur la fonction S, appelé SimCoupler, qui fournit une interface entre PSIM et Simulink. En utilisant la co-simulation, la capacité de PSIM en simulation de puissance et celle de MATLAB / Simulink en simulation de contrôle sont pleinement exploitées.

Modélisation et simulation à l'aide de fonctions S

Les fonctions S constituent un mécanisme pratique pour mettre en œuvre des blocs de contrôle personnalisés qui échangent des données d'exécution avec les solveurs d'équation Simulink. Diverses tâches de simulation sont exécutées à l'aide d'un ensemble de méthodes de rappel à chaque étape de la simulation (Mathworks, 2007). Les étapes de la simulation sont illustrées à la figure 5. Les algorithmes mis en œuvre sous forme de fonctions S s'exécutent beaucoup plus rapidement que les fichiers m ordinaires grâce à une intégration transparente avec Simulink. Lors de l'optimisation en ligne, cette fonctionnalité améliore considérablement les vitesses de simulation et la précision des résultats.

CONCEPTION DU CONTROLEUR DE LOGIQUE FLOUE

La structure du contrôleur de logique floue est présentée à la figure 6. Il existe deux variables d'entrée, l'erreur $E(k)$ et le changement d'erreur $CE(k)$ au $k^{\text{ième}}$ instant d'échantillonnage défini aux paragraphes (4) et (5). $E(k)$ est le gradient de la caractéristique de tension d'alimentation du générateur photovoltaïque. $Ppv(k)$ est la puissance instantanée du générateur photovoltaïque et $Vdc(k)$ est la tension du

circuit intermédiaire. Lorsque $E(k) > 0$, le système se déplace vers le point de puissance maximale (MPP); en $E(k) = 0$, le système fonctionne au MPP; et pour $E(k) < 0$, le système s'éloigne du MPP.

$$E(k) = \frac{P_{pv}(k) - P_{pv}(k-1)}{V_{dc}(k) - V_{dc}(k-1)} \quad (4)$$

$$CE(k) = E(k) - E(k-1) \quad (5)$$

Les fonctions d'appartenance (MF) d'entrée pour $E(k)$ et $CE(k)$ sont définies à l'aide de MF trapézoïdales et triangulaires. Les MF sont comme indiqué à la Fig. A.7. Chaque entrée MF est définie par deux paramètres x_1 et x_2 . Le code FLC comporte neuf règles, comme indiqué dans le tableau A.2. La base de règles est modélisée à l'aide du modèle flou Takagi – Sugeno d'ordre zéro. La sortie de chaque règle est la modification de la référence de tension du bus cc évaluée à l'aide de (6). Les constantes a , b et c doivent être déterminées pour chaque MF de sortie dans la base de règles (figure 4).

ALGORITHME GENETIQUE PROPOSE

Par définition, un contrôleur flou s'appuie sur l'expérience ou sur certaines connaissances. On ne peut pas implémenter un algorithme GMPP général basé sur un contrôle flou sans connaître à l'avance le motif d'ombrage. La logique floue peut être combinée avec le balayage de la méthode caractéristique pour trouver le GMPP. Cet algorithme dépend du système. Dans cet article, la méthode de balayage est mise en œuvre par l'algorithme génétique et la logique floue qui est un algorithme de suivi général.

L'algorithme GMPPT proposé utilise un AG pour suivre le point de puissance maximale dans un système avec des panneaux photovoltaïques affectés par un ombrage partiel. La contribution de l'article est d'intégrer un algorithme flou dans la structure de l'AG. Plus il y a de fonctions ajoutées à l'algorithme AG, plus il convergera rapidement vers la solution souhaitée. Les fonctions dépendent du système à optimiser. L'inconvénient est qu'il perdra sa généralité mais deviendra spécialisé dans la recherche du GMPP.

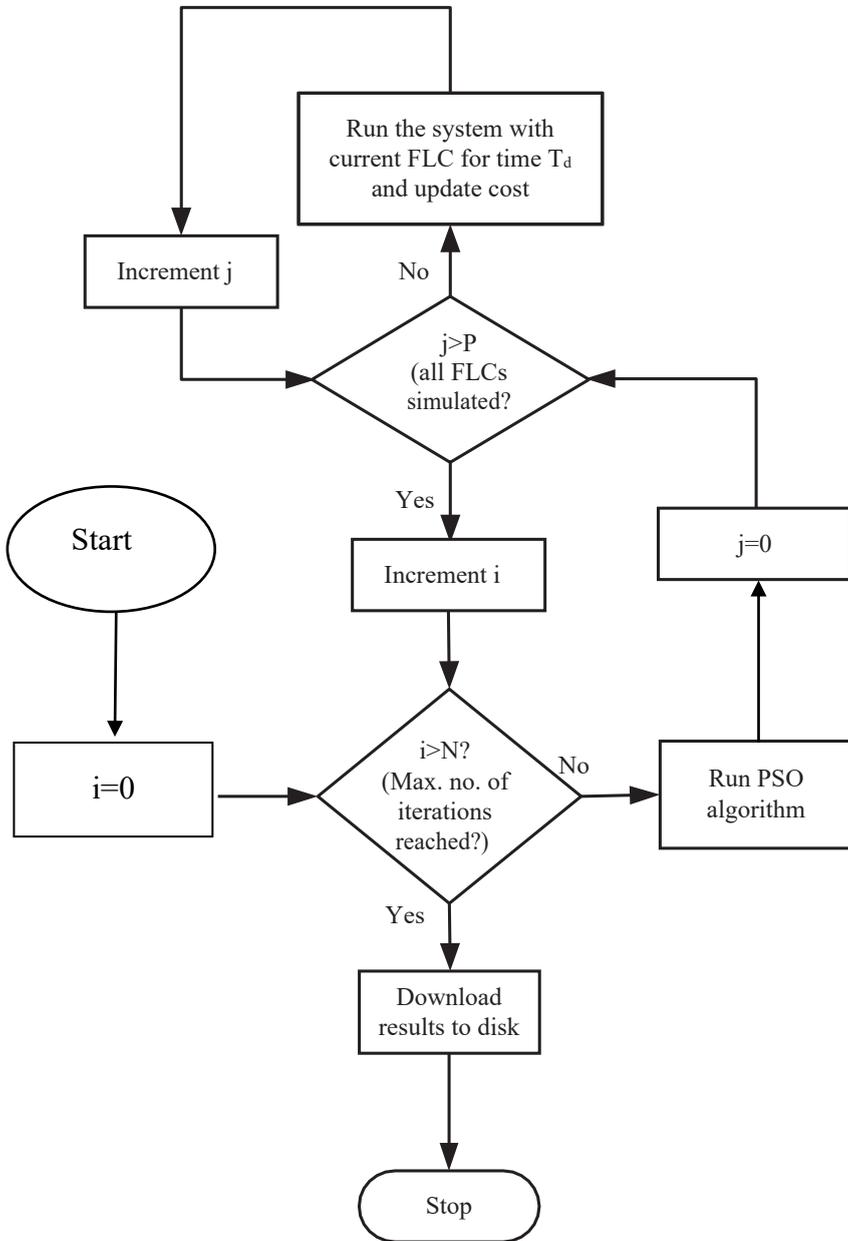


Figure 4 : Illustration des étapes d'optimisation.

La structure d'un seul individu pour le AG proposé est présentée sur la figure 8. Le premier chromosome (V_{in}) définit le point de fonctionnement et est donné par le contrôleur MPPT à l'étage de puissance comme référence de tension. Ce sont la taille du pas et la direction de la perturbation qui affectent le point de fonctionnement (V_{in}). Les autres paramètres de l'AG sont : la probabilité de croisement est de 0,8, la probabilité de mutation est de 0,1 et la taille de la population est de 10. Le nombre de gènes pour V_{in} et le nombre d'itérations seront optimisés dans la sous-section suivante.

Deux parents seront choisis avec l'opérateur de sélection. Ces parents produiront un ensemble de descendants en appliquant les opérateurs génétiques classiques (croisement et mutation). Les mêmes parents sont utilisés et obtiennent un nouvel ensemble d'individus. Les individus les plus aptes seront choisis parmi les deux ensembles (la progéniture et les parents modifiés).

L'idée nouvelle de cet algorithme GMPPT est l'intégration de l'algorithme logique flou à l'intérieur de l'AG. L'algorithme génétique perd sa généralité mais se comporte comme une logique floue qui recherche le point de puissance maximale globale dans un système affecté par un ombrage partiel. Dans la sous-section suivante, le nombre de gènes pour chaque chromosome sera optimisé et la solution finale sera donnée.

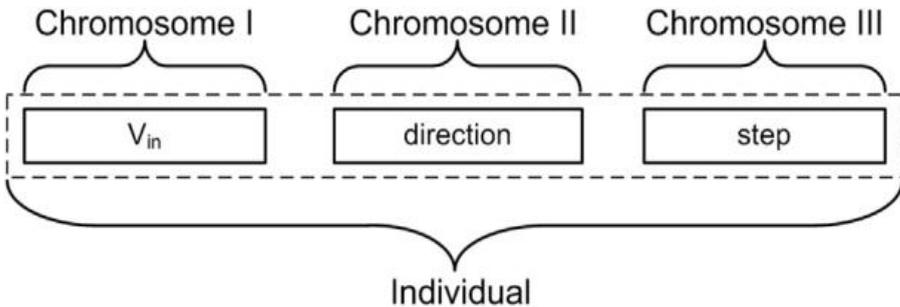


Figure 5 : Structure de l'individu.

RESULTATS DE LA SIMULATION ET DISCUSSION

Les performances du FLC ont été validées à l'aide de simulations dans différentes conditions de fonctionnement des modules PV. La figure 7 montre les performances du système lors du démarrage avec une tension initiale du condensateur de bus CC de 300 V. La tension de bus cc de la figure 8a suit

efficacement la tension de référence du MPPT flou et le système atteint l'état stable au bout de 0,7 seconde environ. Un dépassement initial de la tension du bus cc induit un effet similaire sur la puissance active générée (P_g) et la puissance réactive (Q_g). Le système de contrôle surveille efficacement la puissance maximale et maintient la puissance réactive à des valeurs proches de zéro. Le facteur de puissance mesuré du courant de réseau injecté est de 99,79% avec un THD de 6,14% lorsque la simulation est effectuée à une fréquence d'échantillonnage fondamentale de $T_s = 10$ ls. Le THD mesuré est sensible à la fréquence d'échantillonnage fondamentale utilisée dans la simulation. Avec $T_s = 1$ ls, le THD mesuré est réduit à 1,33%.

Les performances du système de contrôle ont été testées sous un changement progressif du rayonnement solaire de 1000 W / m² à 500 W / m². Les résultats sont présentés à la Fig. 8. Le contrôleur MPPT à pas fixe entraîne davantage d'oscillations dans la tension du bus continu et un THD de 10,34% dans le courant injecté à $T_s = 10$ ls.

Dans cette étude, le contrôle MPPT est obtenu à l'aide d'un contrôleur PI flou tandis que dans Lalilietal (2011), on utilise une méthode de conductance incrémentielle à pas variable. Les résultats de la simulation de cette étude et de travaux antérieurs montrent que le MPPT à gradins variables conduit à une THD inférieure dans le courant de grille injecté et à une meilleure performance constante. Le MPPT flou optimisé proposé est donc meilleur en raison de son fonctionnement par pas variable inhérent. Il a également été observé que le contrôle de la tension du bus cc de l'onduleur et du facteur de puissance peut être efficacement mis en œuvre en utilisant le contrôle du courant PI découplé dans une trame en rotation dq-référence.

CONCLUSION

Cet article propose un nouvel algorithme de suivi du point de puissance maximale à utiliser dans les systèmes avec des chaînes de panneaux photovoltaïques. Cet algorithme peut également être utilisé dans des optimiseurs de puissance qui sont montés sur de grands panneaux avec des diodes de dérivation encapsulées pour passer les tests d'endurance imposés par les normes. Un système à petite échelle a été construit pour tester la solution proposée. L'algorithme peut être facilement adapté aux systèmes avec une puissance plus élevée sans aucun changement de logiciel.

