

**RECHERCHES  
POUR  
LE DEVELOPPEMENT**

**Série Sciences Technologiques**

**N°5 - 2020**

**Antananarivo - Madagascar**

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

**ISSN 1025 - 3459**



**RECHERCHES  
POUR  
LE DEVELOPPEMENT**

**Série**

**Sciences Technologiques**

**N° 5**

**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 : cidst@cidst.mg**  
**Antananarivo - Madagascar**  
**ISSN 1022-8691**

**RECHERCHES  
POUR  
LE DEVELOPPEMENT**

**Série Sciences Technologiques**

**N°5**

**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

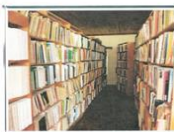
**Base de données en ligne : MADADOC**  
(sur l'Environnement et le Développement Rural)  
12642 Références

**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



MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR  
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



Centre d'Information et de Documentation  
Scientifique et Technique



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

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

## SOMMAIRE

### **SMART GRID, Implémentation de la DemandSide Management et la théorie des Jeux**

par ANDRIAMANIRY Nicolas, RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa

7

### **Etude de la stabilité du vaccin contre la maladie de Newcastle par le test de la dégradation accélérée**

par MAMINIAINA Olivier, RAZAFINDRAFARA Mirantsoa, HADJI Amina, RAKOTONDRAVONY F., RAJAONARISON Jean, KOKO M., ANDRIANTSIMAHAVANDY Abel

21

### **Making raw earth bricks imitating the characteristics of the “*Tambohon'ny Ntaolo*”**

par ANDRIANIRINA Tsiory, KOERA Rasoloniaina, ANDRIANARY Phillipe, RAKOTOSAONA Rijalalaina

35

### **L’Innovation pour une efficacité d’une vitrine géotoristique à Madagascar**

par RABEARY Frédéric Anacllet

51

### **Comparaison de deux commandes MPPT dans un nano-réseau électrique**

par RANAIVOSON S. S., Le SAUX N., SAINCY N., SAMBATRA E.J. R., ANDRIANAJAINA T., RAZAFINJAKA N. J.

81

### **Etude de l'érosion du sol à court terme par la technique du <sup>7</sup>BE**

par RANDRIANANTENAINA Fanjanirina R., RASOLONIRINA Martin, SOLONJARA Asivelo F., RABESIRANANA Naivo

95

## 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



# SMART GRID, IMPLEMENTATION DE LA DemandSide MANAGEMENT ET LA THEORIE DES JEUX

par

ANDRIAMANIRY Nicolas<sup>(1)</sup>, RAFANOTSIMIVA Liva Falisoa<sup>(1)</sup>

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

(2) Institut Supérieur de Technologie d'Antsiranana

## RESUME

L'épuisement des énergies fossiles, le réchauffement climatique, les émissions de gaz à effet de serre, la demande sans cesse croissante d'énergie et la hausse des coûts de l'électricité urgent les différents acteurs du monde entier à la quête d'une énergie qui est à la fois propre, saine, sûre, fiable, efficace et durable. Le Smart Grid semble très prometteur face à ce défi. Le Smart Grid ou réseau électrique intelligent s'appuie sur diverses technologies, notamment l'informatique et le réseau, pour pouvoir intégrer des sources hétérogènes d'énergie renouvelable dans le réseau électrique actuel. Ainsi, le Smart Grid est un système complexe. L'objectif principal du Smart Grid est d'optimiser la production, le transport, la distribution et l'utilisation côté consommateur de l'électricité. La DSM (Demand Side Management) ou plus précisément la DRM (Demand Response Management) est la principale stratégie d'optimisation utilisée dans le Smart Grid. L'objet de cet article est de passer en revue différents travaux et publications réalisés dans le domaine de la DRM. Après avoir analysé différents travaux à travers une étude descriptive des différentes méthodes d'optimisation existantes, il se dégage l'intérêt d'approfondir l'approche en utilisant la théorie des jeux. Divers résultats sous Matlab et sous d'autres outils de simulation ont montré une réduction importante du **PAR** (Peak to Average Ratio) ou **crête/valeur moyenne** et des coûts de l'énergie validant ainsi l'efficacité de l'utilisation de cette approche par rapport à d'autres pour l'optimisation d'un Smart Grid.

**Mots clés** : Smart grid, DSM, DR, Optimisation, Théorie des Jeux

## ABSTRACT

The depletion of fossil energy, global warming, greenhouse gases emission, the ever-increasing demand for energy and the rising costs of electricity are urging various players around the world to search for an energy which is clean, safe, secure, reliable, efficient and sustainable. Smart Grid seems to be very promising to face this challenge. Smart Grid relies on various technologies, including IT and the network,

to be able to integrate heterogeneous sources of renewable energy into the current power system. Thus, Smart Grid is a complex system. The main objective of Smart Grid is to optimize production, transmission, distribution and consumption of electricity. Demand Side Management (DSM) or more precisely Demand Response Management (DRM) is the main optimization strategy used in Smart Grid. The aim of this paper is to review the issues related to DRM. After analyzing several works through a descriptive study of existing optimization methods used in DRM, it emerges the interest to deepen the approach using game theory. Simulation results with Matlab and other simulation tools have shown a significant reduction of the Peak to Average Ratio (PAR) and energy costs, thus validating the effectiveness of using this approach compared to other approaches for optimizing a Smart Grid.

**Keywords :** Smart grid, DSM, DR, Optimization, Game theory

## **INTRODUCTION**

Pour faire face au défi économique et environnemental relatif aux énergies, le basculement vers le SMART GRID semble être imminent. Il s'agit cependant, d'un système complexe. Divers domaines devraient être considérés pour mener ce système à maturité, c'est à dire à l'optimiser, dont l'un des plus importants est celui qui couvre les interactions entre le système, les différents agents ainsi que les usagers, qui permettrait de décrire le marché. La DSM est la stratégie d'optimisation par excellence dans ce domaine.

## **MATERIELS ET METHODES**

### **Enjeux Environnementaux et Economiques**

Le réchauffement climatique est un signal d'alerte qui nous informe que nos rejets de gaz à effet de serre ont atteint leur paroxysme (Kweku D. et al, 2018), et que ces émissions sont devenues une menace sérieuse pour notre survie et peuvent entraîner l'extinction de nombreuses espèces (Hoegh-Guldberg O. et al., 2018). L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) soutient que le changement climatique représente la plus grande menace pour la santé dans le monde au XXI<sup>e</sup> siècle.

Les gaz à effet de serre regroupent le dioxyde de carbone (CO<sub>2</sub>), le méthane (CH<sub>4</sub>), le protoxyde d'azote, également appelé oxyde nitreux (N<sub>2</sub>O), l'hexafluorure de soufre (SF<sub>6</sub>), les hydrofluorocarbures (HFC) et les perfluorocarbures (PFC). Le CO<sub>2</sub>, le CH<sub>4</sub> et le N<sub>2</sub>O qui contribuent respectivement à hauteur de 72%, 19% et 6% aux émissions mondiales totales de gaz à effet de serre hors utilisation des terres, les gaz fluorés représentant les 3% restants. (Olivier J. et al, 2019).

Les combustibles fossiles représentent 84% de nos sources d'énergie, en 2019, et sont principalement utilisés pour les transports, le chauffage et la production d'électricité. Le pétrole détient la plus grande part du mix énergétique (33,1%). Le

charbon représente 27,0%. La part du gaz naturel et des énergies renouvelables a atteint des niveaux records, respectivement, de 24,2% et 5,0%. Le nucléaire représente 4,3% du mix énergétique. La part de l'hydroélectricité est stable avec environ 6% depuis plusieurs années. [British Petroleum Company. (2020). BP statistical review of world energy. London : British Petroleum Co.]

En 2018, la génération de l'électricité à partir des combustibles fossiles représentait 66,3% de la production mondiale brute (IEA, 2020b). Les émissions de CO<sub>2</sub> provenant de la production d'électricité comptent environ 40% du total (IEA, 2020a). La Demand Side Management (DSM) ou gestion de la demande joue un rôle important dans la réduction des coûts d'électricité et des émissions de CO<sub>2</sub> associées à l'utilisation d'électricité au niveau des consommateurs. Il a également un rôle important à jouer dans l'intégration des différentes sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le solaire, dans le réseau. (Summerbell D. et al, 2017).

### **Demand Side Management**

La Demand Side Management (DSM), traduite dans la littérature française en Maîtrise de Consommations (Bergaentzlé C. et al, 2013) ou Maîtrise de la Demande d'Electricité (Gimélec, 2011) est un ensemble de moyens d'actions qui vise à réduire la consommation énergétique du réseau électrique dans son ensemble. Cela pourrait inclure le stockage de l'énergie, l'utilisation d'appareils qui consomment moins d'énergie, l'éducation des usagers dans le sens d'un changement de comportement dans l'usage de l'énergie (Li, D. et al, 2017). La Demand Response (DR) ou Réponse à la Demande est une option de la DSM. Elle est définie par la Federal Energy Regulatory Commission, comme les changements dans l'utilisation de l'électricité par les utilisateurs finaux, et ce, par rapport à leurs profils de consommation en réponse aux fluctuations du prix de l'électricité dans le temps. En outre, la DR peut également être définie comme les paiements incitatifs conçus pour induire une baisse de la consommation d'électricité en période de hausse de prix sur le marché ou lorsque la fiabilité du système est compromise (Murthy Balijepalli et al., 2011). La DR comprend toutes les modifications intentionnelles des profils de consommation d'électricité des clients finaux afin de modifier le timing, le niveau de la demande instantanée ou la consommation totale d'électricité. (Albadi, M. et El-Saadany, E., 2007). La DSM joue un rôle important dans la réduction des coûts d'électricité et des émissions de CO<sub>2</sub> associées à l'utilisation d'électricité au niveau des consommateurs. Elle a également un rôle important à jouer dans l'intégration des différentes sources d'énergie renouvelable, comme l'éolien et le solaire, dans le réseau (Summerbell, D. et al, 2017). Plusieurs travaux ont prouvé que l'implémentation de la DSM améliore la performance d'un Smart Grid qui intègre des sources à énergie renouvelable dans l'équilibre de l'offre et de la demande. Un programme DR implémenté en s'appuyant sur un modèle prédictif centralisé dans un

système hybride photovoltaïque-batterie a ressorti une diminution des coûts des clients et une utilisation optimale de l'énergie solaire et de la batterie de stockage (Wu Z. et al, 2015). Un micro-réseau industriel avec éolienne et unité de stockage d'énergie a également été considéré, l'intégration de l'éolienne a réduit l'émission du CO<sub>2</sub> à 88% et l'implémentation centralisée de la DSM a encore diminué cette émission de 30%, les coûts de l'électricité ont également été réduits de 73% (Blake S. et Sullivan D., 2018). Un micro-réseau résidentiel avec panneau photovoltaïque, éolienne et unité de stockage d'énergie a été étudié, avec l'implémentation d'un programme DR décentralisé, la demande d'énergie a été réduite de 16%, la réduction des émissions de CO<sub>2</sub> ainsi que la consommation d'énergie associée ont été de 10%, la quantité d'approvisionnement renouvelable a été réduite de 74% (Quiggin D. et al, 2012). Un Réseau de micro-réseaux avec éolienne et cellule solaire implémentant un programme DR décentralisé enregistre une réduction du coût opérationnel et des émissions de carbone (Aghajani G. et al, 2017). L'implémentation centralisée d'un programme DR sur un système énergétique avec panneaux photovoltaïques, éolienne, générateurs diesel et batteries donne une réduction des coûts d'exploitation et environnementaux (Wang X. et al, 2015).