L'algorithme proposé possède une simple commande floue intégrée dans sa structure AG afin d'atteindre le point de fonctionnement optimal en un temps plus

court. La structure de l'individu de la population a été optimisée. Il est recommandé de faire en sorte que le nombre de gènes du premier chromosome (Vin) soit égal au nombre de bits de l'ADC: le nombre d'itérations peut alors être considérablement réduit.

L'algorithme proposé ne nécessite aucune configuration prédéfinie et peut être directement appliqué à tout type de caractéristique PV avec un nombre inconnu de points de puissance maximale locaux. Il n'y a pas besoin d'une méthode d'identification d'ombrage partiel pour éviter les pertes générées par des analyses inutiles. Cette commande intégrée à l'intérieur de la structure AG pour créer un algorithme unique qui réduit le temps de convergence avec de meilleurs résultats que tous les algorithmes utilisés.

Les recherches futures représenteront le calcul d'une fonction qui peut générer de meilleurs nombres aléatoires: la fonction sera basée sur la théorie du chaos. Le matériel pour un système à plus grande échelle est en cours de développement. L'algorithme proposé sera utilisé sur ce matériel avec de vrais panneaux solaires et aucune modification du logiciel. Parce que l'algorithme a un temps de suivi court, il sera adapté aux systèmes de conversion d'énergie éolienne où la vitesse du vent change plus fréquemment que l'irradiance solaire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Lalili, D., Mellit, A., Lourci, N., Medjahed, B., Berkouk, E. (2011). Input output feedback linearization control and variable step size MPPT algorithm of a grid-connected photovoltaic inverter. *Renewable Energy* 36, 3282–3291.
- 2) Ravi, A., Manoharan, P., Anand, J.V., 2011. Modeling and simulation of three phase multilevel inverter for grid connected photovoltaic systems. *Solar Energy* 85, 2811–2818.
- 3) Tsengenes, G., Adamidis, G. (2011). A multi-function grid connected PV system with three level NPC inverter and voltage oriented control. *Solar Energy* 85, 2595–2610.
- 4) Skretas, S.B., Papadopoulos, D.P. (2009). Efficient design and simulation of an expandable hybrid (wind-photovoltaic) power system with MPPT and inverter input voltage regulation features in compliance with electric grid requirements. *Electric Power Systems Research* 79, 1271–1285.
- 5) Diaz, N., Hernandez, J., Duarte, O., 2010. Fuzzy maximum power point tracking techniques applied to a grid-connected photovoltaic system. In: Grigorie, L. (Ed.), *Fuzzy Controllers, Theory and Applications*, InTech, pp. 179–194 (Chapter 9).

- 6) Zhang, G., Xu, Z., 2001. Steady-state model for VSC based HVDC and its controller design. In: *Power Engineering Society Winter Meeting*, vol. 3. IEEE, pp. 1085–1090.
- 7) Mathworks, September 2007. Simulink 7, Writing S-functions, R2007b.

ISOLEMENT ET IDENTIFICATION DU VIRUS DE LA MALADIE DE NEWCASTLE A MADAGASCAR

par

RAZAFINDRAFARA Mirantsoa S.^(1, 2), MAMINIAINA Olivier F.^(1, 2),
ANDRIANTSIMAHAVANDY Abel A.⁽³⁾, GIL Patricia^(4, 5),
RENATA S. de Almeida^(4, 5), EMMANUEL Albina^(5, 6)

(1) FOFIFA-DRZVP, Antananarivo, Madagascar

(2) IMVAVET, Antananarivo, Madagascar,

(3) Université d'Antananarivo Madagascar, Antananarivo, Madagascar,

(4) CIRAD, UMR ASTRE, F-34398 Montpellier, France,

(5) ASTRE, CIRAD, INRA, Univ Montpellier, Montpellier, France,

(6) CIRAD, UMR ASTRE, F-97130 Capesterre-Belle-Eau, Guadeloupe, France

RESUME

La maladie de Newcastle (MN) est une virose aviaire très contagieuse et qui limite le développement de l'aviculture malgache. La vaccination est appliquée dans le but de limiter l'infection, cependant, la différence génétique entre souches vaccinales et souches circulantes engendre le phénomène d'excrétion virale.

En effet, les volailles immunisées par les vaccins anti-Newcastle mais en contact avec les souches circulantes peuvent être infectées et excrétées le virus tout en restant cliniquement sains. Ainsi, de nouveaux vaccins homologues des souches circulantes doivent être investigués afin d'améliorer l'efficacité vaccinale. Cependant, cela nécessite l'identification moléculaire des souches circulantes à Madagascar. L'isolement viral sur œufs embryonné de poule suivie de l'extraction d'ARN viral, de l'amplification par RT-PCR et de séquençage ont été réalisés en vue d'obtenir les séquences du génome viral. Puis, l'analyse moléculaire du gène F obtenu a été réalisée en utilisant la bio-informatique.

Cette étude a permis de caractériser sept isolats appartenant à la classe II et au génotype XI. L'analyse de la protéine F a montré que les isolats sont très virulents avec toutefois la présence de deux types de sites de clivage: $^{112}RRRRR * F^{117}$ et $^{112}RRRKR * F^{117}$. Ce résultat indique que les isolats malgaches présentent une variabilité génétique entre eux qui pourrait être en rapport avec les échecs vaccinaux observés sur le terrain. Ainsi, ces données génétiques seraient nécessaires dans le contrôle et la prévention de la MN à Madagascar notamment dans la recherche des formulations vaccinales adéquates qui doit être envisagée dans l'avenir.

Mots clés : maladie de Newcastle, APMV-1, volailles, isolats, analyse moléculaire.

ABSTRACT

Newcastle disease (ND) is a highly contagious avian virus that limits the development of Malagasy poultry. Vaccination is applied in order to limit the infection, however, the genetic difference between vaccine strains and circulating strains generates the phenomenon of viral shedding.

Indeed, poultry immunized with anti-Newcastle vaccines but in contact with circulating strains can be infected and excreted the virus while remaining clinically healthy. Thus, new homologous vaccines of circulating strains must be investigated in order to improve vaccine efficiency. However, this requires molecular identification of the strains circulating in Madagascar. Viral isolation from embryonated chicken eggs followed by extraction of viral RNA, amplification by RT-PCR and sequencing were carried out in order to obtain the sequences of the viral genome. Then, the molecular analysis of the F gene obtained was carried out using bioinformatics.

This study made it possible to characterize seven isolates belonging to class II and genotype XI. Analysis of the F protein showed that the isolates are very virulent with the presence of two types of cleavage sites: $^{112}\text{RRRRR} * \text{F}^{117}$ and $^{112}\text{RRRKR} * \text{F}^{117}$. This result indicates that the Malagasy isolates have a genetic variability between them which could be related to the vaccine failures observed in the field. Thus, this genetic data would be necessary in the control and prevention of ND in Madagascar, in particular in the search for adequate vaccine formulations which must be considered in the future.

Key Words : Newcastle disease, APMV-1, poultry, isolates, molecular analysis.

INTRODUCTION

La maladie de Newcastle (MN) est une virose aviaire hautement contagieuse causant de sévères pertes économiques dans de nombreux pays. L'agent causal est un paramyxovirus aviaire de sérotype 1 (APMV-1) qui est un virus à ARN simple brin de polarité négative. L'APMV-1 possède une grande capacité de mutation entraînant ainsi le développement de plusieurs génotypes à travers le monde (Ewies et al. 2017). Le génome est formé de six gènes de structures 3'-NP - P - M - F - HN - L-5' codant pour six protéines structurales notamment nucléoprotéine, phosphoprotéine, protéine de matrice, protéine de fusion, hémagglutinine-neuraminidase et l'ARN polymérase ARN dépendante (Connaris et al. 2002).

A Madagascar, la MN a été décrite pour la première fois en 1946 et elle est définie comme étant une maladie redoutable dans le secteur avicole (Rajaonarison 1991, Maminiaina et *al.* 2007). Dans le secteur avicole commercial où les animaux bénéficient d'un programme de vaccination régulier et de niveau de biosécurité élevée, des cas sporadiques de la MN ont été encore rapportés. Dans le secteur avicole villageois, la MN est à l'origine de mortalité réduisant de plus de 90% les cheptels aviaires des élevages atteints entraînant ainsi une lourde perte économique aux aviculteurs malgaches. Récemment, 14 isolats d'APMV-1 ont été identifiés dans la région d'Analamanga et d'Alaoatra mangoro). Ils appartiennent au génotype XI de la classe II et se définissent comme des souches très virulentes (Maminiaina et *al.* 2010).

Les vaccins anti-Newcastle utilisés à Madagascar sont à base des souches provenant de génotype II et III alors que les souches circulantes sont de génotype XI. Cela crée le phénomène d'excrétion virale puisqu'il est montré qu'une souche vaccinale éloignée au niveau phylogénétique des souches circulantes n'assure pas une meilleure protection, en termes d'excrétion du virus sauvage, qu'une souche vaccinale homologue (Miller et *al.* 2007). De nouveaux vaccins homologues des souches circulantes sont alors indispensables pour augmenter l'efficacité vaccinale. En revanche, la caractérisation génétique des isolats responsable des foyers de la MN dans les élevages aviaires est d'importance capitale pour la formulation de vaccins. Dans cette étude, nous avons réalisé la caractérisation moléculaire des APMV-1 circulants dans différentes zones.

MATERIELS ET METHODES

Isolement du virus

Des échantillons de tissus cérébraux prélevés au cours des foyers de la MN entre 2012 et 2014, ont été utilisés dans cette étude. Les échantillons positifs au criblage par RT-PCR en temps réel ont été inoculés sur des œufs embryonnés de poule de 9 à 11 jours et exempts d'organismes pathogènes spécifiques (OIE 2012). Ensuite, le liquide allantoïdien a été extrait, soumis à nouveau à la technique de RT-PCR en temps réel puis envoyé au CIRAD ASTRE Montpellier, France pour une analyse ultérieure.

Extraction d'ARN, amplification et séquençage

L'ARN viral a été extrait du liquide allantoïdien à l'aide du kit Nucleospin® RNA Virus. Pour l'amplification, nous avons utilisé la méthode d'amplification indépendante de la séquence à amorce unique (single-primer sequence independent amplification, SISPA). En bref, l'ADN complémentaire (ADNc) du premier brin

a été synthétisé en utilisant le kit Revert Aid first strand cDNA synthesis avec l'amorce 454-E contenant une séquence fixe suivie d'un octomère randomisé à l'extrémité 3'. La synthèse de l'ADN double brin a ensuite été réalisée en utilisant le fragment polymérase de klenow. Puis, l'amplification par PCR a été réalisée en utilisant l'amorce 454-E constituée des parties fixées de l'amorce aléatoire. Les amplicons ont été purifiés en utilisant la technologie Ampure (AMPure XP, Beckman Coulter) puis séquencés selon la méthode NGS de la plate-forme Ion Personal Genome Machine (PGM) de Thermo Fisher Scientific.

Analyse phylogénétique

L'analyse phylogénétique a été réalisée à l'aide du logiciel MEGA 7 (Kumar et al. 2016). Nous avons choisi d'étudier le gène F qui possède des séquences quasi-complet pour la phylogénie. Les séquences du gène F ont été analysées avec les séquences précédemment publiées dans Genbank afin de construire l'arbre phylogénétique. L'arbre phylogénétique a été construit par la méthode du Maximum Likelihood basée sur le modèle GTR, avec 1 000 réplifications de bootstrap (Nei and Kumar 2000).

RESULTATS ET DISCUSSION

Virulence de la souche

Les séquences codant pour le gène F de sept isolats circulants dans cinq régions de Madagascar ont été obtenues dans cette étude (Tableau 1). La pathogénicité des isolats a été évaluée en fonction de la séquence du site de clivage de la protéine F, car il s'agit du principal déterminant moléculaire de la pathogénicité (Peeters et al. 1999). Les séquences d'acides aminés du site de clivage de la protéine F ont révélé que tous les isolats avaient de multiples acides aminés basiques aux positions 112-116 et un résidu phénylalanine en position 117. La plupart des souches (n=5) avaient le motif $^{112}\text{RRRRR}^*\text{F}^{117}$, partageant les motifs avec les quatorze virus malgaches précédemment identifiés. Cependant, deux isolats avaient un nouveau motif $^{112}\text{RRRKR}^*\text{F}^{117}$. La forte proportion d'acides aminés basiques et la présence d'une phénylalanine en position 117 (F117) sont caractéristiques des souches virulentes, comme décrit précédemment pour d'autres souches d'APMV-1 (Huovilainen et al. 2001, Terregino et al. 2003).