## **Méthodes**

Divers travaux ont été classés pour pouvoir analyser différentes méthodes et approches d'optimisation utilisées dans le cadre de la DSM ainsi que les résultats.

Divers types d'algorithmes existent dans la littérature pour résoudre les problèmes d'optimisation de la DSM dans Smart Grid. Les plus étudiés peuvent être classés en trois catégories. Les algorithmes d'optimisation classiques regroupent la programmation linéaire (LP), la programmation non-linéaire (NLP) et la programmation dynamique (DP). Viennent ensuite les Algorithmes métaheuristiques et évolutionnaires regroupant les algorithmes comme l'essaim de particules (PSO), l'algorithme génétique (GA) et la colonie de fourmis (ACO). Enfin vient la théorie des Jeux (GT) (Sarker E. et al, 2020)

### ***Programmation linéaire (Linear Programming)***

La LP est très utilisée pour résoudre des problèmes d'optimisation DSM. Elle a été utilisée pour la gestion de la planification de charges dans le but d'augmenter le profit des fournisseurs d'énergie (Sheblt G., 1998). La LP a également servi pour planifier les charges pendant des périodes critiques afin de minimiser la charge de pointe du système pour des charges résidentielles, commerciales et industrielles (Kurucz C. et al, 1996). Un mécanisme d'ordonnancement de charges a été proposé, dans le but de réduire les charges aux heures de pointe (Zhu Z. et al, 2012) et un modèle LP à objectifs multiples a été proposé pour augmenter la capacité de production d'électricité. Le coût total de l'extension, l'impact environnemental

associé à la production d'énergie et les effets environnementaux ont été pris en compte (Martins A. et al, 1996).

### ***Programmation non-linéaire (Non-Linear Programming)***

De nombreux chercheurs ont utilisé la méthode NLP pour résoudre les problèmes d'optimisation de la DSM (Kontorinaki M. et al, 2015). Pour planifier les batteries et les charges mobiles, une méthode NLP à nombres entiers mixtes (MINLP) a été utilisée, ceci a permis de constater une réduction des coûts d'exploitation du réseau (Shaaban M. et al, 2016). Il en est de même pour MINLP qui a également été utilisé pour optimiser le modèle de répartition d'une maison intelligente avec des ressources énergétiques distribuées et des appareils ménagers intelligents où la réduction des coûts d'électricité et de consommation d'énergie (Wang J. et al, 2012) a été notée. Cependant, le MINLP n'a pas été en mesure de gérer de nombreux appareils. Un modèle de gestion de l'énergie basé sur le MINLP a été proposé pour planifier de manière optimale les différentes technologies de génération de micro-réseaux hybrides AC/DC dans les îles. Un calendrier optimal avec un coût minimum a été obtenu (Helal S. et al, 2017).

### ***Programmation Dynamique (Dynamic Programming)***

Plusieurs études pour résoudre les problèmes d'optimisation DSM de SG ont été effectuées en utilisant la DP. Un algorithme de DP a été proposé pour déterminer les plans d'ordonnancement des climatiseurs d'un immeuble commercial. La méthode a réduit la charge de pointe en fonction du niveau d'inconfort des clients (Chu W. et al, 1993). Un modèle DP analytique a été utilisé pour planifier certains des appareils de charges résidentielles. Dans l'étude, les performances des algorithmes et les périodes de contrôle des appareils ont été étudiées (Cohen A. et Wang C., 1988). Une méthode d'optimisation a été introduite pour réduire le coût de production d'énergie du système. Par conséquent, les stratégies DLC ont été intégrées à un problème d'engagement d'unité, et une méthode DP a été développée pour résoudre la répartition du DLC et le problème d'engagement d'unité (Hsu Y. et al, 1991). Pour réduire la demande d'électricité dans l'environnement SG, il a été proposé un modèle DP avec un cadre de cloudcomputing, qui a créé un petit hub énergétique avec les clients et a affiché la participation des clients aux programmes DSM (Reka S. et Ramesh V., 2016).

### ***Algorithme génétique (GeneticAlgorithm)***

Les revues relatives à l'application de l'AG dans DSM sont nombreuses. Dans un problème de déplacement de charge depuis les heures de pointe vers les heures creuses, a été utilisé un algorithme évolutionnaire heuristique, pour implémenter un programme DSM centralisé, dans des zones résidentielles, commerciales et industrielles avec divers types de charges. Faute de programme incitatif, on

enregistre une réduction des coûts d'exploitation moins importante (Logenthiran T. et al, 2012). Une autre étude a été proposée, qui n'a considérée, cette fois, que des charges industrielles au moyen d'une technique de transfert de charge où l'inconfort des clients, le coût de production d'énergie et le coût total de l'électricité ont été réduits (Jayadev V. et Swarup K., 2013). De même, un modèle DSM a été proposé pour façonner le profil de charges et réduire la consommation d'énergie dans les zones industrielles, commerciales et résidentielles en utilisant une technique de transfert de charge appropriée (Bharathi C. et al, 2017). L'AG a été également utilisée pour déplacer les charges de refroidissement résidentielles afin qu'elles correspondent à la production d'énergie renouvelable. Cette même approche peut être appliquée aux charges de chauffage, de ventilation et de climatisation (Arabali A. et al, 2013). Un programme DSM basé sur un GA à approfondissement itératif, a été mis en place pour optimiser la planification du contrôle des charges et minimiser la perte sur les revenus des sociétés de production d'électricité (Yao L. et al, 2005). Seules les charges de climatisation ont été étudiées, l'impact est minime.

### ***Optimisation par essaim particulière (Particle Swarm Optimization)***

Diverses approches du PSO ont été mises en avant dans la DSM. Une technique d'ordonnancement centralisée des charges le jour suivant en tenant compte les entrées des clients et les tarifs horaires d'électricité prévus a été mise en place. Reformulez cette phrase, ce n'est pas clair. L'étude a considéré des charges déplaçables et non déplaçables. Une simulation réalisée sans programme d'incitation dans des zones résidentielles, commerciales et industrielles a engendré une réduction du PAR et une diminution des coûts d'électricité (Logenthiran T. et al, 2015). A également été développé une stratégie DSM qui considère une méthode de transfert des charges résidentielles, l'optimisation heuristique basée sur la population a été utilisée pour résoudre les problèmes d'ordonnancement et fournir des solutions optimales globales (Nayak S. et al, 2015). L'algorithme PSO multi-objectifs a été étudié pour réduire les coûts d'exploitation et les émissions grâce à l'intégration de sources renouvelables dans un micro-réseau. L'intermittence des sources affecte remarquablement le coût d'exploitation (Aghajani G. et al, 2017). BPSO, une forme modifiée de l'algorithme PSO a été utilisé pour planifier des charges interruptibles et ont résolu un problème d'optimisation multi-objectifs (Kennedy J. et Eberhart R., 1997). Une planification basée sur le BPSO s'est avérée efficace pour réduire les coûts d'électricité, tout en classant les appareils en fonction des contraintes respectives et du temps d'utilisation effectif (Mahmood D. et al, 2016). Pour maintenir la consommation d'énergie, une utilisation optimale des appareils en temps réel via BPSO a eu comme résultat le lissage des pics, le remplissage de la vallée et la réduction de la courbe de la demande ainsi que la consommation d'énergie (Zhou Y. et al, 2014). Le BPSO a également été appliqué pour résoudre les coûts d'usage liés aux véhicules électriques et des sources d'énergie (Zhou Y. et Xu G., 2014).

## ***Optimisation par colonie des fourmis (Ant Colony Optimization)***

Des recherches sur ACO ont été menées. Une méthode d'auto-optimisation distribuée a été considérée pour réduire l'achat externe d'énergie. L'algorithme a optimisé des charges distribuées des consommateurs, la puissance d'une centrale éolienne et a ajusté la production et la demande moyennes (Dethlefs T. et *al*, 2015). L'ACO a été utilisé pour contrôler l'énergie résidentielle, le modèle a réduit la charge de pointe, le PAR et les coûts d'électricité (Rahim S. et *al*, 2016). Les problèmes de congestion de charges ont été abordés via DR, ACO et logique floue qui ont montrés une satisfaction des clients et une réduction du coût de l'électricité (Hazra J. et *al*, 2012). Une autre étude sur le problème de la gestion de la congestion en temps réel a été développé, l'algorithme ACO a fourni une solution réalisable au problème et minimisé le coût de l'électricité (Liu B. et *al*, 2011). Un algorithme ACO d'ordonnancement de charges pour maison intelligente a été implémenté, le travail s'est focalisé sur la facture d'électricité totale, le temps d'utilisation, et le confort (Okonta C. et *al*, 2016).