Mutation d'acides aminés et analyse phylogénétique

Afin de déterminer la relation phylogénétique entre les nouvelles souches malgaches et d'autres APMV-1 isolés dans le monde entier, les séquences codant pour le gène F de quatre-vingt-quatre isolats (n=84) ont été utilisées pour construire un arbre phylogénétique (Figure 1). L'analyse phylogénétique démontre que les sept

isolats malgaches appartiennent à la classe II et au génotype XI. Ce génotype XI circule uniquement à Madagascar et est le seul principal agent responsable des foyers de la MN dans ce pays. Ceci est dû au fait que Madagascar est un pays où la biodiversité est particulièrement importante. En effet, la grande diversité des écosystèmes naturels a favorisé l'évolution de diverses espèces (animales, végétales, bactériennes et virales) mises en place et qui y ont trouvé les conditions favorables à leur développement.

Par ailleurs, bien que toutes les souches appartiennent à un seul génotype, différentes mutations au niveau des principaux motifs antigéniques viraux sont observées sur la protéine F (Tableau 2). En effet, la protéine F contient plusieurs épitopes neutralisants qui sont connus pour être importants pour leur structure et leur fonction (Toyoda et al. 1988). Six isolats ont partagé les résidus D⁷², E⁷⁴, A⁷⁵, K⁷⁸, A⁷⁹, L³⁴³ et le segment ¹⁵¹ILRLKESIAATNEAVHEVTDG¹⁷¹. Cependant, l'isolat MG_MEN présente le segment ¹⁵¹ILQLKESIAATNEAVHEVTDG¹⁷¹ où une substitution de R en Q en position 153 est observée (tableau 2). Des substitutions d'acides aminés des épitopes neutralisants ont déjà été signalées comme responsables de la neutralisation des variant d'échappement (Snoeck et al. 2013)

Tableau 1. Description des sept isolats de NDV de Madagascar

Isolats	Hôte	Année	Région	Gène	Génotype	Site de cleavage
MG_ANJ03	Poulet	2014	Analanjirofo	F	XI	¹¹² RRRRRF ¹¹⁷
MG_ANJ05	Poulet	2014	Analanjirofo	F	XI	¹¹² RRRRRF ¹¹⁷
MG_VAT	Poulet	2014	Atsinanana	F	XI	¹¹² RRRRRF ¹¹⁷
MG_SOFT	Poulet	2014	Sofia	F	XI	¹¹² RRRRRF ¹¹⁷
MG_SOF	Poulet	2014	Sofia	F	XI	¹¹² RRRRRF ¹¹⁷
MG_MEN	Poulet	2014	Menabe	F	XI	¹¹² RRRKR ¹¹⁷
MG_AND	Poulet	2012	Androy	F	XI	¹¹² RRRKR ¹¹⁷

Tableau 2. Substitution d'acides aminés de la protéine F

Isolats	Epitope de neutralisation	Résidus d'acides aminés						
		49	150	251	288	349	400	476
Consensus	153	A	N	T	T/N	R	R	K
MG_VAT								
MG_ANJ03	-	-	D	-	-	-	-	-
MG_ANJ05	-	-	-	-	-	-	-	-

MG_SOFT	-	-	-	-	-	-	-	-
MG_SOF	-	S	-	-	-	-	-	-
MG_MEN	-	-	-	-	I	-	-	M
MG_AND	Q	-	-	A	-	-	A	-
	-	-	-	-	-	I	-	-

Tout cela suggère la présence d'une grande diversité génétique d'APMV-1 malgaches qui mériteraient dans un proche avenir une délimitation de nouveaux sous-génotypes lorsque plus d'isolats seront disponibles.

Divers facteurs peuvent intervenir dans l'évolution au sein d'APMV-1 malgaches. D'une part, la défaillance de la vaccination dans le contrôle d'excrétion virale. En effet, les vaccins anti-Newcastle utilisés à Madagascar sont à base des souches lentogènes (La Sota ou B1) et mésogènes Mukteswar (Biswas et *al.* 1996) alors que le NDV circulant dans l'île fait partie des souches virulentes de génotypes XI. Ce qui entraîne, la recirculation du virus dans l'environnement et l'acquisition de mutations (Perozo et *al.* 2012). D'autre part, les marchés des oiseaux vivants ont été considérés comme relai pour le maintien et l'évolution des souches virulentes d'APMV-1. En effet, différentes espèces provenant de différentes régions avicoles sont regroupées dans ces lieux permettant ainsi le brassage des oiseaux et l'expansion rapide des souches virales (Umar 2017).

CONCLUSION

Les isolats d'APMV-1 malgaches appartenaient au génotype XI mais une évolution rapide et intense au sein du gène F est observée. Cette évolution pourrait éventuellement conduire à la délimitation de nouveaux sous-génotypes et génotypes dans un avenir proche et lointain, respectivement. L'émergence et la propagation des variantes d'APMV-1 à Madagascar représentent une menace importante pour le secteur avicole. Par conséquent, une surveillance continue des modifications génétiques virales et la mise à jour du vaccin sont nécessaires pour garder le contrôle sur la prévention des nouveaux foyers.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été effectué en collaboration avec FOFIFA-DRZVP Antananarivo Madagascar et UMR-ASTRE Montpellier France. Il a été soutenu financièrement par le projet JEAIRD-ViroMada, par le FOFIFA-DRZVP et par l'UMR-ASTRE Montpellier France.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Biswas, H.R.; Haoque, M.M.; Oxley, M.; Prodhan, M.A.M. 1996. A comparative study on the protection of indigenous chickens against Newcastle disease induced by Australian NDV4HR and locally produced conventional vaccines in Bangladesh. *Preventive Veterinary Medicine* 26: 157–164.
- 2) Connaris, H.; Takimoto, T.; Russell, R.; Crennell, S.; Moustafa, I.; Portner, A.; et al. 2002. Probing the sialic acid binding site of the hemagglutinin-neuraminidase of Newcastle disease virus: identification of key amino acids involved in cell binding, catalysis, and fusion. *Journal of virology* 76: 1816–1824.
- 3) Ewies, S.S.; Ali, A.; Tamama, S.M.; Madbouly, H.M. 2017. Molecular characterization of Newcastle disease virus (genotype VII) from broiler chickens in Egypt. *Beni-Suef University Journal of Basic and Applied Sciences* 6: 232–237.
- 4) Huovilainen, A.; Ek-Kommone, C.; Manvell, R.; Kinnunen, L. 2001. Phylogenetic analysis of avian paramyxovirus 1 strains isolated in Finland. *Archives of virology* 146: 1775–1785.
- 5) Kumar, S.; Stecher, G.; Tamura, K. 2016. MEGA7: Molecular Evolutionary Genetics Analysis Version 7.0 for Bigger Datasets. *Molecular Biology and Evolution* 33: 1870–1874.
- 6) Maminiaina, O.F.; Koko, M.; Ravaomanana, J.; Rakotonindrina, S.J. 2007. [Epidemiology of Newcastle disease in village poultry farming in Madagascar]. *Revue scientifique et technique (International Office of Epizootics)* 26: 691–700.
- 7) Maminiaina, O.F.; Gil, P.; Briand, F.-X.; Albina, E.; Keita, D.; Andriamanivo, H.R.; et al. 2010. Newcastle disease virus in Madagascar: identification of an original genotype possibly deriving from a died out ancestor of genotype IV. *PloS one* 5: e13987.
- 8) Miller, P.J.; King, D.J.; Afonso, C.L.; Suarez, D.L. 2007. Antigenic differences among Newcastle disease virus strains of different genotypes used in vaccine formulation affect viral shedding after a virulent challenge. *Vaccine* 25: 7238–7246.
- 9) Nei, M.; Kumar, S. 2000. *Molecular Evolution and Phylogenetics*. Oxford University Press, .
- 10) OIE. 2012. Newcastle disease. In Biological Standards Commission, Manual of diagnostic tests and vaccines for terrestrial animals: mammals, birds and bees,. *World Organisation for Animal Health* Vol. 1, Part 2, Chapter 2.3.14, 7 ed. 555–574
- 11) Peeters, B.P.; de Leeuw, O.S.; Koch, G.; Gielkens, A.L. 1999. Rescue of Newcastle disease virus from cloned cDNA: evidence that cleavability of the

- fusion protein is a major determinant for virulence. *Journal of virology* 73: 5001–5009.
- 12) Perozo, F.; Marcano, R.; Afonso, C.L. 2012. Biological and phylogenetic characterization of a genotype VII Newcastle disease virus from Venezuela: efficacy of field vaccination. *Journal of clinical microbiology* 50: 1204–1208.
- 13) Rajaonarison, J.J. 1991. *Production de vaccin contre la maladie de Newcastle a Madagascar*. PANVAC Debre Zeit Addis Ababa., pp 135-137p.
- 14) Snoeck, C.J.; Owoade, A.A.; Couacy-Hymann, E.; Alkali, B.R.; Okwen, M.P.; Adeyanju, A.T.; et al. 2013. High genetic diversity of Newcastle disease virus in poultry in West and Central Africa: cocirculation of genotype XIV and newly defined genotypes XVII and XVIII. *Journal of clinical microbiology* 51: 2250–2260.
- 15) Terregino, C.; Cattoli, G.; Grossele, B.; Bertoli, E.; Tisato, E.; Capua, I. 2003. Characterization of Newcastle disease virus isolates obtained from Eurasian collared doves (*Streptopelia decaocto*) in Italy. *Avian pathology: Journal of the W.V.P.A* 32: 63–68.
- 16) Toyoda, T.; Gotoh, B.; Sakaguchi, T.; Kida, H.; Nagai, Y. 1988. Identification of amino acids relevant to three antigenic determinants on the fusion protein of Newcastle disease virus that are involved in fusion inhibition and neutralization. *Journal of virology* 62: 4427–4430.
- 17) Umar, S. 2017. Emergence of new sub-genotypes of Newcastle disease virus in Pakistan. *World's Poultry Science Journal* 73: 567–580.

DETECTION ET RECONNAISSANCE DU TROUPEAU EN DEPLACEMENT PAR UN DRONE

par

TSIMITAMBY Briand ^(1,3), SAMBATRA E. J. ^(1,3), RAZAFINDRADINA H. B. ^(1,4),
RAMANANTSOA H. ^(1,5), ANDRIANIRINA C. B. ^(2,3)

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

(2) Institut Supérieur des Sciences et Technologies de l'Université de Mahajanga

(3) Ecole Doctorale Thématique « Energies Renouvelables et Environnement » de l'Université d'Antsiranana

(4) Equipe d'accueil TASI Antananarivo

(5) Problématique de l'éducation et didactique des disciplines (PE2Di), ENS à Antananarivo

RESUME

Cet article intègre la reconnaissance des objets en déplacement à l'aide de la photographie aérienne par un Drone de type Quadcopter. L'étude a été effectuée afin d'aider les forces de l'ordre pour localiser les Dahalo (voleurs de zébus). Sur la base des analyses comportementales effectuées antérieurement, le Drone parcourt des chemins probabilistes du lieu du vol jusqu'au au point de régularisation des papiers des zébus volés. Lors de son déplacement, le Quadcopter utilise une caméra embarquée pour visualiser ses alentours et identifier les Dahalo mais la façon dont il procède n'a pas été développée. Plus concrètement, cette contribution révèle les techniques de photographie aérienne et d'analyse d'images utilisées pour détecter et ou localiser ce troupeau en déplacement avec une bonne précision géographique. Après programmation de son vol, cet aéronef télépiloté suit sa trajectoire, filme ses environs, prend des photos et transmet les vidéos et photos prises à la station de base. Cette dernière analyse la ressemblance des images reçues et émet des alertes aux forces de l'ordre en cas de suspicion.