## ***Théorie des Jeux (Game Theory)***

Un modèle GT non-coopératifs a réduit la demande de pointe, le PAR et le coût total de l'énergie. La GT n'a pas été en mesure de converger vers la solution optimale dans la conception centralisée, mais a minimisé le PAR pour être proche de la solution optimale de la conception centralisée. Un modèle DSM non stationnaire optimal basé sur un modèle de jeu répété, compatible avec les incitations a été également développé (Nguyen H. et *al*, 2012). Un modèle DSM utilisant la technologie radio cognitive dont la fonction coût est axée sur les préférences des clients avec un modèle de paiement équilibré comprenant la facturation, la production d'électricité et les coûts d'inconfort a été appliquée pour optimiser la méthode de planification de stockages distribués. C'est ainsi qu'a été notée la réduction du PAR, du coût total de l'énergie, du paiement quotidien des clients et de la consommation d'énergie (Wang K. et *al*, 2018). La planification de la consommation d'énergie résidentielle a été formulée comme un jeu de contraintes liées aux interactions entre les clients. Une approche de tarification en temps réel a déplacé la demande en heures de pointe vers les heures creuses afin d'équilibrer la demande d'énergie (Deng R. et *al*, 2014). Un modèle DSM incitatif, autonome et distribué basé sur le GT a été proposé. Les auteurs se sont concentrés sur la planification de la consommation d'énergie en tenant compte des charges résidentielles. Une réduction de la charge de pointe, des coûts totaux de l'énergie et des frais d'électricité quotidiens des clients (Mohsenian-Rad A. et *al*, 2010) a été enregistrés. Un système d'alimentation intelligent avec un dispositif de stockage d'énergie basé sur le GT a été étudié pour diminuer la distance euclidienne carrée entre les demandes d'électricité instantanées et moyennes du système énergétique. La

consommation d'énergie a été planifiée à l'aide du modèle de partage des coûts énergétiques et les charges ont été synchronisées d'une manière centralisée (Nguyen H. et al, 2015).

## RESULTATS

**Tableau 1** : Performances des algorithmes utilisés en DSM

Algorithme	Reduction PAR [%]	Reduction Coûts [%]	Simulation	Référence
GT	38.1	37.8	MATLAB	(Mohsenian-Rad A. et al, 2010b)
GT	31.5	22.43	MATLAB	(Wang K. et al, 2018)
GT	17	19.6	MATLAB	(Mohsenian-Rad A. et al, 2010a)
GT	40	19	Temps Réel	Nguyen H. et al, 2015)
GA	14.2-18.3	5-10	Temps Réel	(Logenthiran T. et al, 2012)
GA	23.84	x	MATLAB	(Bharathi C. et al, 2017)
PSO	43	18	MATLAB	(Logenthiran T. et al, 2015)

## DISCUSSION

Les algorithmes tels que GA, PSO, ACO, LP, NLP et DP utilisés pour résoudre les problèmes d'optimisation DSM sont différents en termes d'efficacité, de fiabilité, de simplicité et de vitesse de convergence. Par ailleurs, mathématiquement, la théorie des Jeux (GT) détermine la meilleure stratégie pour des conditions données et optimise les résultats.

D'autres types d'algorithmes existent pour les problèmes d'optimisation en DSM, peuvent être cités les algorithmes basés sur l'intelligence artificielle, les algorithmes hybrides, et autres. Les modèles d'optimisation basés sur des algorithmes hybrides améliorent la précision et temps de calcul des problèmes d'optimisation DSM.

Dans le choix de l'algorithme pour résoudre les problèmes d'optimisation DSM, il faut prendre en compte les types de problèmes, mono ou multi-objectifs, la précision, l'optimisation locale ou globale, la robustesse.

## CONCLUSION

Ce travail nous a montré qu'une bonne implémentation du DSM permet de maximiser l'efficacité énergétique et d'atteindre les objectifs économiques et environnementaux. Le choix des approches d'optimisation dépend fortement du modèle du système et des paramètres à optimiser. La théorie des Jeux est l'approche la plus intuitive pour modéliser des interactions en plusieurs entités.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Aghajani GR, Shayanfar HA, Shayeghi H. (2017). Demandside management in a smart micro-grid in the presence of renewable generation and demand response. *Energy*. 126:622-637.
- 2) Albadi, M. H., El-Saadany, E. F. (2007). Demand Response in Electricity Markets: An Overview. 2007 IEEE Power Engineering Society General Meeting. doi:10.1109/pes.2007.385728
- 3) Amrollahi MH, Bathaee SMT. (2017). Techno-economic optimization of hybrid photovoltaic/wind generation together with energy storage system in a stand-alone micro-grid subjected to demand response. *Appl Energy*. 202:66-77.
- 4) Arabali A, Ghofrani M, Fadali MS, Baghzouz Y. (2013). Genetic-algorithm-based optimization approach for energy management. *IEEE Trans Power Deliv*. 28(1):162-170.
- 5) Avriel M. (2003). *Nonlinear Programming: Analysis and Methods*. Englewood Cliffs, NJ: Dover Publications Inc.
- 6) Bellman R.(2003). *Dynamic Programming*. Princeton, NJ: Dover PublicationsInc; .
- 7) Bertsekas DP. (2018). *Dynamic Programming and Optimal Control*.cBelmont, MA: Athena Scientific.
- 8) Blake ST, Sullivan DTJO. (2018). Optimization of distributed energy resources in an industrial microgrid. *Procedia CIRP*. 67: 104-109.
- 9) Bradley J. (2012). Optimal pivot point selection for the simplex method.
- 10) British Petroleum Company. (2020). *BP statistical review of world energy*. London: British Petroleum Co.
- 11) Bu S, Yu FR. (2013). A game-theoretical scheme in the smart grid with demand-side management: towards a smart cyberphysical power infrastructure. *IEEE Trans Emerg Top Comput*. 1(1):22-32.
- 12) Chen HH, Member S, Li Y, Member S. (2014). Autonomous demand side management with instantaneous load billing: an aggregative game approach. *IEEE Trans Smart Grid*. 5(4):1744-1754.

- 13) Chu WC, Chen BK, Fu CK. (1993). Scheduling of direct load control to minimize load reduction for a utility suffering from generation shortage. *IEEE Trans Power Syst.* 8(4):1525-1530.
- 14) Çiçek N, Deliç H. (2015). Demand response management for smart grids with wind power. *IEEE Trans Sustainable Energy.* 6(2):625-634.
- 15) Cohen AI, Wang CC. (1988). An optimization method for load management scheduling. *IEEE Trans Power Syst.* 3(2):612-618.
- 16) Dantzig GB, Thapa MN. (1997). *Linear Programming 1*. New York, NY: Springer;
- 17) Deng R, Member S, Yang Z, Chen J, Member S. (2014) Residential energy consumption scheduling: a coupled-constraint game approach. *IEEE Trans Smart Grid.* 5(3):1340-1350.
- 18) Deng R, Yang Z, Chow MY, Chen J. (2015). A survey on demand response in smart grids: mathematical models and approaches. *IEEE Trans Ind Inf.* 11(3):570-582.
- 19) Dethlefs T, Preisler T, Renz W. (2015). Ant-colony based self-optimization for demand-side-management. Paper presented at: Smarter Europe. : pp. 1–8.
- 20) Dietrich K, Latorre JM, Olmos L, Ramos A. (2012). Demand response in an isolated system with high wind integration. *IEEE Trans Power Syst.* 27(1):20-29.
- 21) Dorigo M, Birattari M, Stutzle T. (2006). Ant colony optimization. *IEEE ComputIntell Mag.* 1(4):28-39.
- 22) Dorigo M, Gambardella LM. (1997). Ant colony system: a cooperative learning approach to the traveling salesman problem. *IEEE Trans EvolComput.* 1(1):53-66.
- 23) Fan W, Liu N, Zhang J. (2016). An event-triggered online energy management algorithm of smart home: Lyapunov optimization approach. *Energies.* 9(5):1-24.
- 24) Gimélec, (2011). Réseaux électriques intelligents. Livre blanc Des industriels au service de l'intelligence énergétique.
- 25) Ghofrani M, Hosseini NN. (2016). Optimizing hybrid renewable energy systems: a review. *Sustainable Energy-Technological Issues, Applications and Case Studies*. Rijeka, Croatia: InTech :161-176.
- 26) Hazra J, Das K, Seetharam DP. (2012). Smart grid congestion management through demand response. Paper presented at: IEEE Third International Conference on Smart Grid Communications. pp. 109–114.
- 27) Helal SA, Najee RJ, Hanna MO, Shaaban MF, Osman AH, Hassan MS. (2017). An energy management system for hybrid microgrids in remote communities. *IEEE 30th Can Conf Electric Comput Eng.* :1–4.

- 28) Hillier L. (2018). Nonlinear programming. University of Iowa.
- 29) Hoegh-Guldberg, O .; Jacob, D.; Taylor, M .; Bindi, M .; et coll. (2018). «Chapitre 3: Impacts du réchauffement climatique à 1,5 ° C sur les systèmes naturels et humains». GIEC SR15 2018. 175–311. Changement climatique - [https://fr.qaz.wiki/wiki/Climate\\_change](https://fr.qaz.wiki/wiki/Climate_change)
- 30) Hsu Y, Member S. (1991). Dispatch of direct load control using dynamic programming. *IEEE Trans Power Syst.* 6(3): 1056-1061.
- 31) IEA (2020a), CO2 Emissions from Fuel Combustion: Overview, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/co2-emissions-from-fuel-combustion-overview>.
- 32) IEA (2020b), Electricity Information: Overview, IEA, Paris <https://www.iea.org/reports/electricity-information-overview>
- 33) James M. (2012). Computational tools for smart grid design. In: Hanzo L, ed. *Smart Grid: Fundamentals of Design and Analysis*. Piscataway, NJ: Wiley; .
- 34) Kapade N, Deshmukh S. (2013). Comparative study of game theoretic approaches in distributed system. Paper presented at: World Congress on Computer and Information Technology. pp. 1–4.
- 35) Kontorinaki M, Spiliopoulou A, Papamichail I, Papageorgiou M, Tyrinopoulos Y, Chrysoulakis J. (2015). Overview of nonlinear programming methods suitable for calibration of traffic flow models. *Oper Res.* 15(3):327-336.
- 36) Kurucz CN, Brandt D, Sim S. (1996). Linear programming model for reducing system peak through customer load control programs. *IEEE Trans Power Syst.* 11(4):1817-1824.
- 37) Kweku, D., Bismark, O., Maxwell, A., Desmond, K., Danso, K., Oti-Mensah, E., Quachie, A., & Adormaa, B. (2018)
- 38) Logenthiran T, Srinivasan D, Shun TZ. (2018). Demand side management in smart grid using heuristic optimization. *IEEE Trans Smart Grid.* 3(3):1244-1252.
- 39) Mahmood D, Javaid N, Alrajeh N, et al. (2016). Realistic scheduling mechanism for smart homes. *Energies.* 9(3):1-28.
- 40) Martins AG, Coelho D, Antunes CH, Clímaco J. (1996). A multiple objective linear programming approach to power generation planning with demand-side management (DSM). *Int Trans Oper Res.* 3(3–4):305-317.
- 41) Murthy Balijepalli, V. S. K., Pradhan, V., Khaparde, S. A., & Shereef, R. M. (2011). Review of demand response under smart grid paradigm. ISGT2011-India. doi:10.1109/iset-india.2011.6145388
- 42) Nguyen H, Song J, Han Z. (2012). Demand side management to reduce peak-to-average ratio using game theory in smart grid. Paper presented at: IEEE Conference on Computer Communications Workshops. pp. 91–96.