Mots Clés : Comportement dynamique, Photo aérienne, Analyse d'images, Drone, indexation d'image, Intelligence artificielle

ABSTRACT

This article integrates the recognition of moving objects using aerial photography by a Drone. The study was carried out to assist police forces to locate the Dahalo (zebu thieves). On the basis of the behavioral analyzes carried out previously, the Drone travels probabilistic paths from the place of the flight to the regularization point of the paper of the stolen zebus. During its movement, the

Quadcopter uses an on-board camera to visualize its surroundings and identify the Dahalos, but the way it proceeds has not been developed. This contribution reveals the aerial photography and image analysis techniques used to detect and locate the herd of zebus in movement with good geographic precision. After programming its flight, this remote-controlled aircraft follows its trajectory, films its surroundings, takes photos and transmits the videos and photos taken to the base station. The base station analyzes the resemblance of the images received and issues an alert to the police forces in the event of suspicion.

INTRODUCTION

Madagascar figure parmi les pays les plus pauvres du monde dont l'élevage et l'agriculture font partie de ses secteurs principaux économiques [1]. Il représente plus de 30% du PNB [2]. L'insécurité fragilise ces volets surtout le vol des zébus alors que les villageois injectent la majeure partie de leurs investissements dans cette filière. Ils constituent aussi leurs épargnes et leurs outils pour labourer la terre et transporter les produits. Ce phénomène de vol de zébus a pris une ampleur de quelques têtes, d'antan, à plusieurs milliers, actuellement, en une année, environs 12 000 têtes soit 19 200 000 000 Ar en évaluant le prix d'un zébu à 1 600 000 Ar [3]. Malgré les efforts effectués par le gouvernement plus particulièrement les forces de l'ordre ce phénomène persiste toujours. Cette situation, nous conduit à proposer d'équiper les forces de l'ordre pour traquer ces malfrats et ramener les zébus volés.

L'objectif est de fournir aux forces de l'ordre un Drone. Cela permet de faciliter et d'accélérer la recherche des zébus perdus et minimiser ainsi les pertes humaines.

Ce travail a été réalisé via un Drone de type Quadcopter, ce dernier prend des photos et les envoie à la station au sol puis la station au sol analyse en même temps les images prises et communique à l'utilisateur les résultats afin de prendre une décision. Pour ce faire, un algorithme d'analyse d'image a été développé, cet algorithme permet de déterminer la similitude entre les images captées. Avant de quitter le sol, le Drone est programmé pour suivre des trajectoires générées dans [4] [5] et liées aux comportements des Dahalo en déplacement. Lors de son passage, sur chaque passage obligé (tous les 100m environ), il prend des photos et transmet les photos prises à la station au sol. Cette station de base analyse la similitude des images reçues en calculant la corrélation des histogrammes du troupeau.

Cet article se divise en cinq sections, la première parle l'état de l'art, la deuxième décrit les méthodes et outils, la troisième mesure la similarité des images, la quatrième identifie les couleurs correspondants aux zébus et la dernière montre les résultats et discussion.

ETAT DE L'ART

Selon [6] [7] [8] [9] [10] [11] [12] [13], Il existe deux techniques d'indexation d'images : le calcul de la différence point à point et le calcul de la similarité basée sur le contenu de l'image. La première mesure la différence réelle entre les images mais ne prend pas en compte le contenu d'image. La deuxième est basée sur l'extraction d'attributs représentant le contenu sémantique de l'image. Dans notre approche, on suppose que l'image est fixe et elle est indépendante de l'angle de prise de vue. Ce qui nous ramène à choisir la deuxième méthode. Pour la deuxième méthode le contenu peut être les couleurs primaires RGB ou les textures de l'image ou encore les formes de l'image [12].

L'indexation par couleur est indépendante de la taille d'image et de son orientation mais sans segmentation, elle est relativement peu robuste sur des fonds d'images différents [13]. L'indexation par la forme utilise les caractéristiques, les contours ou la forme de l'image proprement dite. La reconnaissance par la forme nécessite la connaissance préalable de l'information de l'image étudiée.

L'indexation par texture utilise des outils statistiques comme la moyenne, variance, moment, etc. Il donne un résultat très précis [13]. Mais il nécessite la connaissance des motifs ou des couleurs. Alors que la couleur peut être influencée par l'environnement extérieur comme la lumière solaire, la pluie, etc. En plus les objets à détecter sont en déplacement ; ils peuvent changer leur place pour des prises de photos différentes. Cela peut varier la distribution de la couleur sur des mêmes objets dans des photos prises dans des emplacements différents. Donc l'indexation par texture n'est pas aussi fiable pour étudier la similarité des objets en déplacement.

Pour mesurer cette similarité, certaines littératures utilisent les distances (distance euclidienne, distance entre histogramme, distance entre distribution, distance quadratique, etc.) et d'autres utilisent les histogrammes [11]. Un histogramme est un outil statistique qui permet d'estimer la densité de probabilité d'une distribution à partir d'échantillons.

Comme mentionné précédemment, le calcul de distance n'est pas fiable puisque le troupeau est en déplacement. La mesure de l'histogramme seule n'est pas suffisante puisqu'il utilise la perception de couleur visuel (indexation par couleur). Un même objet pris dans des endroits différents (fonds différents) risque de perdre la ressemblance.

Dans cet article, nous proposons une nouvelle technique de mesure de similarité des images. Cette technique est basée sur la corrélation des histogrammes des objets (images sans fonds) à évaluer.

METHODOLOGIE ET OUTILS

La première étape de ce workflow consiste le chargement de trajectoire dans le Quadcopter, ensuite la prise des photos par le Quadcopter, puis l'envoi des images prise à la station au sol, l'étude de la similarité des photos reçues afin de prendre des décisions et enfin l'affichage de coordonnées GPS du lieu où se trouve le troupeau. L'analyse de la ressemblance des images a été faite à l'aide des outils statistiques dans la station au sol. Cette dernière est de type PC téléporté, par une voiture, équipé d'un kit WIFI à longue portée. La prise de photos a été faite à un intervalle régulier (tous les 100m environ). L'embarquement de la trajectoire du Drone et l'analyse des images ont été réalisés avec l'outil Matlab/Simulink de la société Mathworks.

La figure 1 illustre le schéma synoptique du système de géolocalisation du troupeau en déplacement.

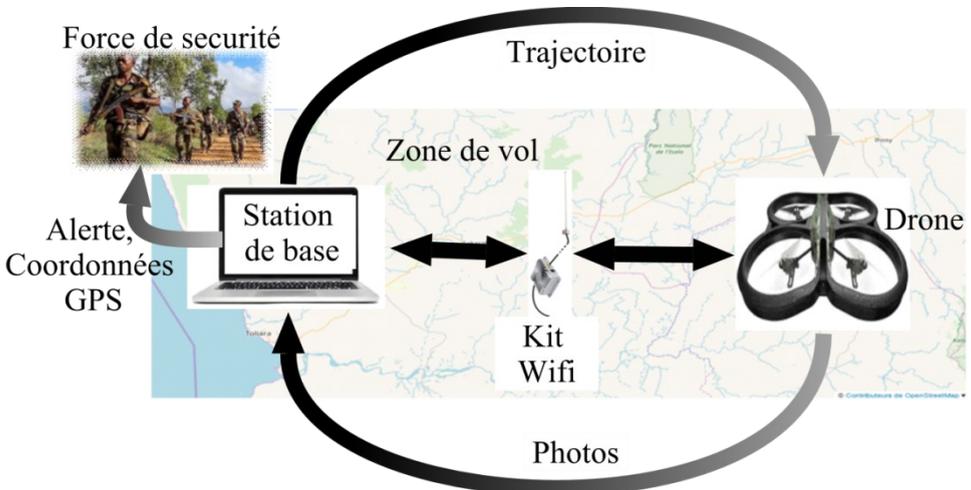


Figure 1 : Schéma synoptique du système de géolocalisation du troupeau en déplacement

Le Quadcopter a été programmé depuis un ordinateur de catégorie Laptop. En cas d'urgence, il peut être piloté depuis cet ordinateur. La figure 2 généralise le mode opératoire de l'ensemble du système.

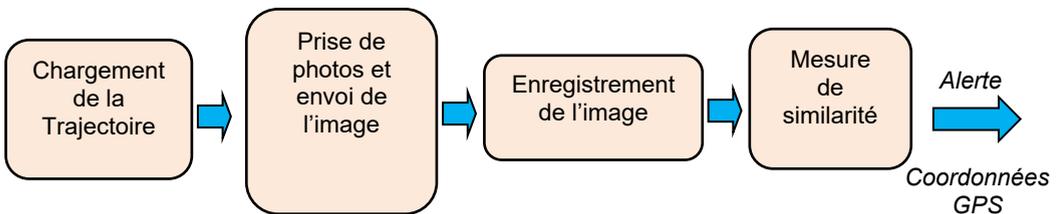


Figure 2 : Mode opératoire de l'ensemble du système de géolocalisation du bétail

L'étape 1 consiste à embarquer le plan de vol dans le Quadcopter.

Dans l'étape 2, le Drone prend des photos à chaque passage au passage obligé et envoie l'image prise à la station au sol.

Dans l'étape 3, la station au sol enregistre chaque image reçue dans une base de données.

Dans l'étape 4, la station au sol mesure la similarité des images reçues. Chaque image reçue est comparée successivement à des images qui ont été déjà enregistrées dans la base de données. Lorsque 2 images reçues dans deux zones différentes se ressemblent plus de 60%, la station au sol émet une alerte aux forces de l'ordre.

L'étape 4 peut être schématisée comme suit :

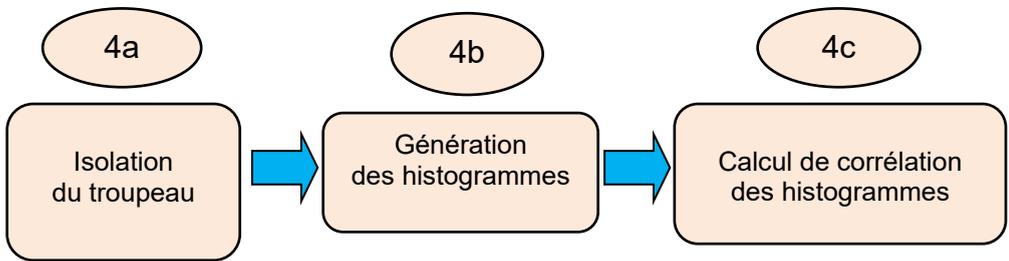


Figure 3 : Schéma synoptique de mesure de similarité

Dans 4a, on extrait les couleurs qui correspondent aux couleurs des zébus sur les deux images à comparées.

Dans l'étape 4b, on calcule les histogrammes des couleurs qui correspondent aux couleurs des zébus sur les deux images comparées.

Dans l'étape 4c, on calcule la corrélation des histogrammes.

Pour la mesure de similarité des images, plusieurs expériences ont été effectuées :

- la première compare deux photos différentes (même troupeau, fonds de l'image différents) ;
- la deuxième compare deux photos différentes (même troupeau, fonds de l'image différents, nombre de zébus différents).
- la troisième compare deux photos différentes (troupeaux différents, fonds différents).

Pour ces expériences, la corrélation des histogrammes a été calculée à partir des histogrammes des couleurs des zébus extraits dans les images concernées ; c'est-à-dire à partir des pixels qui correspondent aux couleurs des zébus.

SIMILARITE DE L'IMAGE

L'image est formée par un ensemble de points ou pixels. Chaque pixel est une superposition des couleurs RGB (Red Green Blue) répartie en trois plans (plan R, plan G et plan B).

Le coefficient de corrélation « r » des histogrammes des objets étudiés est donnée par la formule suivante :

$$r = \frac{\text{Cov}(H_X, H_Y)}{\sigma_{H_X} \sigma_{H_Y}} \quad (1)$$

H_X : Histogramme de l'image X

H_Y : Histogramme de l'image Y

$\text{Cov}(H_X, H_Y)$: Covariance de X et Y

$\sigma_{H_X}, \sigma_{H_Y}$: Écarts types de X et Y

La valeur absolue de r nous permet d'en déduire la ressemblance des photos, Pour deux photos prise dans des endroits différents, si r est proche de 1 après la comparaison, on peut dire que ce sont des mêmes objets. La ressemblance se perd au fur et à mesure que r tend vers 0. Aucune ressemblance n'existe entre les deux photos si r vaut 0. La relation suivante régit ces variations de corrélation :

$$\begin{cases} 0 < r < 1 \\ r \cong 0: \text{aucuneressemblance} \\ r \cong 1: \text{ressemblancetotale} \end{cases} \quad (2)$$

Pour le calcul, chaque pixel est sectionné d'abord en 3 plans, plan R, plan G et plan B et le calcul de coefficient des corrélations est appliqué sur chaque plan de l'image comparée.

On définit les paramètres suivants :

H_{Xr} : Histogramme des pixels R de l'image X

H_{Xg} : Histogramme des pixels G de l'image X

H_{Xb} : Histogramme des pixels B de l'image X

H_{Yr} : Histogramme des pixels R de l'image Y

H_{Yg} : Histogramme des pixels G de l'image Y

H_{Yb} : Histogramme des pixels B de l'image Y

$$\left\{ \begin{array}{l} Pr = \text{Corr}(H_{Xr}, H_{Yr}) = \frac{\text{Cov}(H_{Xr}, H_{Yr})}{\sigma_{Xr} \sigma_{Yr}} \quad (3) \\ Pg = \text{Corr}(H_{Xg}, H_{Yg}) = \frac{\text{Cov}(H_{Xg}, H_{Yg})}{\sigma_{Xg} \sigma_{Yg}} \\ Pb = \text{Corr}(H_{Xb}, H_{Yb}) = \frac{\text{Cov}(H_{Xb}, H_{Yb})}{\sigma_{Xb} \sigma_{Yb}} \end{array} \right.$$

A = [Pr, Pg, Pb] : Matrice de corrélation des histogrammes (4)

r = |Moy(A)| : Valeur absolue en rapport avec (2) (5)

IDENTIFICATION DES COULEURS DE ZEBUS

Les zébus ont des couleurs très variées. On peut citer les couleurs : noir, blanc, rouge clair, rouge vif, gris clair, gris vif, marron, etc.

Selon l'observation et les enquêtes effectuées, le tableau suivant montre une liste non exhaustive des couleurs de zébus existantes.

Tableau 1 : Liste des couleurs de zébus :

Couleurs	Valeurs R G B	Couleurs	Valeurs RGB
0, 0, 0	0 0 0	128, 0, 0	128 0 0
0, 0, 32	0 0 32	128, 32, 32	128 32 32
32, 0, 0	32 0 0	160, 0, 0	160 0 0
64, 0, 0	64 0 0	160, 64, 32	160 64 32
64, 32, 0	64 32 0	192, 0, 0	192 0 0
96, 0, 0	96 0 0	128, 128, 128	128 128 128
96, 32, 32	96 32 32	255, 255, 255	255 255 255

Ces différentes couleurs peuvent être catégorisées comme montre le tableau 2.

Tableau 2 : Plages RVB et Combinaisons RVB de couleurs :

Couleur	Plages RVB			Combinaison RVB
	R	V	B	
Noir	[0 – 15]	[0 - 15]	[0 – 15]	0, 0, 0
				15, 10, 5
				15, 15, 15
Blanc	[240-255]	[240-255]	[240-255]	240, 240, 240
				230, 225, 255
				255, 255, 255
Gris Pure (R=V=B)	[30-225]	[30-225]	[30-225]	30, 30, 30
				128, 128, 128
				225, 225, 225
Gris ($0 < R-G \leq 15$) ($0 < R-B \leq 15$) ($0 < G-B \leq 15$)	[30-225]	[30-225]	[30-225]	30, 40, 45
				128, 134, 143
				225, 210, 218
Rouge	[150-255]	[0-15]	[0-15]	150, 0, 0
				225, 0, 0
				255, 15, 15
Brun ($R > V > B$) ($0 \leq R-G \leq 90$) ($0 \leq G-B \leq 60$)	[30-225]	[0-165]	[0-135]	90, 30, 0
				175, 125, 105
				195, 105, 75

RESULTATS

Après plusieurs expériences, en prenant des photos de mêmes ou de différents troupeaux sur les même emplacements ou emplacements différents, les résultats montrent que les mêmes troupeaux sont fortement liés plus de 70%. Ce résultat est obtenu après plusieurs scénarios dont 03 sont présentés successivement dans ce papier.

Scénario 1

Dans un premier temps, nous avons appliqué notre démarche sur deux photos différentes qui contiennent le même troupeau mais de fonds d'image différents. Il s'agit des troupeaux sur une rizière (Figures 4 et 5)



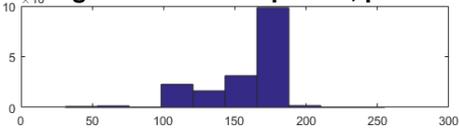
Figure 4 : Troupeau 1



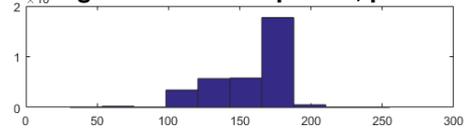
Figure 5: Troupeau 2

La figure 6 représente les histogrammes de chaque plan du pixel pour les images des figures 4 et 5

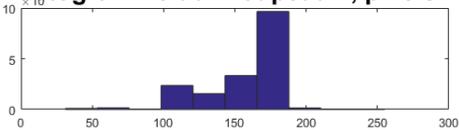
Histogramme du Troupeau 1, pixels R



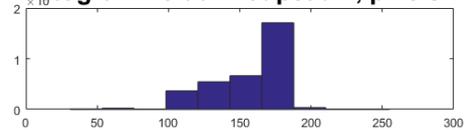
Histogramme du Troupeau 2, pixels R



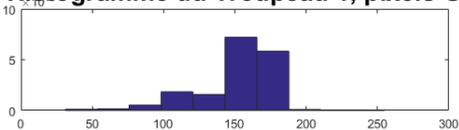
Histogramme du Troupeau 1, pixels B



Histogramme du Troupeau 2, pixels B



Histogramme du Troupeau 1, pixels G



Histogramme du Troupeau 2, pixels G

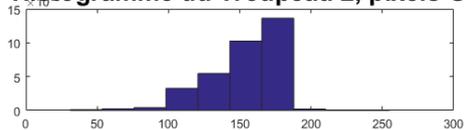


Figure 6 : Histogramme des images des figures 4 et 5

Nous avons obtenu $r = 0,9722$; les histogrammes présentent presque la même distribution.

Scénario 2

Durant cette deuxième expérience, nous avons comparé deux photos différentes qui contiennent le même troupeau, de fonds d'image différents et de nombre de zébus différents (Figures 7 et 8).



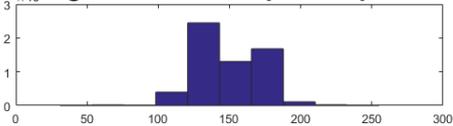
Figure 7 : Troupeau 3



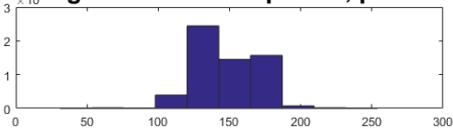
Figure 8 : Troupeau 4

La figure 9 représente les histogrammes de l'image du Troupeau 3 et l'image du Troupeau 4.

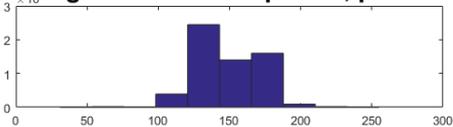
Histogramme du Troupeau 1, pixels R



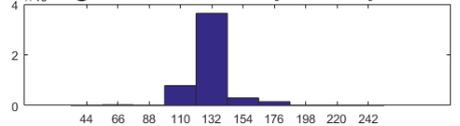
Histogramme du Troupeau 1, pixels B



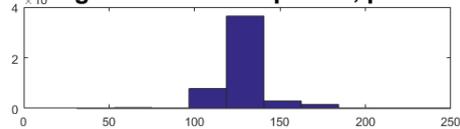
Histogramme du Troupeau 1, pixels G



Histogramme du Troupeau 2, pixels R



Histogramme du Troupeau 2, pixels B



Histogramme du Troupeau 2, pixels G

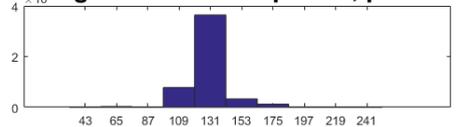


Figure 9 : Histogramme de l'image des figures 7 et 8

Après simulation, nous avons obtenu $r = 0,7647$.

Scénario 3

Lors de la 3^{ème} expérience, nous avons comparé deux photos différentes qui contiennent des troupes différents et de fonds d'image différents (Figures 10 et 11).



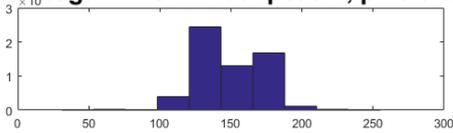
Figure 10 : Troupeau 5



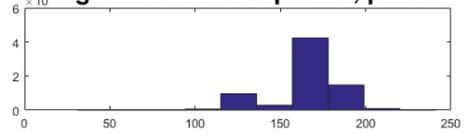
Figure 11 : Troupeau 6

La figure 12 montre les histogrammes des figures 10 et 11 :

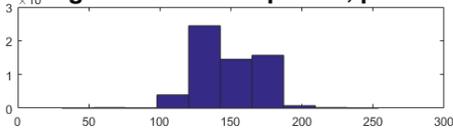
Histogramme du Troupeau 1, pixels R



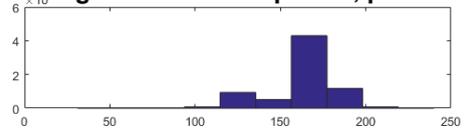
Histogramme du Troupeau 2, pixels R



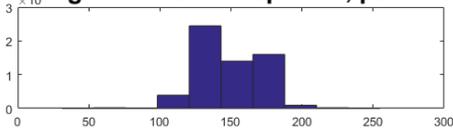
Histogramme du Troupeau 1, pixels B



Histogramme du Troupeau 2, pixels B



Histogramme du Troupeau 1, pixels G



Histogramme du Troupeau 2, pixels G

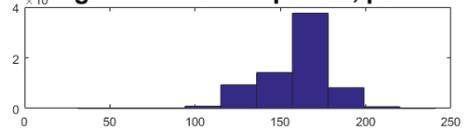


Figure 12 : Troupeau 1

Après simulation, nous avons obtenu $r = 0.5724$. Les 02 histogrammes ne présentent pas la même distribution.

DISCUSSION

Les valeurs de coefficient de corrélation obtenues sont des valeurs critiques au sens limite dans la borne inférieure pour les images similaires (scénario 1 et 2) et dans la borne supérieure pour les images dissimilaires (scénario 3) puisque certaines couleurs de fonds des images comparées ressemblent à des couleurs des zébus. Dans la réalité, puisque le troupeau suit soit des forêts ou points d'eau [3] dont les couleurs sont verts et bleus qui n'ont rien n'avoir avec les couleurs de zébus, les résultats de corrélation seront meilleurs.

CONCLUSION

Ce travail détecte ou localise les zébus volés par les Dahalo lors du transport par un Drone de type de Quadcopter. Lors de son déplacement, le Drone prend des photos et envoie les images prises à la station de base. Cette dernière stocke les images reçues dans une base de données et analyse leurs similarités. Si deux images prises dans deux endroits différents représentent des caractéristiques similaires, on peut en déduire que ce sont les mêmes objets. Cette mesure de similarité a été effectuée en calculant la corrélation des histogrammes des couleurs de zébus contenues dans les images. Les résultats des expériences ont montré que la corrélation des histogrammes de l'image sans fond est très efficace pour mesurer la similarité des objets en déplacement (plus de 70%). Les couleurs qui correspondent aux zébus sont obtenues selon l'observation et les enquêtes effectuées. Pour trouver les couleurs correspondants aux zébus dans l'image, on fait une comparaison des pixels RGB de l'image à analyser et la liste des couleurs correspondant aux couleurs de zébus.