- 43) Nguyen HK, Bin SJ, Han Z. (2015). Distributed demand side management with energy storage in smart grid. *IEEE Trans Parallel Distrib Syst.* 26(12):3346-3357.
- 44) Okonta CI, Kemp AH, Edopkia RO, Monyei GC, Okelue ED. (2016). A heuristic-based ant colony optimization algorithm for energy efficient smart homes. Paper presented at: 5th International Conference & Exhibition on Clean Energy. pp. 1–12.
- 45) Olivier J.G.J. and Peters J.A.H.W. (2019). Trends in global CO2 and total greenhouse gas emissions: report. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency, The Hague.
- 46) Palma-Behnke R, Benavides C, Aranda E, Llanos J, Sáez D. (2011). Energy management system for a renewable based microgrid with a demand side management mechanism. Paper presented at: IEEE Symposium on Computational Intelligence Applications In Smart Grid. pp. 1–8.
- 47) Pedrasa MAA, Member S, Spooner TD, Macgill IF. (2009). Scheduling of demand side resources using binary particle swarm optimization. *IEEE Trans Power Syst.* 24(3):1173-1181.
- 48) Philippou N, Venizelou V, Makrides G, Hadjipanayi M, Efthymiou V, Georghiou GE. PV integration and price-based
- 49) Quiggin D, Cornell S, Tierney M, Buswell R. (2012). A simulation and optimisation study: towards a decentralised microgrid, using real world fluctuation data. *Energy.* 41(1):549-559.
- 50) Rahim S, Iqbal Z, Shaheen N, et al. (2016). Ant colony optimization based energy management controller for smart grid. Paper presented at: IEEE 30th International Conference on Advanced Information Networking and Applications. pp. 1154–1159.
- 51) Reka SS, Ramesh V. (2016). Demand side management scheme in smart grid with cloud computing approach using stochastic dynamic programming. *Perspect Sci.* 8:169-171.
- 52) Saad W, Han Z, Poor HV, Basar T. (2012). Game-theoretic methods for the smart grid: an overview of microgrid systems, demand side management, and smart grid communications. *IEEE Signal Process Mag.* 29(5):86-105.
- 53) Sarker, E., Halder, P., Seyedmahmoudian, M., Jamei, E., Horan, B., Mekhilef, S., & Stojcevski, A. (2020). Progress on the demand side management in smart grid and optimization approaches. *International Journal of Energy Research.* doi:10.1002/er.5631
- 54) Schäffler S. *Global Optimization: (2012). A Stochastic Approach.* New York, NY: Springer.

- 55) Shaaban MF, Osman AH, Hassan MS. (2016). Day-ahead optimal scheduling for demand side management in smart grids. Paper presented at: European Modelling Symposium : cpp. 124–129.
- 56) Sheblt GB. (1998). Direct load control-a profit-based load management using linear programming. *IEEE Trans Power Syst.* 13(2):688-695.
- 57) Shen J, Jiang C, Liu Y, Qian J. (2016). A microgrid energy management system with demand response for providing grid peak shaving. *Electr Power Components Syst.* 44(8):843-852.
- 58) Smets B. (2014). Investigation on demand side management techniques in the smart grid using game theory and ICT concepts. University of Antwerp. arXiv preprint.
- 59) SofanaReka S, Ramesh V. (2016). A demand response modeling for residential consumers in smart grid environment using game theory based energy scheduling algorithm. *Ain Shams Eng J.* 7(2):835-845.
- 60) Solanki BV, Raghurajan A, Bhattacharya K, Canizares CA. (2017). Including smart loads for optimal demand response in integrated energy management systems for isolated microgrids. *IEEE Trans Smart Grid.* 8(4):1739-1748.
- 61) Song L, Xiao Y, Van Der Schaar M. (2014). Demand side management in smart grids using a repeated game framework. *IEEE J Sel Areas Commun.* 32(7):1412-1424.
- 62) Summerbell, D. L., Khripko, D., Barlow, C., & Hesselbach, J. (2017). Cost and carbon reductions from industrial demand-side management: Study of potential savings at a cement plant. *Applied Energy*, 197, 100–113. doi:10.1016/j.apenergy.2017.03.083
- 63) Wang X, Palazoglu A, El-Farra NH. (2015). Operational optimization and demand response of hybrid renewable energy systems. *Appl Energy.* 143:324-335.
- 64) Wu Z, Tazvinga H, Xia X. (2015). Demand side management of photovoltaic-battery hybrid system. *Appl Energy.* 148: 294-304.
- 65) Yang P, Chavali P, Nehorai A. (2012). Parallel autonomous optimization of demand response with renewable distributed generators. Paper presented at: 2012 IEEE 3rd IntConf Smart Grid Commun. pp. 55–60.
- 66) Yang P, Tang G, Nehorai A. (2013). A game-theoretic approach for optimal time-of-use electricity pricing. *IEEE Trans Power Syst.* ;28(2):884-892.
- 67) Zhou Y, Chen Y, Xu G, Zhang Q, Krundel L. (2014). Home energy management with PSO in smart grid. Paper presented at: IEEE 23rd International Symposium Industrial Electronics. pp. 1666–1670.

- 68) Zhou Y, Xu G. (2014). Demand side energy management with PSO and regulated electric vehicles behaviours. Paper presented at: IEEE PES Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. pp. 1–6.
- 69) Zhu Z, Tang J, Lambotharan S, Chin WH, Fan Z. (2012). An integer linear programming based optimization for home demandside management in smart grid. Paper presented at: IEEE PES Innovative Smart Grid Technologies. pp. 1–5.

# ETUDE DE LA STABILITE DU VACCIN CONTRE LA MALADIE DE NEWCASTLE PAR LE TEST DE LA DEGRADATION ACCELEREE

par

MAMINIAINA Olivier<sup>(2,4)</sup>, RAZAFINDRAFARA Mirantsoa<sup>(1,2)</sup>, HADJI Amina<sup>(1)</sup>,  
RAKOTONDRAVONY F.<sup>(2)</sup>, RAJAONARISON Jean<sup>(3)</sup>, KOKO M.<sup>(2,3)</sup>,  
ANDRIANTSIMAHAVANDY Abel<sup>(4)</sup>

(1) FOFIFA-DRZVP, Antananarivo, Madagascar

(2) IMVAVET, Antananarivo, Madagascar

(3) ESMV, Université d'Antananarivo, Madagascar

(4) Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo, Madagascar

## RESUME

La vaccination reste la meilleure stratégie de lutte contre les maladies. Cependant, la conception d'un vaccin demande un temps énorme pouvant s'étendre sur plusieurs années. La détermination de la durée de conservation est l'une des étapes les plus longues du fait du processus suivi pour la recherche de stabilisateurs adéquats. Ainsi, une nouvelle approche appelée « test de dégradation accélérée » a été utilisée pour activer le choix des stabilisants à adopter. A cette fin, cinq formules vaccinales comportant trois stabilisateurs codés respectivement A-B-C-D-E et I-II-III ont été étudiées. En premier lieu, la dégradation du titre viral est accélérée à haute température afin d'évaluer la stabilité ainsi que la durée de conservation des cinq formulations. Les données obtenues ont ensuite été utilisées pour l'estimation de la durée de conservation à basse température. Les cinq formulations ont montré une durée de conservation variant de 2 heures à 42 jours à haute température, et de 1 mois et demi à plusieurs années à basse température. Cependant, les formulations C, D et E incluant le stabilisateur I présentent une durée de conservation plus courte par rapport aux formulations A et B dans lesquelles les stabilisateurs II et III ont été incorporés. Ces résultats semblent suggérer une meilleure performance des stabilisateurs II et III. Grâce à cette méthode, le temps requis pour le choix des intrants comme le stabilisateur et pour l'évaluation de la durée de conservation du vaccin est raccourci, pouvant même réduire de moitié le délai de la conception de vaccin.

**Mots clés :** Conception, durée de conservation, stabilité, vaccins, stabilisateurs, température

## ABSTRACT

Vaccination remains the best disease control strategy. However, designing a vaccine takes an enormous amount of time, which could span several years. Determining shelf life is one of the longest steps involved in the process of finding suitable stabilizers. Thus, a new approach called "accelerated degradation test" was used to activate the choice of stabilizers to be adopted. To this end, five vaccine formulas comprising three stabilizers coded respectively A-B-C-D-E and I-II-III were studied. First, the degradation of the virus titer is accelerated at high temperature in order to assess the stability as well as the shelf life of the five formulations. The data obtained was then used to estimate shelf life at low temperatures. The five formulations showed a shelf life varying from 2 hours to 42 days at high temperature and from 1.5 months to several years at low temperature. However, formulations C, D and E including stabilizer I exhibit a shorter shelf life compared to formulations A and B in which stabilizers II and III have been incorporated. These results seem to suggest a better performance of stabilizers II and III. With this method, the time required for choosing inputs such as stabilizer and for evaluating the shelf life of the vaccine is shortened, possibly even reducing the time to vaccine design by half.

**Key words** : Design, shelf life, stability, vaccine, stabilizers, temperature

## INTRODUCTION

Maladie aviaire hautement contagieuse, la maladie de Newcastle provoque de graves pertes économiques dans l'aviculture villageoise (Buck, 1947; Koko et *al.*, 2006 ; Koko et *al.*, 2002 ; Koko, 2002 ; Maminaiina et *al.*, 2007). La vaccination constitue à son encontre la meilleure stratégie de contrôle (Csatory et *al.*, 1993), mais elle est rarement utilisée dans les zones rurales du fait de la faible disponibilité de l'électricité (Römer-Oberdörfer et *al.*, 2006). En effet, les vaccins actuellement utilisés contre la maladie de Newcastle sont stockés entre +4°C et +10°C (Maminaiina et *al.*, 2010). La formulation de nouveaux vaccins adaptés au contexte des zones rurales est à l'ordre du jour à Madagascar puisque l'utilisation des vaccins à base de souches thermostables pourrait être une solution pour aider les vaccinateurs dans les villages où les chaînes du froid font défaut (Bensink and Spradbrow, 1999).

En outre, les vaccins sont parmi les produits les plus difficiles à développer (Robinson, 2016). Il convient dès lors de bien comprendre les divers facteurs pouvant influencer l'innocuité, l'efficacité et la stabilité du vaccin tout au long du processus de son développement (Morefield, 2011; Richard et *al.*, 2012). Les protocoles expérimentaux utilisés pour la collecte de données servant de base à l'estimation de la durée de conservation constituent le test de stabilité (Robert, 2003). Dans ce test, les stabilisants doivent être étudiés scrupuleusement pour permettre d'obtenir le vaccin candidat à longue durée de conservation. En utilisant la méthode classique

faisant appel à un test de stabilité en temps réel, le développement d'un vaccin efficace peut demander jusqu'à plus de dix ans selon la maladie considérée (Mahmoud, 2016). En effet, le vaccin est stocké dans les conditions recommandées et surveillé jusqu'à ce qu'il ne remplisse plus les spécifications de référence. Dans la présente étude, la méthode dénommée « Test de Dégradation Accélérée » a été utilisée pour activer le choix des stabilisants adoptés dans les formules vaccinales.

## **MATERIELS ET METHODES**

### **Souche vaccinale**

La souche I2, une souche à-pathogène de la maladie de Newcastle, a été utilisée comme souche d'étude. Elle a été fournie au laboratoire de virologie du FOFIFA-DRZVP (Ampanandrianomby-Antananarivo) en 2005 par le professeur Spradbrow (ACIAR-Australie) dans le cadre du projet de l'AIEA.

### **Multiplification du virus**

La multiplication de la souche I2 a été réalisée sur des œufs embryonnés de 10 jours, exempts d'organismes pathogènes spécifiques (EOPS) selon le protocole recommandé par l'OIE (OIE, 2017). 6,6 ml de la souche sont introduits dans la cavité allantoïdienne de quarante-quatre œufs embryonnés, soit 150µl par œuf. Les œufs inoculés sont ensuite incubés à 37°C pendant 72h. Le liquide allantoïdien est ensuite récolté et conservé à -80°C pour constituer l'antigène viral.

### **Dénombrement d'antigène viral**

L'antigène est introduit dans une microplaque à 96 puits contenant des cellules fibroblastiques BHK<sub>21</sub> clone 13 (Baby Hamster Kidney 21 clone 13) selon la méthode de dilution limite. Une dilution logarithmique de 10 en 10 est effectuée sur l'antigène à titrer pour avoir une dilution variant de 10<sup>-1</sup> à 10<sup>-10</sup>. La microplaque est ensuite incubée à 37°C dans une atmosphère contenant du CO<sub>2</sub> pendant 48h. Une lecture quotidienne est effectuée pour évaluer la présence d'effets cytopathiques. Le titre de l'antigène est calculé suivant la méthode de Reed et Muench (Reed LJ. and Muench H., 1938) puis il est utilisé dans la formulation vaccinale.

### **Test de dégradation accélérée**

#### ***Principe***

Le test de dégradation accélérée (TDA) consiste à soumettre les échantillons à une plage de températures élevées (25°C, 37°C et 55°C). Ces températures provoquent une dénaturation rapide et importante des protéines qui sera facilement détectée dans un laps de temps très court. Le taux de dégradation est mesuré puis extrapolé à des températures plus basses (+10°C à -80°C) auxquelles les vaccins sont stockés en laboratoire ou utilisés sur le terrain ??(Galazka A., 1989).

## Expérience réalisée

Dans cette étude, trois stabilisateurs différents, le lactose (stabilisateur I), la gélatine (stabilisateur II) et le lait écrémé (stabilisateur III) ont été testés. Cinq formules vaccinales sous forme liquide, désignées A, B, C, D et E, ont été développées et étudiées (Tableau 1). Pour chaque formule, le titre initial est fixé à  $10^{7.5}$  DICT<sub>50</sub>/ml (dose infectieuse à 50% pour culture de tissus), tandis que le titre limite acceptable est de  $10^4$  DICT<sub>50</sub>/ml. Ces formules vaccinales ont été divisées en trois lots : les lots 1 et 2 ont été incubés respectivement à 25°C et 37°C pendant 55 jours alors que le lot 3 a été incubé à 55°C pendant 20 heures. Un titrage quotidien a été effectué pour les lots 1 et 2 tandis qu'un titrage toutes les quatre heures a été réalisé pour le lot.

**Tableau 1** : Composition des cinq formules vaccinales

Formulations vaccinales	Antigènes	Stabilisateurs		
		I	II	III
A	50%	-	-	50%
B	50%	-	50%	-
C	50%	50%	-	-
D	10%	-	-	90%
E	100%	-	-	-

### Calcul de la durée de conservation à haute température

La vitesse de dégradation, passage d'un titre  $N_1$  ( $10^{7.5}$  DICT<sub>50</sub>/ml) au titre limite acceptable  $N_2$  ( $10^4$  DICT<sub>50</sub>/ml), a pu être déterminée par l'équation de la perte de titre (équation 1). Connaissant la demi-vie d'un vaccin, la constante de dégradation « k » a été calculée à l'aide de l'équation 2 obtenue en intégrant l'équation 1.

La dépendance à la température « k » pour les réactions chimiques élémentaires ont pu être décrite simplement par l'équation d'Arrhenius (Martin, 1993). Puis l'intégration de l'équation d'Arrhenius (équation 3) a permis d'obtenir une équation linéaire de forme  $y = ax + b$  (équation 4 et 5), avec  $y = \log k$  et  $x = \frac{1}{T}$

$$\text{Equation 1 : } -kt = \frac{dN}{dt} \quad \text{Equation 2 : } t = \frac{2,3}{k} \log \quad \text{Equation 3 : } k = Ae^{-\left(\frac{E}{RT}\right)}$$

$$\text{Equation 4 : } \log k = -\frac{E}{2,3 RT} + \log A \quad \text{Equation 5 : } \log k = \left(-\frac{E}{2,3 R}\right) \left(\frac{1}{T}\right) + \log A$$

Selon les coordonnées obtenues à 25°C ( $x_{25^\circ\text{C}}$ ;  $y_{25^\circ\text{C}}$ ), à 37°C ( $x_{37^\circ\text{C}}$ ;  $y_{37^\circ\text{C}}$ ) et à 55°C ( $x_{55^\circ\text{C}}$ ;  $y_{55^\circ\text{C}}$ ), des droites linéaires, représentant le log de la constante de dégradation "log k" en abscisse et l'inverse de la température de stockage "1 / T" en

ordonnée, ont été tracées à l'aide d'Excel 2010 et la pente "a" a été déduite de la droite.

### **Estimation de la durée de conservation à basse température**

La valeur de la constante de dégradation "k" à basse température est déduite des graphes générés par l'équation  $\log k = a (1 / T) + b$  obtenues à partir des formules vaccinales soumises à haute température. Connaissant la valeur de k, la durée de conservation à basse température est calculée à partir de l'équation 2.

## **RESULTATS**

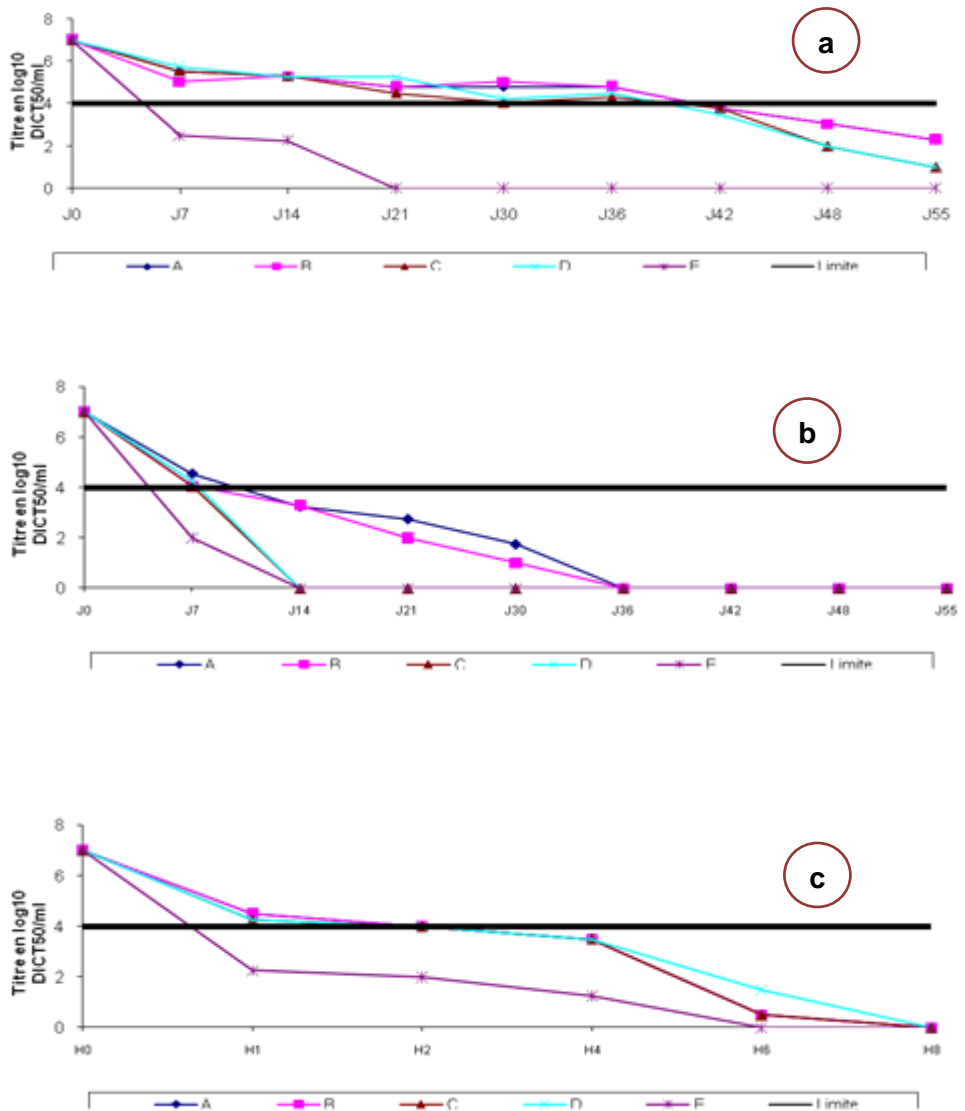
### **Titre de l'antigène viral**

La multiplication de la souche I2 a permis la récolte de 2,5 ml de suspension virale par œuf, donnant ainsi un volume de 110 ml pour les quarante-quatre œufs. La dilution la plus élevée présentant encore plus de 50% de positivité dans chaque puits est  $10^{-8}$ . En appliquant la méthode de Reed et Muench, le titre viral est ainsi égal à  $10^{8.5}$ DICT<sub>50</sub>/ml. Au total, un titre de  $10^{8.5}$ DICT<sub>50</sub> x 110 ml est obtenu.