Les résultats de cette recherche nous a permis aussi d'effectuer la recherche des lieux, des personnes disparues ou en détresse, des animaux en déplacements, etc.

Bien que la liste des couleurs de zébus soit limitée, il est difficile de trouver leur combinaison RGB pour sortir une liste correcte. Pour remédier à cela, on peut créer une plage de valeurs de R, G et B associée à chaque couleur de zébus existant mais travailler en espace (RGB) risque de perdre la précision puisqu'on manipule 03 variables (RGB). Une autre solution est de travailler dans d'autres espaces comme luminance-chrominance, dans ce cas on ne manipule que deux variables. A part les précisions des couleurs de zébus, la communication entre le Drone et la station de base doit être sécurisée.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Overblog. (2018, septembre). *Expert-comptable-international.info*. Consulté le janvier 27, 2019, sur <http://www.expert-comptable-international.info/fr/pays/madagascar/economie-3>
- 2) Solofo R. (2018). *Agriculture : Madagascar, un géant aux pieds d'argile*. Consulté le janvier 27, 27, sur <https://www.lactualite.mg/economie/2589-agriculture-madagascar-un-geant-aux-pieds-dargile>
- 3) Briand, E. J. (2016). *Rapport intermédiaire d'évaluation de thèse: Comportement dynamique des voleurs de zébus dans la partie sud de Madagascar*. Toliara.
- 4) Tsimitamby, E. J. (2019). Estimation des trajectoires des Dahalo par une analyse cellulaire. *Conférence des 3 ISs 2019* .
- 5) Tsimitamby, E. J. (2019). Optimisation de trajectoire de traque de Dahalo.
- 6) Chanel, P. C. (2014). Détection et reconnaissance de cibles en ligne pour des UAV autonomes avec un modèle de type POMDP. 7ème Journées Francophones Planification, Décision et Apprentissage pour la conduite de systèmes (JFPDA 2012), May 2012, NANCY, France. *HAL Archives ouvertes* .
- 7) S. Mohammed, E. F. (2004). Reconnaissance d'objet en imagerie aérienne. *RIST 14(2)*.
- 8) Panhaleux, D. D. (2015). *Les drones civils, enjeux et perspectives*.
- 9) J. Wellens, A. M. (s.d.). Utilisation des prises de vue aérienne à basse altitude pour le suivi des activités agricoles.
- 10) H. Abed, L. Z. (s.d.). Système d'Indexation et de Recherche d'Images par le contenu. *Laboratoire : Systèmes, Signaux, Données; Département Informatique, Faculté des Sciences; Université des Sciences et de la Technologie d'Oran - Mohamed Boudiaf* .
- 11) Tollari, S. (2006). *Indexation et recherche d'images par fusion d'informations textuelles et visuelles, Thèse*. LSIS - UMR CNRS 6168.
- 12) Tani, A. B. (2011). Techniques d'indexation d'images Médicales par contenu. *hal-00641287*.
- 13) Vissac, M. et Dugelay J.-1. (s.d.). Un panorama sur l'indexation d'images fixes. *Institut Eurécom, Dept. of Multimédia Communication*.
- 14) Fournier, J. (2002). *Indexation d'images par le contenu et recherche interactive dans les bases généralistes*. Université de Cergy-Pontoise, Thèse.
- 15) Bessai, A. H. (s.d.). Indexation et recherche d'images par le contenu. *Centre de Recherche sur l'Information Scientifique et Technique, Division Base de Données et Systèmes Multimédias* .

- 16) Lisein, J. ; Bonnet S. (2014). Modélisation de la canopée forestière par photogrammétrie depuis des images acquises par drone.

COMMANDE NON LINEAIRE D'UN RESEAU D'ENERGIE ELECTRIQUEINTEGRANTLES DISPOSITIFS FACTS

par

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

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

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

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

RESUME

Les dispositifs FACTS (Flexible AC Transmission System ou Système de transmission flexible en courant alternatif) font partie des systèmes servant à améliorer les performances des réseaux de transport. En effet, dans les conditions anormales en présence de perturbations, il est difficile pour les exploitants des réseaux électriques de répondre efficacement au besoin des utilisateurs de l'énergie électrique.

De nombreuses études ont été faites récemment sur ces systèmes concernant l'augmentation de la vitesse de contrôle des paramètres des lignes (tension, impédance et déphasage) comme les études présentées par Yvon Besanger concernant les Simulations dynamiques sur EUROSTAG du modèle des dispositifs série et shunt sur l'étude des FACTS et de leur comportement dans les réseaux de transport et d'interconnexion, thèse préparée au sein du Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble en 1996. p66, appuyé par celles Jean Christophe Passelergued sur « l'interaction des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques » effectué au sein du même laboratoire en 1998, p87 et la thèse de Liva Falisoa Rafanotsimiva sur « l'étude de commandes non linéaires pour réseaux électriques : application au système SMIB », effectuée au sein de l'Université d'Antsiranana, Madagascar, en 2013.

Le présent papier consiste à faire l'état de l'art des commandes non linéaires des réseaux électriques d'une part, l'inventaire des dispositifs FACTS appliqués aux réseaux électriques d'autre part, et l'intégration de ce type de dispositifs dans les réseaux électriques en vue de concevoir des nouvelles lois de commandes non linéaires pour l'ensemble.

Mots clés : Réseaux électriques, SMIB, Dispositifs FACTS, Commande non linéaire, Stabilisation, Perturbation.

ABSTRACT

FACTS devices are part of the systems used to improve the performance of transport networks. Indeed, under abnormal conditions in the presence of disturbances, it is difficult for electricity system operators to respond effectively to the needs of electricity users.

Numerous studies have been carried out recently on these systems concerning the increase of the control speed of the parameters of the lines (voltage, impedance and phase shift) such as the studies presented by Yvon Besanger concerning the Dynamic Simulations on EUROSTAG of the model of serial devices and shunt on the study of FACTS (Flexible AC Transmission System) and their behaviour in transport and interconnection networks, thesis prepared at the Laboratoire d'Electrotechnique de Grenoble in 1996, P66, supported by those Jean Christophe Passelergued on «the interaction of FACTS devices in large electrical networks» carried out in the same laboratory in 1998, P87 and the thesis of Liva Falisoa Rafanotsimiva on “the study of non-linear controls for electrical networks: application to the SMIB system”, carried out at the University of Antsirananana, Madagascar, in 2013.

This paper consists of a review of the state of the art of non-linear control of electrical networks, on the one hand, the inventory of FACTS devices applied to electrical networks, on the other, and the integration of this type of device into the electrical networks in order to design new non-linear control laws for the whole.

Key words : Power grid, grid instability, fuzzy T-S models, PDC control, Lyapunov function

INTRODUCTION

Un réseau électrique englobe les lignes, les postes électriques ainsi que les transformateurs. Il s'agit d'un ensemble d'équipements qui transporte l'énergie du lieu de production aux consommateurs. En réalisant cette interface, le réseau assure non seulement un lien physique permettant la circulation des flux d'énergie mais aussi une mise à disposition de services pour la collectivité qu'il irrigue. Il doit également être analysé dans sa fonction système qui consiste à assurer la mise en regard intelligente d'une production ayant des caractéristiques techniques précises (performances électriques, mécaniques, caractère commandable ou « fatal », ...).

Dans le cas de système dynamique, les charges peuvent varier énormément en fonction de l'environnement auquel est soumis le système, ou en fonction de son utilisation à un instant donné.

Le modèle sert à représenter le comportement du réseau électrique et des producteurs qui y sont raccordés. La méthode de commande non linéaire d'un réseau électrique sera établie dans le but d'améliorer sa stabilité transitoire et celle des machines synchrones qui y sont raccordées.

Dans cet article, nous allons parler des dispositifs FACTS qui seront connectés au jeu de barre où sont connectées les machines synchrones dans le but de contrôler l'écoulement de puissance réactive échangée dans le réseau de transport d'énergie électrique. Or l'association de ces dispositifs à un système de puissance électrique engendre un modèle complexe présentant de fortes non linéarités. (Bésanger Y, 2000, Bouarar T, 2009)

Le modèle des FACTS et ses lois de commande sont implantés dans un logiciel destiné à l'étude dynamique des réseaux. Enfin, la situation critique de dynamique lente et de dynamique transitoire sert à déterminer la réaction des dispositifs FACTS vis-à-vis de ces événements. Le présent article consiste à faire l'état de l'art des commandes non linéaires des réseaux électriques d'une part, l'inventaire des dispositifs FACTS appliqués aux réseaux électriques d'autre part, et l'intégration de ce type de dispositifs dans les réseaux électriques en vue de concevoir des nouvelles lois de commandes non linéaires pour l'ensemble.

MATERIELS ET METHODES

Dans un concept très général, un réseau électrique est constitué de multiples matériels électrotechniques (lignes, câbles, transformateurs, appareils de coupure, contrôle-commande) associés de manière coordonnée.

Dans l'exploitation des réseaux électriques, la tension U et la fréquence f (et donc la vitesse relative de rotation électrique ω) doivent rester dans des marges admissibles respectivement de 5% en Basse Tension (BT), 10% en Moyenne Tension (MT) et 1% en Haute Tension (HT). Les dispositifs FACTS contrôlent l'écoulement de puissance réactive échangée dans le réseau de transport d'énergie électrique.

STABILITE DES RESEAUX ELECTRIQUES

La stabilité des réseaux électriques est une qualité de cette régulation par laquelle les situations modérément perturbées reviennent progressivement à un état d'équilibre.

En ce qui concerne la stabilité en fréquence (puissances actives), la fréquence d'un réseau interconnecté de transport est essentiellement la même en tout point du réseau. La raison première du contrôle de la fréquence est de permettre la circulation à travers le réseau d'un courant électrique alternatif fourni par plusieurs générateurs. Le réglage primaire permet de revenir à un équilibre production-consommation qui s'agit donc d'un réglage PID faisant appel uniquement à la composante proportionnelle P:

$$\Delta P = -\lambda(f - f_0) \quad (1)$$

Le but du réglage secondaire est double : résorber l'écart résiduel de fréquence induite par le réglage primaire et corriger les écarts de bilan des zones de réglage.

L'erreur de contrôle de zone est définie par :

$$G = \Delta P_{exp} + K(f - f_0) \quad (2)$$

Où :

ΔP_{exp} est l'écart de bilan (export mesuré - solde export des programmes) et, K est une constante en MW/Hz.

Le réglage tertiaire intervient lorsque l'énergie réglante secondaire disponible est insuffisante et il est mise en œuvre manuellement.

Pour la stabilité en tension (puissances réactives), une tension trop haute provoque la destruction du matériel et une tension trop basse induit un courant plus élevé, donc des pertes par effet Joule plus importantes auxquelles s'ajoutent des risques de surintensité et de destruction du matériel. Les FACTS qui, par leur diversité, présentent de nombreuses possibilités d'agir sur le facteur de puissance, sur la charge des lignes et sur la stabilité en général.

Le réglage primaire agit d'une régulation locale, le réglage secondaire de tension est un réglage national, le réglage tertiaire s'effectue manuellement et les opérations sont ordonnées par le dispatching. (Takagi, Sugeno, 2015)

MODELISATION

Afin d'étudier la stabilité en tension d'un réseau accueillant des producteurs équipés de régulateurs de puissance, un modèle mathématique de ce système doit être déterminé. La pertinence des résultats de l'étude dépend directement de la qualité du modèle proposé. Le modèle doit représenter le comportement du réseau électrique et des producteurs qui y sont raccordés. Il sera donc composé de briques élémentaires de deux types : les briques représentant un producteur décentralisé équipé d'un régulateur de puissance et la brique représentant le système électrique

auquel sont raccordés les producteurs étudiés. Les modèles sont classifiés en 4 catégories en fonction des constantes de temps des phénomènes qu'ils permettent d'étudier :

- Les modèles transitoires électromagnétiques : Ils sont adaptés à la représentation de phénomènes transitoires dont les constantes de temps sont inférieures à la dizaine de millisecondes.