### **Durée de conservation du vaccin à haute température**

Les formules vaccinales A, B, C, D et E se comportent différemment selon la température de conservation. A 25°C, une forte baisse du titre est constatée au septième jour, avec un titre allant de  $10^{7.5}$ DICT<sub>50</sub>/ml à  $10^{2.5}$ DICT<sub>50</sub>/ml. Cette baisse semble se dérouler en deux phases pour les formules A et B: au départ, la baisse d'activité est rapide avec un taux de dégradation de 23% à 26%. Par la suite, ce taux se stabilise jusqu'au 36ème jour (Figure 1a). A 37°C et à 55°C, la dégradation du titre des cinq formules est rapide, le titre limite étant obtenu respectivement entre 6j et 13j et en moins de 2h (Figures 1b et 1c). Cependant, quelle que soit la température utilisée, le taux de dégradation de la formule E reste toujours le plus élevé. Ces résultats mettent en exergue le rôle important des stabilisants dans le vaccin.

D'après l'équation 2, la constante de dégradation des cinq formules est présentée dans le Tableau 2. Elle augmente proportionnellement en fonction de la température. Des droites exprimant le taux de dégradation du titre en fonction de la température sont présentées dans les Figures 2a, 2b et 2c. Il apparait clairement que la pente de la droite est différente d'un vaccin à l'autre (où Tableaux et Figures ???)

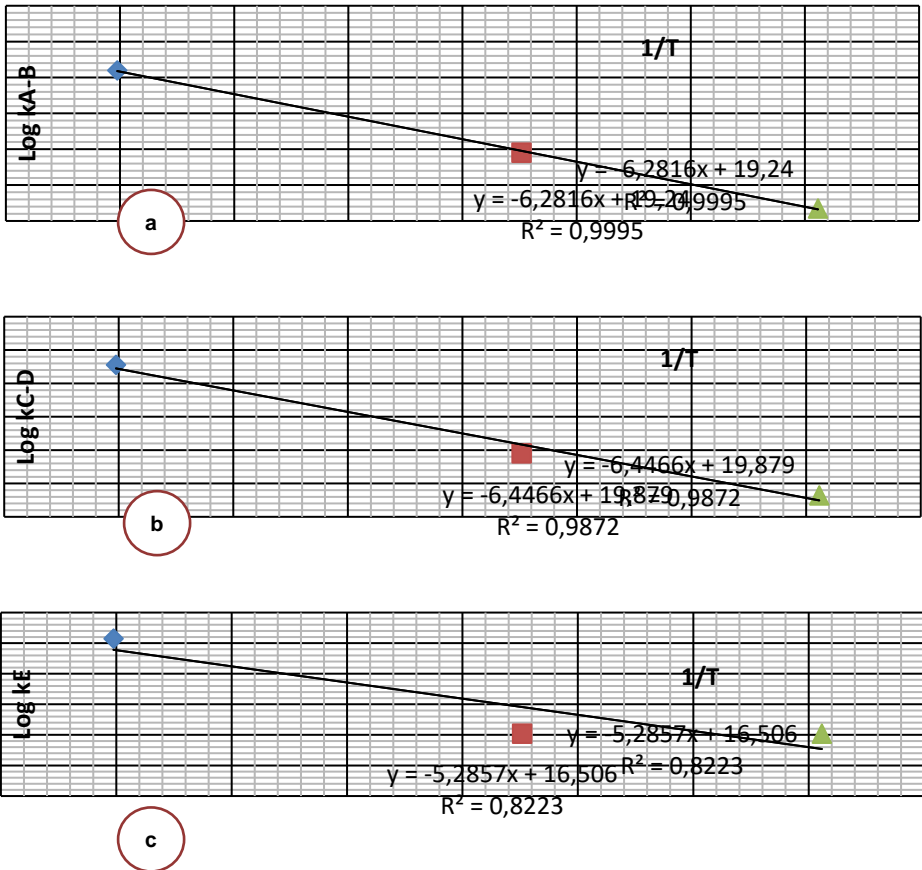


**Figure 1** : Variations du titre viral des formules vaccinales A,B,C,D et E en fonction de la température (a) 25°C, (b) 37°C, (c) 55°C

**Tableau 2** : Les constantes de dégradation (k) des formules A, B, C, D et E à haute température

T° de conservation		Constante de la vitesse de dégradation k (s <sup>-1</sup> )		
T° in °C	T° in °K	A-B	C-D	E
25	298	0,01	0,02	0,08
37	310	0,1	0,06	0,08
55	328	1,26	1,38	-0,68

T° : température ; °C : degré Celsius ; °K : degré Kelvin



**Figure 2** : Les courbes de dégradation des formules vaccinales A et B (a), des formules C et D (b) et de la formule E (c)

## Durée de conservation à basse température

A basse température, la constante de vitesse de dégradation des formules A, B, C, D et E diminue progressivement (Tableau 3) *a contrario* du temps de stockage qui augmente (Tableau 4). Les formules A et B ont une durée de conservation plus longue par rapport aux formules C, D et E.

**Tableau 3** : Les constantes de dégradation k des formules A, B, C, D et E à basse température

T° de conservation	Constante de la vitesse de dégradation k (s <sup>-1</sup> )		
	E	C-D	A-B
4	1,32x10 <sup>-3</sup>	1,93x10 <sup>-3</sup>	5,3x10 <sup>-4</sup>
0	8,93x10 <sup>-3</sup>	8,82x10 <sup>-4</sup>	2,50x10 <sup>-4</sup>
-10	3,16x10 <sup>-3</sup>	1,11x10 <sup>-4</sup>	3,33x10 <sup>-5</sup>
-20	1,03x10 <sup>-3</sup>	1,91x10 <sup>-5</sup>	3,30x10 <sup>-6</sup>
-30	3,07x10 <sup>-4</sup>	1,07x10 <sup>-6</sup>	3,62x10 <sup>-7</sup>
-50	1,96x10 <sup>-5</sup>	4,46x10 <sup>-9</sup>	2x10 <sup>-9</sup>
-80	1,13x10 <sup>-7</sup>	1,4x10 <sup>-14</sup>	7x10 <sup>-14</sup>

T° : température

**Tableau 4** : Les durées de conservation des formules A, B, C, D et E à basse température

T° de conservation	Durée de conservation (mois)		
	A-B	C-D	E
4	40	10,83	1,6
0	83	24	2,34
-10	626	188	6,61
-20	5,50x10 <sup>4</sup>	1,74x10 <sup>3</sup>	20,27
-30	5,79x10 <sup>5</sup>	1,95x10 <sup>4</sup>	68,11
-50	1,20x10 <sup>7</sup>	4,68x10 <sup>6</sup>	1065
-80	2,9x10 <sup>11</sup>	1,4x10 <sup>11</sup>	1,9x10 <sup>5</sup>

T° : température

## DISCUSSIONS

L'aviculture traditionnelle est l'un des investissements agricoles à risque en raison de l'existence de la maladie de Newcastle (MN) causée par le paramyxovirus aviaire de sérotype 1. Pour prévenir la maladie, la vaccination est la principale méthode utilisée. Cependant, pour le cas de la MN, il a été démontré expérimentalement que les vaccins n'empêchent pas la réplication du virus hautement virulent, suggérant ainsi la capacité des oiseaux vaccinés de se comporter comme réservoir (Maminiaina, 2011; Maminiaina et al., 2010; Miller et al., 2013; Miller et al., 2009; Rehmani et al., 2015). A court terme, le développement de vaccin à base de souches thermostables, comme I2, est une solution à ce problème (Alders and Spradbrow, 2001; Chen and Kristensen, 2009). La formulation de nouveaux vaccins mettant à profit les avancées de la biologie moléculaire et de la biotechnologie constitue une solution envisageable sur le long terme (Dimitrov et al., 2017; Kim et al., 2016). La thermo stabilité représente un facteur important dans les pays tropicaux en développement, comme Madagascar (Wiggan et al., 2011). Cependant, la conception d'un vaccin est complexe du fait de la diversité de ses composants tels que les antigènes, les stabilisants, les adjuvants et les conservateurs ((Plotkin et al., 2017; Robinson, 2016). Les stabilisants ou stabilisateurs préservent l'efficacité du vaccin pendant le stockage (Adams, 1996). En effet, ils stabilisent la structure physique du vaccin contre la chaleur, la lumière, l'acidité ou l'humidité et prolongent ainsi la durée de conservation du vaccin (Boyd RJ and Hanson RP., 1958, Zhai et al. 2004). Les stabilisants les plus courants comprennent les glucides (saccharose, lactose, maltose et tréhalose), les alcools de sucre (sorbitol, mannitol) et les protéines (albumine, gélatine) (Bedu-Addo et al., 2004, Bovarnick et al., 1950, Pastorino et al., 2015). Les sucres ont l'avantage d'être peu coûteux et montrent de meilleures performances mais uniquement à des concentrations élevées (Pelliccia et al., 2016).

Pour accélérer le choix des stabilisateurs à utiliser dans un futur vaccin contre la maladie de Newcastle, le TDA est appliqué sur les cinq formules vaccinales (A, B, C, D et E) étudiées. Pour sa réalisation, un titre initial de  $10^{7.5}$  DICT<sub>50</sub>/ml et un titre final de  $10^4$  DICT<sub>50</sub>/ml ont été choisis. En effet, le titre minimum d'un vaccin qui génère toujours une réponse immunitaire protectrice contre la MN est de  $10^{3.1}$  DICT<sub>50</sub>/ml (communication personnelle). Toutefois, pour compenser les pertes de titre qui peuvent survenir lors du stockage, du transport et de l'utilisation des vaccins sur le terrain, la dose minimale est fixée à  $10^4$  DICT<sub>50</sub> /ml. Les formules A, B, C, D et E se comportent différemment en fonction de la température de stockage. Cependant, à 55°C la dégradation à 55°C des cinq formules est spectaculaire (Figure 1c). En effet, l'augmentation de la température de stockage favorise une dénaturation importante des protéines virales, d'où la perte rapide du titre. Toutefois, le processus de dégradation de la formule E (pas de stabilisant) semble être plus rapide qu'il ne

l'est à 25°C, à 37°C ou à 55°C. Un tel constat suggère que la température de stockage n'est pas le seul facteur à considérer lors de la formulation des vaccins. En effet, du fait de l'absence de stabilisant dans la formule E, il devient sensible à la dégradation physique qui entraîne ainsi une réduction rapide du titre viral (Carpenter et *al.*, 1997).