- Les modèles transitoires électromécaniques : Ils sont adaptés à l'étude de phénomènes transitoires plus lents que la période de l'onde de tension.

- Les modèles dynamiques lents : Ces modèles représentent des phénomènes dont la constante de temps est de l'ordre de plusieurs secondes à plusieurs dizaines de minutes.

- Les modèles quasi stationnaires : Les modèles quasi stationnaires sont utilisés pour représenter des phénomènes dont la dynamique est au moins de l'ordre d'une seconde. Par rapport aux modèles dynamiques lents, on considère cette fois la fréquence du réseau comme constante.

L'objectif de ce modèle est d'étudier l'impact des régulateurs de puissance des producteurs sur la stabilité en tension du réseau. Ces régulateurs sont censés fonctionner en régime dit « normal ». Le modèle quasi statique des convertisseurs de puissance revient à un gain unitaire.

Une approche passive consiste à dimensionner le système de telle sorte qu'il soit stable dans les conditions d'utilisations prévues pour son fonctionnement (par exemple, le profil et la puissance de charge maximum). Cette approche se fonde sur une modélisation mathématique du système qui permet de confronter le modèle à des critères de stabilité et d'optimisation des éléments du réseau.

L'objectif du contrôle est de maintenir cette tension constante et de contrôler ce courant pour pouvoir fournir les courants transitoires appelés par la charge. (Bésanger Y, 2000),(Takagi, Sugeno,2015)

L'avantage de ces approches est d'assurer la stabilité globale du système et de conduire à une démonstration théorique de la stabilité.

LOIS DE COMMANDE

Dans la théorie de la commande, l'approche backstepping est une technique développée initialement par Tsiniias en 1989, utilisé comme outil de conception, nouvelles perspectives à la commande des systèmes non linéaires. (Hamache D, 2016)

L'approche backstepping se fonde sur la deuxième méthode de Lyapunov, dont elle combine le choix de la fonction de Lyapunov avec celui de la loi de commande. Ceci permet, en plus de la tâche pour laquelle le régulateur est conçu (poursuite et/ou régulation), de garantir, en tout temps, la stabilité globale du système compensé. (Besancon G, et *al.*, 2012)

Depuis plusieurs années, de nombreux travaux se sont intéressés à la stabilité et la stabilisation des systèmes non linéaires décrits par des modèles flous de Takagi-Sugeno. L'analyse de stabilité des modèles flous est souvent réalisée par la technique de Lyapunov qui impose des exigences restrictives et donne des conditions de stabilité suffisantes. L'une des premières idées de stabilisation de ces modèles flous a consisté à utiliser des retours d'état linéaires. Ils ont vite été supplantés par une loi de commande qui permet de prendre en compte les non linéarités des modèles flous et connues sous le nom de PDC (Parallel Distributed Compensation).

Stabilité des modèles flous de Takagi-Sugeno

L'étude de la stabilité des modèles flous de Takagi-Sugeno s'effectue principalement en utilisant la méthode directe de Lyapunov (Ding, Yang, 1985), qui s'appuie sur le choix d'une fonction candidate de Lyapunov :

$$\|x\| \rightarrow \infty \Rightarrow V(x) \rightarrow \infty$$

$$\alpha(\|x\|) \leq V(x) \leq \beta(\|x\|) \quad (3)$$

Où $\alpha, \beta \in C^1$ sont des fonctions définies positives.

Soit le modèle flou de Takagi-Sugeno continu en régime libre, suivant :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) A_i x(t) \quad (4)$$

La stabilité quadratique s'étudie en calculant la dérivée de la fonction $V(x)$.

$$\frac{d}{dt} V(x(t)) = \dot{x}(t)^T P x(t) + x(t)^T P \dot{x}(t) \quad (5)$$

Loi de commande PDC

La loi de commande PDC est donnée par :

$$u(t) = \sum_{i=1}^r h_i(z(t)) F_i x(t) \quad (6)$$

Où F_i est le gain de retour local relatif au $i^{\text{ème}}$ modèle.

Le principe de cette méthode est d'élaborer une commande par retour d'état pour chaque modèle local, puis d'effectuer une interconnexion floue d'une manière similaire à la technique utilisée pour les modèles locaux. L'avantage majeur de cette loi de commande, est de respecter la même structure de découpage

des non linéarités que celle utilisée pour l'obtention du modèle flou TS.[2], (Takagi, Sugeno,2015)

Pour obtenir le modèle flou en boucle fermée, la commande PDC au modèle flou T-S a été appliquée. Ainsi, le modèle flou obtenu est le suivant :

$$\dot{x}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))G_{ij}x(t) \quad (7)$$

Avec : $G_{ij}=A_i-B_iK_j$ (8)

Suivi de trajectoire des modèles flous TS

On a supposé que tous les états sont mesurables. Le problème de suivi de trajectoire peut être considéré comme une généralisation du problème de stabilisation. On a considéré un système décrit par ces équations. (Takagi, Sugeno, 2015)

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u(t) \\ y(t) = h(x(t)) \\ \bar{y} = \varphi(x(t)) \end{cases} \quad (9)$$

Où $x \in R^n$ est le vecteur d'état, $y, \bar{y} \in R^m$ sont respectivement les vecteurs de sorties mesurées et contrôlées, $u \in R^m$ est le vecteur d'entrée, $f(x), g(x), h(x)$ et $\varphi(x)$ sont des fonctions non linéaires avec des dimensions appropriées.

Synthèse de loi de commande

L'objectif d'un contrôleur flou qui garantit le suivi de trajectoire est de satisfaire la condition suivante :

$$\bar{y}(t) - r(t) \rightarrow 0, t \rightarrow \infty \quad (10)$$

Où $r(t)$ représente la trajectoire désirée ou le signal de référence.

L'objectif est d'obtenir la boucle fermée suivante :

$$\dot{\tilde{x}}(t) = \sum_{i=1}^r \sum_{j=1}^r h_i(z(t))h_j(z(t))G_{ij}\tilde{x}(t) \quad (11)$$

Avec : $G_{ij} = A_i - B_iF_j$

Dans cet article, en remarquant qu'un modèle simplifié de réseau électrique (correspondant au cas classique du SMIB, une machine unique connectée à un bus infini) peut facilement être ré-écrit sous forme multimodèle de type T-S, et au vu des enjeux devenus évidents autour de la gestion de l'énergie, on propose une étude de commande de ce type de système par l'approche PDC. (Kendek, Lauber, 2015)

RESULTATS

Application au système SMIB

Un système SMIB est constitué d'une machine synchrone qui alimente un réseau infini au travers de lignes et de transformateur (Rafanotsimiva L.F, 2013) et il peut être modélisé par les équations suivantes :

$$\dot{\delta}(t) = \omega(t) \quad (12)$$

$$\dot{\omega}(t) = -\frac{D}{H}\omega(t) + \frac{\omega_0}{2H}(P_m(t) - P_e(t)) \quad (13)$$

Avec :

δ : Angle de puissance du générateur en [rad],

ω : vitesse de rotation électrique du générateur en [rad/s].

Modèle du système SMIB

Beaucoup de travaux ont été faits par rapport à la commande non linéaire des réseaux électriques. Les entrées connues du système sont les signaux de commande, les entrées inconnues sont les perturbations, le bruit de mesure, les erreurs ou incertitudes de modélisation, les défauts, etc (Rafanotsimiva L.F, 2013)

Dans cette partie, la puissance mécanique G_b et les variables d'état utilisables pour la commande (l'extension avec observateur dans le cas contraire étant facilement envisageable) sont constantes. Enfin, tous les autres paramètres du modèle représentent les caractéristiques électriques du réseau et sont supposés connus et constants en fonctionnement normal. (Rafanotsimiva L.F, 2013)

Mise en œuvre de la méthode et résultats

La mise en œuvre de la méthode et les calculs connexes pris comme exemple ont été réalisés en utilisant l'outil MATLAB et des différents types de défauts ont été appliqués. Les résultats obtenus par la commande PDC sont comparés avec ceux obtenus en utilisant un PID.

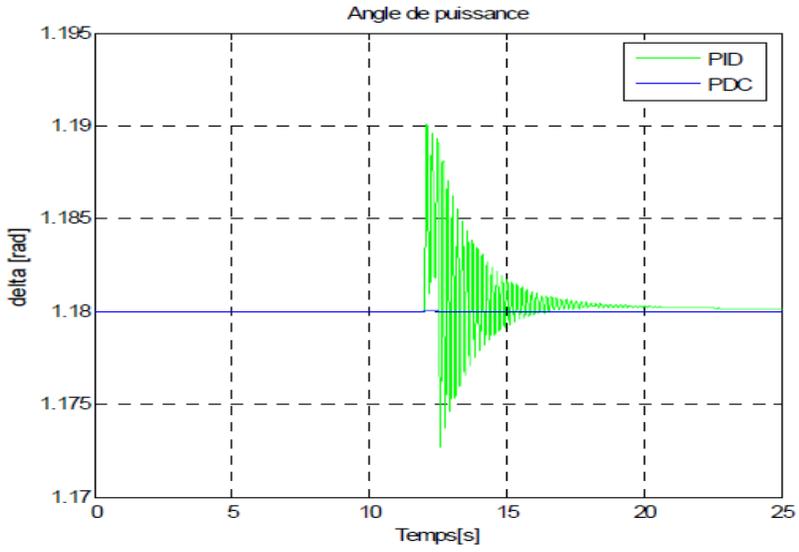


Figure 1 : Evolution de l'angle de puissance δ du générateur du système SMIB

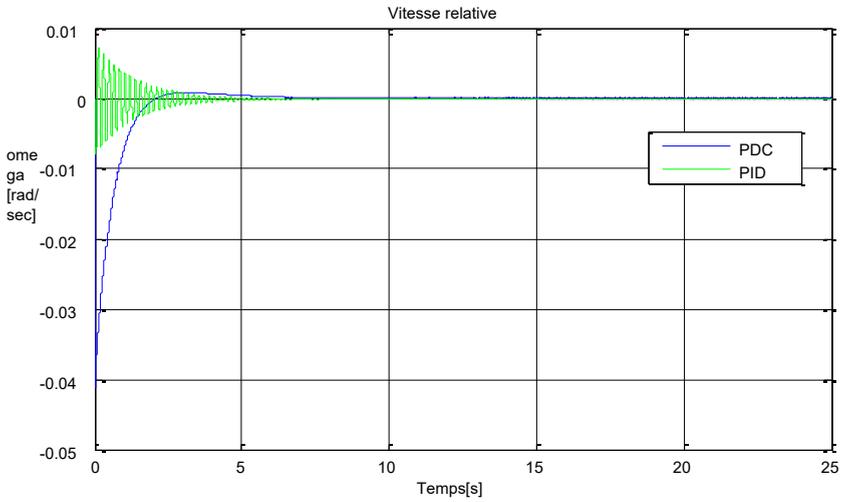


Figure 2 : Evolution de la vitesse relative de rotation électrique ω du générateur

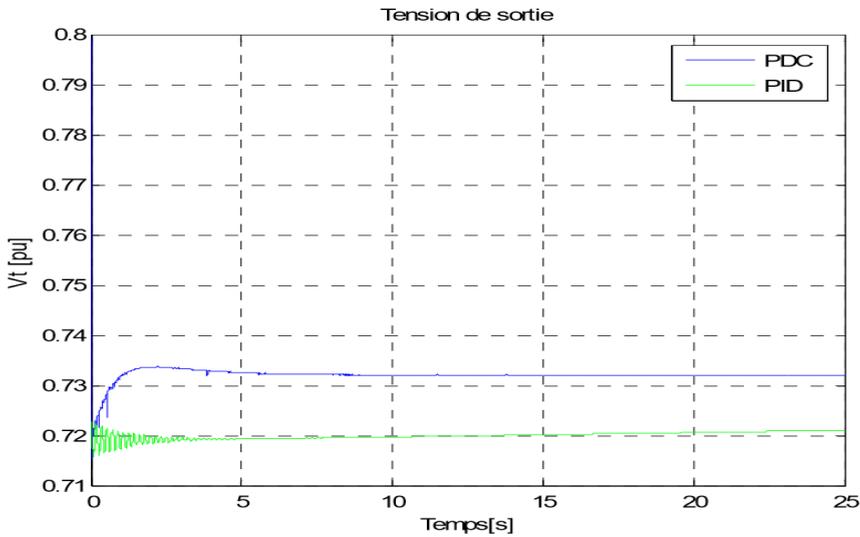


Figure 3 : Evolution de la tension de sortie V_t du générateur

DISCUSSION

D'après la figure 1, en présence d'une chute de tension de 15%, les deux systèmes de régulation PID et PDC maintiennent le point de fonctionnement du réseau, mais en comparant les pics de valeurs ainsi que les oscillations lors des différentes simulations, il apparaît que la commande PDC pilote mieux le système que le PID. Elle agit aussi plus rapidement.