Les stabilisants II et III sont très intéressants dans le développement de futurs vaccins. Cependant, pour les vaccins animaux, le choix de la formule finale dépend du type d'élevage visé et du coût des intrants dans la fabrication du vaccin. Par exemple, les poulets de chair au cycle commercial de 45 jours n'ont pas besoin de vaccins avec stabilisants car ils sont encore protégés par les anticorps maternels. En revanche, les poules pondeuses présentent un cycle commercial de deux à trois ans nécessitent des vaccins avec stabilisant, la nature de la souche détermine également le choix des stabilisants à utiliser. Pour les souches vaccinales thermostables I2, le lait écrémé et la gélatine sont couramment utilisés pour réduire davantage les coûts de production (Alders R and Spradbrow BP., 2000).

## **CONCLUSION**

Cette étude démontre la puissance de la méthode TDA pour accélérer et améliorer les programmes de développement de vaccins, en particulier au stade de la préformulation. En utilisant la méthode TDA, le temps requis pour le choix des intrants tels que les stabilisants est réduit. En remplaçant l'approche empirique du développement des vaccins, en particulier la détermination de la date de péremption, la méthode TDA peut être intégrée dans la formulation permettant un développement plus rapide de vaccins sûrs et fiables. Il est généralement admis qu'il n'existe pas de stratégies et d'outils universellement acceptés pour concevoir des vaccins de manière rationnelle. A Madagascar, le développement de vaccins correspond encore à un processus empirique fastidieux et coûteux. La présente étude porte essentiellement sur le potentiel de la méthode TDA mais des tests de stabilité en temps réel seront utilisés pour la première validation de la méthode. Cependant, cette méthode a ses limites. En effet, une exposition prolongée à des températures supérieures aux conditions de stockage recommandées peut endommager les vaccins de diverses manières (modification de la structure tertiaire des protéines virales, réduction de l'infectiosité virale, diminution de la puissance du vaccin). A l'avenir, les informations obtenues à partir du modèle de calcul du temps de stockage dans cette étude pourraient aider au développement d'un nouveau vaccin thermostable adapté à Madagascar.

## **REMERCIEMENTS**

Ce travail a été effectué au sein FOFIFA-DRZVP Antananarivo Madagascar. Il a reçu le soutien financier du FOFIFA-DRZVP.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Adams, G.D., 1996. Lyophilization of vaccines. *Methods Mol Med*4, 167-185.
- 2) Alders, R., Spradbrow, P.B., 2001. Controlling Newcastle Disease in Village Chickens: a field manual. Canberra. Australian Centre for International Agricultural Research. Monograph, 82 - 112.
- 3) Bedu-Addo, F.K., Johnson, C., Jeyarajah, S., Henderson, I., Advant, S.J., 2004. Use of biophysical characterization in preformulation development of a heavy-chain fragment of botulinum serotype B: evaluation of suitable purification process conditions. *Pharm Res*21, 1353-1361.
- 4) Bensink, Z., Spradbrow, P., 1999. Newcastle disease virus strain I2 - a prospective thermostable vaccine for use in developing countries. *Veterinary Microbiology*68, 131-139.
- 5) Bovarnick, M.R., Miller, J.C., Snyder, J.C., 1950. The influence of certain salts, amino acids, sugars, and proteins on the stability of rickettsiae. *J Bacteriol*59, 509-522.
- 6) Buck, G., 1947. Note sur la maladie des volailles tout nouvellement observé à Madagascar. *Bull. Soc. Path. Exot.*40, 376-382.
- 7) Carpenter, J.F., Pikal, M.J., Chang, B.S., Randolph, T.W., 1997. Rational design of stable lyophilized protein formulations: some practical advice. *Pharm Res*14, 969-975.
- 8) Chen, D., Kristensen, D., 2009. Opportunities and challenges of developing thermostable vaccines. *Expert Rev Vaccines*8, 547-557.
- 9) Csatory, L.K., Eckhardt, S., Bukosza, I., Czeglédi, F., Fenyvesi, C., Gergely, P., Bodey, B., Csatory, C.M., 1993. Attenuated veterinary virus vaccine for the treatment of cancer. *Cancer Detect Prev*17, 619-627.
- 10) Dimitrov, K.M., Afonso, C.L., Yu, Q., Miller, P.J., 2017. Newcastle disease vaccines—A solved problem or a continuous challenge? *Veterinary Microbiology*206, 126-136.
- 11) Kim, H., Lee, Y.K., Kang, S.C., Han, B.K., Choi, K.M., 2016. Recent vaccine technology in industrial animals. *Clin Exp Vaccine Res*5, 12-18.
- 12) Koko, M., Maminiaina, O.F., Ravaomanana, J., Rakotonindrina, S., 2006. Aviculture villageoise à Madagascar : enquête épidémiologique. In *Improving farmyard poultry production in Africa: interventions and their economic assessment*. TECDOC-1489. AIEA, Vienne, 157-163.
- 13) Koko, M., Maminiaina, O.F., Ravaomanana, J., Rakotonindrina, S.J. 2002. Impacts de la vaccination anti-maladie de Newcastle et du déparasitage des poussins sous mère sur la productivité de l'aviculture villageoise à Madagascar. In *Improving farmyard poultry production in Africa : Interventions and their*

- economic assessment, Proceedings of a final research coordination meeting organized by the Joint FAO/IAEA Division of Nuclear Techniques in Food and Agriculture and held in , Vienna 24-28 May 2004, 125-136.
- 14) Koko, M., Maminiaina, O.F., Ravaomanana, J., Rakotonindrina, S.J., 2002. Aviculture villageoise à Madagascar : Productivité et Epidémiologie.
  - 15) Mahmoud, A., 2016. New vaccines: challenges of discovery. *Microbial Biotechnology* 9, 549-552.
  - 16) Maminiaina, O.F., 2011. Caractérisation des virus de la maladie de Newcastle (APMV-1) circulant sur les hautes terres de Madagascar. Département de Biochimie Fondamentale et Appliquée (BDFA) - Faculté des Sciences; Université d'Antananarivo, Thèse de Doctorat d'Université (PhD), Antananarivo.
  - 17) Maminiaina, O.F., Gil, P., Briand, F.X., Albina, E., Keita, D., Andriamanivo, H.R., Chevalier, V.r., Lancelot, R., Martinez, D., Rakotondravao, R., Rajaonarison, J.-J., Koko, M., Andriantsimahavandy, A.A., Jestin, V.r., Servan de Almeida, R., 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.
  - 18) Maminiaina, O.F., Koko, Ravaomanana, J., Rakotonindrina, S.J., 2007. Epidémiologie de la maladie de Newcastle en aviculture villageoise à Madagascar. *Rev. Sci Tech Off. Int. Epi* 26, 691-700.
  - 19) Martin, A., 1993 *Physical Pharmacy*. Philadelphia: Lea & Febiger.
  - 20) Miller, P.J., Afonso, C.L., El Attrache, J., Dorsey, K.M., Courtney, S.C., Guo, Z., Kapczynski, D.R., 2013. Effects of Newcastle disease virus vaccine antibodies on the shedding and transmission of challenge viruses. *Developmental & Comparative Immunology* 41, 505-513.
  - 21) Miller, P.J., Decanini, E.L., Afonso, C.L., 2009. Newcastle disease: Evolution of genotypes and the related diagnostic challenges. *Infection, Genetics and Evolution* doi:10.1016/j.meegid.2009.09.012.
  - 22) Morefield, G.L., 2011. A rational, systematic approach for the development of vaccine formulations. *Aaps J* 13, 191-200.
  - 23) OIE, 2017. Newcastle disease. Chapter 10.9. . in *Infection with newcastle disease virus Terrestrial Animal Health Code - 26/07/2017*, p10.
  - 24) Pastorino, B., Baronti, C., Gould, E.A., Charrel, R.N., de Lamballerie, X., 2015. Effect of Chemical Stabilizers on the Thermostability and Infectivity of a Representative Panel of Freeze Dried Viruses. *PLoS ONE* 10, e0118963.
  - 25) Pelliccia, M., Andreozzi, P., Paulose, J., D'Alicarnasso, M., Cagno, V., Donalisio, M., Civra, A., Broeckel, R.M., Haese, N., Jacob Silva, P., Carney, R.P., Marjomäki, V., Streblov, D.N., Lembo, D., Stellacci, F., Vitelli, V., Krol,

- S., 2016. Additives for vaccine storage to improve thermal stability of adenoviruses from hours to months. *Nature Communications*7, 13520.
- 26) Plotkin, S., Robinson, J.M., Cunningham, G., Iqbal, R., Larsen, S., 2017. The complexity and cost of vaccine manufacturing – An overview. *Vaccine*35, 4064-4071.
- 27) Rehmani, S.F., Wajid, A., Bibi, T., Nazir, B., Mukhtar, N., Hussain, A., Lone, N.A., Yaqub, T., Afonso, C.L., 2015. Presence of virulent Newcastle disease virus in vaccinated chickens in farms in Pakistan. *J Clin Microbiol*53, 1715-1718.
- 28) Richard, L.R., Sampathkumar, K., William, J.C., 2012. Development of Stable Lyophilized Protein Drug Products. *Current Pharmaceutical Biotechnology*13, 471-496.
- 29) Robert, T.M., 2003. Assessing Shelf Life Using Real-Time and Accelerated Stability Tests. Although Accelerated Tests Are Needed, Real-Time Tests Are the Ultimate Proof. *BioPharm International / Nov 01, 2003 Volume 16, Issue 11* (<http://www.biopharminternational.com/assessing-shelf-life-using-real-time-and-accelerated-stability-tests>).
- 30) Robinson, J.M. 2016. Chapter 5 - Vaccine Production: Main Steps and Considerations A2 - Bloom, Barry R, In: Lambert, P.-H. (Ed.) *The Vaccine Book* (Second Edition). Academic Press, 77-96.
- 31) Römer-Oberdörfer, A., Veits, J., Werner, O., Mettenleiter, T.C., 2006. Enhancement of Pathogenicity of Newcastle Disease Virus by Alteration of Specific Amino Acid Residues in the Surface Glycoproteins F and HN. *Avian Diseases* 50, 259-263.
- 32) Wiggan, O.N., Livengood, J.A., Silengo, S.J., Kinney, R.M., Osorio, J.E., Huang, C.Y.H., Stinchcomb, D.T., 2011. Novel formulations enhance the thermal stability of live-attenuated flavivirus vaccines. *Vaccine*29, 7456-7462.