Dans le deuxième cas, on a constaté que pour l'erreur sur T_b simulée, la commande PID n'arrive plus à ramener le système au point de fonctionnement voulu alors que le PDC y arrive sans trop de problème, moyennant quelques pics transitoires. Ceci est montré par les figures 2 et 3.

A part les générateurs synchrones et les lignes de transport qui ont pour but de générer et de transporter de l'énergie, des éléments additionnels sont utilisés, visant à améliorer le profil de tension et le contrôle du transit de l'énergie réactive. Ces éléments sont des compensateurs shunts ou série. Les compensateurs traditionnels sont les réactances et condensateurs statiques, ou les condensateurs synchrones. Le développement des dispositifs d'électronique de puissance amène à une nouvelle génération de compensateurs, qui offre une meilleure flexibilité de commande et de régulation. Donc on parle des dispositifs FACTS.

L'objectif principal, c'est d'appliquer ces dispositifs sur la commande non linéaire des réseaux d'énergie électriques en considérant un modèle à deux axes des génératrices et un réseau électrique multimachines.

Concept FACTS

Par définition, le FACTS (Flexible Alternative Current for Transmission System) est un système de transmission de courant alternatif sous un dispositif basé sur l'électronique de puissance pour augmenter les limites de stabilité dynamique d'un réseau électrique et d'assurer la meilleure maîtrise de son flux d'énergie.

Familles de dispositifs FACTS

Tableau 1 : Différents types de FACTS

Famille	Mode de raccordement	Type d'équipement
Dispositifs shunts	Connectés en parallèle au niveau des postes de transformateurs	STATCOM, TCR, TSC
Dispositifs séries	Insérés en série dans les lignes de transport	TSSC, TCSR, TSSR, SSSC
Dispositifs combinés	Ils recourent simultanément aux deux couplages	SVC, IPFC, UPFC

A partir des différents niveaux de charge du réseau complet, des calculs de répartition de charge et d'indicateurs qu'on peut montrer sur les nœuds les plus critiques. Et en général, les nœuds critiques sont ceux qui sont les plus éloignés des nœuds de production.

Il faut tout simplement connaître la zone d'évolution des charges et déterminer l'emplacement optimal des dispositifs FACTS.

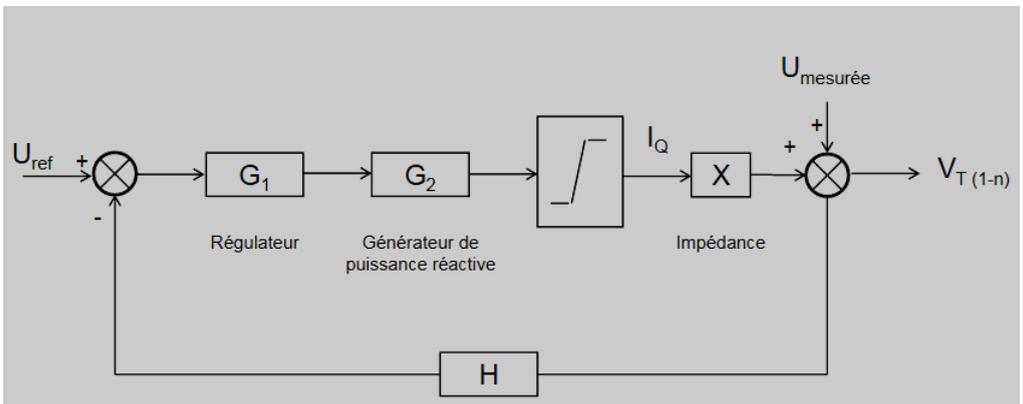


Figure 4 : Schéma-bloc d'une régulation en tension simple pour un STATCOM

D'après l'analyse de performance de ces dispositifs effectués dans (Besanger Y, 2006), nous avons pu constater que le point fort de systèmes FACTS shunt étant le support de la tension. Ils doivent être placés sur le nœud de la zone fragile ayant la plus basse tension.

La méthode linéaire quadratique décentralisée (LQR) découle de la théorie de la commande optimale. Le but de la commande consiste, à la suite d'une perturbation, à ramener, de préférence aussi rapidement que possible, l'état x et la commande u à sa valeur d'équilibre 0.

Le dimensionnement des FACTS shunt serait approximativement le double de la puissance réactive consommée au nœud considéré. Ce qui explique aussi que le doublement de cette puissance permet de disposer d'une réserve de compensation afin que les FACTS shunt connectés ne passent pas trop vite en surcharge.

Le système de commande est une partie essentielle des FACTS. Les SVC peuvent selon le cas être contrôlés en tension, en puissance réactive (apportée à la ligne), en amortissement des oscillations de puissance, ou en puissance active (transitant dans la ligne). Les STATCOM peuvent soit être contrôlés en puissance active et réactive, soit en tension et angle de transport.

En cas de défaut et de risque d'oscillations de la puissance, la boucle d'amortissement peut prendre le relais de la boucle de tension. Cette boucle d'amortissement est également appelée stabilisateurs des systèmes de puissance (PSS en anglais)

Tableau 2 : Evolution des fabricants des FACTS

Type des FACTS	Fabricants
SVC Classic et light à 2 niveaux, SC et des TCSC	Entreprise ABB Helvético-suédoise, basé à Zurich en Suisse 1979
TPFC et SVC standard $40 < MVar < 800$ SVC et des STATCOM	Société Allemande Siemens 1997 Société Japonaise Toshiba Corporation et Jema Energy

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons parlé des grandeurs caractéristiques des réseaux électriques ainsi que sa stabilité. Nous nous intéressons aussi aux perturbations du type contraintes de tension haute – dites sursensions – et contraintes de tension basse. La structure du modèle est nécessaire pour représenter le comportement du réseau électrique, pour enfin étudier leur comportement face aux différentes perturbations.

C'est à partir des modèles illustrés dans les chapitres précédents que nous avons pu distinguer la synthèse de lois de commande, dont nous avons parlé le modèle flou de Takagi-Sugeno pour la stabilité et la stabilisation des systèmes non linéaires à partir de la technique de Lyapunov. Une loi de commande qui permet de prendre en compte les non linéarités des modèles flous est connue sous le nom de PDC.

Le multi modèle T-S obtenu par transformation par secteurs non linéaires a été utilisé pour la régulation d'un système SMIB et illustré lors d'une chute de tension provoquée par un enclenchement brusque d'une forte charge, ou à des perturbations directes de l'angle de puissance. Nous nous sommes limités aux équations d'états et nous avons pu réduire le nombre de sous-modèles à deux. Nous avons constaté que la loi de commande PDC permet toujours de ramener le système aux points de fonctionnement en régime nominal dans les simulations considérées. (Besanger Y, 2006)

Dans le contexte de l'insertion des systèmes FACTS dans les réseaux de transport et d'interconnexion, on a constaté que les simulations statiques ont montré l'apport incontestable des FACTS à l'amélioration de la stabilité de la tension. Les FACTS shunt stabilisent le réseau de façon globale alors que les FACTS séries ont un meilleur comportement local.

Notre étude concernera la continuité de ces travaux, c'est-à-dire le développement de la commande non linéaire d'un réseau d'énergie électrique en intégrant des dispositifs FACTS, pour réguler non seulement la tension et la fréquence mais aussi les oscillations de la puissance. Dans le cadre de ce travail de recherche, on se concentrera à la contribution à l'extension des commandes non linéaires en considérant un modèle à deux axes des génératrices, un réseau électrique multimachines et l'intégration des différents éléments de FACTS. On procèdera à plusieurs simulations en utilisant l'outil Matlab.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Abdelaàli Alibi. (2009). Contrôle des Réseaux Electriques par les Systèmes FACTS: (Flexible AC Transmission Systems), Batna, Université de Batna.
- 2) Bers. (1959). The degrees of freedom in RLC networks, USA
- 3) Besancon G, et *al.*, (2012). Simple strategy for constrained backstepping design with application to SMIB control, American Control Conference
- 4) Besanger Y. (2006). Vers l'amélioration de la sécurité des réseaux électriques de puissance, Energie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG
- 5) Bésanger Y, Hadjsaid N, Georges D. (2000). Robust Solutions for the Interaction Phenomena between Dynamic Loads and FACTS Controllers, IEEE-PES Summer Meeting, Seattle, Washington.
- 6) Blackwell, Grigsby. (1966). A simple formulation procédure for state-space models of electric networks, J. Franklin Institute, USA
- 7) Bouarar T. (2009). Contribution à la synthèse de lois de commande pour les descripteurs de type Cong, Wang and Hill. (2005). Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC, Elsevier, Electrical power and energy systems 27 Takagi-Sugeno incertains et perturbés
- 8) Ding, Yang. (1985). Further studies on LMI-based relaxed stabilization conditions for nonlinear systems in Takagi-Sugeno's form, *Man and Cybernetic*, 15, 116–132.
- 9) Ghaoui El. (1997). Approche LMI pour la commande : Une introduction, Identification et Commande Robuste : Approche LMI, pages p. 1-25
- 10) Hamache D. (2016). Modélisation et commande d'un réseau électrique continu, Automatique / Robotique, Centrale Supélec
- 11) Hamdaoui, Semmah, Fellah. (2004). Fuzzy Learning Control of Advanced Super-Conducting Magnetic Energy Storage to Improve Transient Power System Stability, *Iranian Journal of Electrical and Computer Engineering*
- 12) Kendek, Lauber. (201). Controller Design for TS Models Using Delayed Non quadratic Lyapunov Functions
- 13) Koenig, Tokad. (2003). A general theorem for the existence and solution of state models for linear stationary systems of multi-terminal components
- 14) Marjorie C. (2016). Stabilité du réseau électrique de distribution : Analyse du point de vue automatique d'un système complexe, Université Paris-Saclay,
- 15) Manjarekar, Banavar and Ortega. (2008). Application of passivity-based control to stabilization of the SMIB system with controllable series devices, Proceedings of the 17th World Congress, IFAC, Seoul, Korea

- 16) Nguyen H.(mars 2011). Amélioration de l'amortissement des oscillations de puissance du réseau électrique avec les dispositifs FACTS et les mesures à distance
- 17) Passelergue J. C. (1998). Interactions des dispositifs FACTS dans les grands réseaux électriques, Energie électrique, Institut National Polytechnique de Grenoble - INPG
- 18) Rafanotsimiva L. F. (2013). Etude de commandes non linéaires pour réseaux électriques – Application à un système SMIB, Sciences de l'ingénieur [physics], Université d'Antsiranana.
- 19) Roosta A. R, Georges D et Hadj-Said N. (2001). Non-linear control of power systems based on a backstepping method, In 40th IEEE Conference on Decision & Control, Orlando, USA
- 20) Takagi, Sugeno. (2015). Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control
- 21) Wang, Hill. (1996). Robust nonlinear coordinated control of power systems, Pergamon, *Automatica*, 32(4).
- 22) Wang, Hill. (2005). Transient stability and voltage regulation enhancement via coordinated control of generator excitation and SVC, Elsevier, *Electrical power and energy systems* 27 Takagi-Sugeno incertains et perturbés
- 23) Zadeh, Desoer. (1963). Linear system theory: the state space approach, McGraw-Hill, New York.