# MAKING RAW EARTH BRICKS IMITATING THE CHARACTERISTICS OF THE “*TAMBOHON'NY NTAOLO*”

par

ANDRIANIRINA Tsiory<sup>(1)</sup>, KOERA Rasoloniaina<sup>(2)</sup>,  
ANDRIANARY Phillipe<sup>(1)</sup>, RAKOTOSAONA Rijalalaina<sup>(1)</sup>

(1) Sciences et Techniques de l'Ingénierie et de l'Innovation (STII) - PhD school, Université d'Antananarivo, Madagascar

(2) Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, University of Antananarivo, Madagascar

## RESUME

Cet article vise à contribuer à un monde plus responsable, en stimulant les applications de matériaux de construction naturels et la réutilisation de la technique de construction des murs ancestraux malgaches, respectueuses de l'environnement. Ces murs à base de terre latéritique, grandes œuvres Malgache debout depuis le 19<sup>ème</sup> Siècle, sont aujourd'hui tombés dans l'oubli.

Ainsi, une reformulation de brique en terre crue imitant les caractéristiques de ces murs a été étudiées avec trois différents sols. Une méthode simple d'immersion dans l'eau pour la détermination de la résistance à l'humidité de l'échantillon, en fonction des durées de maturation des pâtes, a été réalisée.

Le résultat montre que plus le temps de maturation de la pâte est élevé, plus l'échantillon résiste à l'eau. Après 24 semaines de temps de maturation des pâtes, la tenue à l'eau de la brique, qui est de 7 jours, est comparable à celle des échantillons des murs ancestraux âgés de plus de 100 ans.

**Mots clés :** Construction durable, éco-matériaux, formulation, latérite, *tambohon'ny Ntaolo*, tenue à l'eau

## ABSTRACT

This paper aims to contribute to a more sustainable world, by stimulating the applications of natural building materials and the reuse of the Malagasy ancestral wall construction technique, which is environmentally friendly. These walls based on lateritic earth great Malagasy works standing since the 19<sup>th</sup> century, are now forgotten.

Thus, a reformulation of raw earth bricks imitating the characteristics of these walls was studied with three different types of soil. A simple method of immersion in water for the determination of the moisture resistance of the sample, according to the maturation times of the pastes, was carried out.

The result shows that the longer the paste maturation time, the more water resistant the sample. After 24 weeks of paste maturation time, the water resistance of the brick, which is 7 days, is comparable to that of ancestral wall samples that are over 100 years old.

**Keywords** : Sustainable construction, éco-materials, formulation, laterite, *tambohon'ny Ntaolo*, water resistance

## INTRODUCTION

The earth is a traditional building material used throughout history in many parts of the world (Houben et al., 2006). Today, there is also a significant resurgence in its use due to its ecological value and architectural performance.

In Madagascar, the *Tambohon'ny Ntaolo*, these mud walls in lateritic soil, have been emblematic works of art of the Malagasy Central Highlands since the 19th Century (Adrien M., 1972 ; Esoavelomandroso, 1985 ; Nativel, 2005). Currently, these walls are no longer exploited and their traditional manufacturing processes are forgotten. In the majority of cases, the new methods and designs simply downgrade those that prevailed in the 19th Century, the time of our ancestors. Indeed, recent constructions can hardly compare with those of the past. Under the persistent attacks of storms, they can collapse quite easily, while after a hundred years of existence, the old walls remain almost intact.

Thus, our objective is not only to highlight the Malagasy heritage, but above all to unlock the secret of the durability of these walls for a reformulation of raw earth bricks into an ecological, more resistant and low-cost material.

The present work investigates the effect of soil characteristics, soil stabilization using cow dung and rice straw, and the maturation time of the pastes during the making process of raw earth bricks. Initially, the physical characteristics, chemical and mineralogical compositions of the soils were studied. Then, the properties of the bricks were measured, mainly their resistance to water, using a simple method consisting of immersion in water.

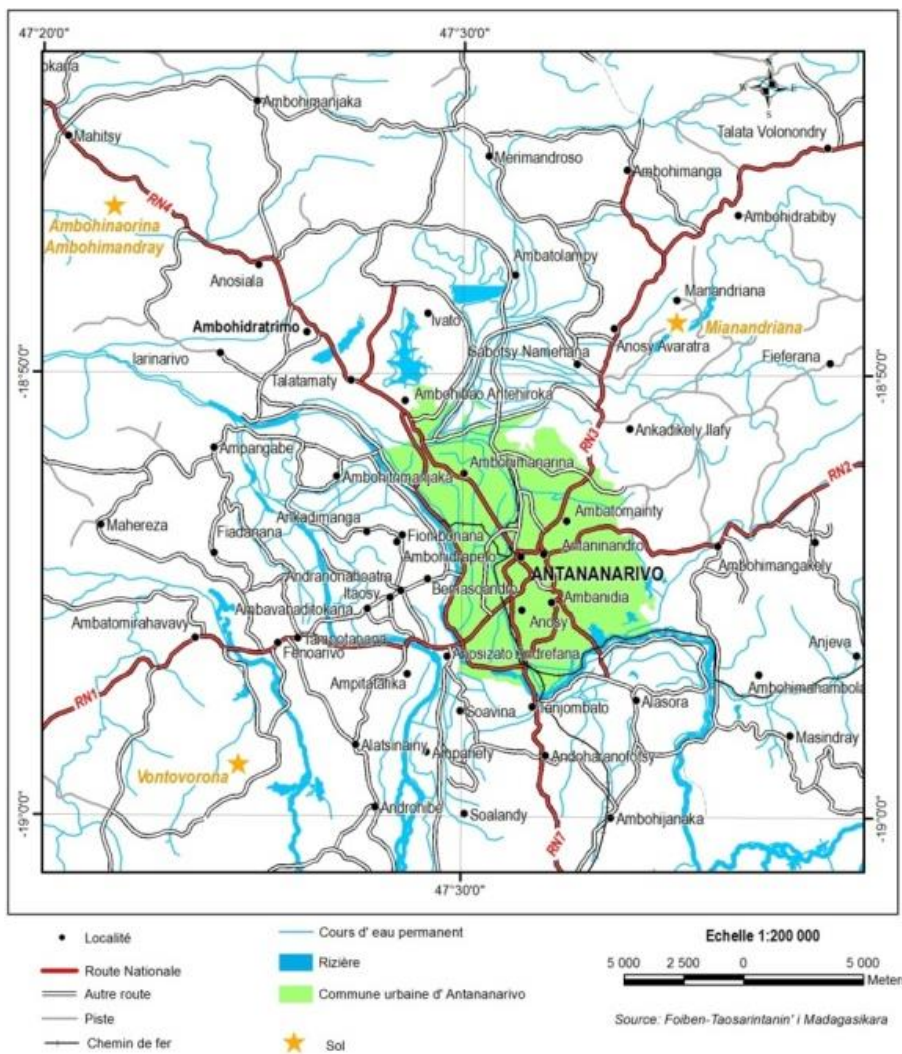
## MATERIELS ET METHODES

### Raw Materials

#### *Soils*

The three soils used in this study came from three different locations (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**). The first was collected at Vontovorona (18°58'51.34" South Latitude, 47°24'42.96" East Longitude), located 21 Km West of Antananarivo, which will be noted as soil A. The other two were collected at

Manandriana (18°48'49.94" South Latitude, 47°35'05.25" East Longitude), located 25 Km North-East of Antananarivo and Ambohinaorina (18°46'16.66" North Latitude, 47°27'40.41" East Longitude), located 35 km North-West of Antananarivo, which will be noted soil B and C respectively.



**Figure 1** : Soil sample collection location map (Source : FTM)

Soil extraction is carried out at one meter deep. The choice of these three soils was based on their different chemical and mineralogical compositions, which can play an important role.

According to the study carried out by Malagasy researchers, the soils of Vontovorona (soil A) have a high iron content (Ranaivoniarivo G., 1992;

Andriamihaja R., 1998; Rakotomalala Z., 2013; Ramaroson J., 2018). It is red in color, marking the presence of iron oxide.

According to the bibliographic study, the soil of Manandriana (soil B) is composed mainly of Silica and Alumina (Ranaivoniarivo G., 1992 ; Andriamihaja R., 1998). Another reason for the choice of this soil is also the fact that the construction of the *Tambohon'ny Ntaolo* in Antananarivo began in this area (Andrien M., 1970).

Soil C was chosen because, after our investigation, we found recent walls that were built using methods specific to their builder in this area.

## **Mixture preparation and specimen design**

### ***Mixture preparation process***

Three tests were carried out :

- Test 1: without stabilization for controls
- Test 2: with stabilization using cow-dung (10% by weight) and rice straw (1% by weight).
- Test 3: with stabilization using cow-dung (10% by weight).

### ***Kneading and fermentation***

The processes of preparation of the pastes, which come from the elements that we have collected during our investigations, are common for the tests. The water used was well water and its percentage in the mixture is about 20%, considered according to the natural water content of the soil in order to have the same machinability and consistency of the pastes.

The cow-dung was liquefied and well mixed in a container. The latter, together with the water, was added gradually to the soil, and the whole was well mixed and trampled to obtain a homogeneous mixture. After this, the dried rice straws, already cut into small pieces, were added and the mixture was again intensively trampled for twenty minutes until a homogeneous mixture was obtained and a paste with the perfect qualities of the required plasticity. The pastes were then placed in an airtight plastic box and left to rest for the desired length time (2; 4; 6; 8; 10; 12; 24 weeks) before the sample was made. Finally, the pastes were kneaded again after a slight re-wetting.

### ***Moulding and drying***

We used wooden moulds of size 4\*4\*16 cm<sup>3</sup>. They were immersed in water for some time before the beginning of the molding, so that they would be saturated. This was to prevent the moulds from absorbing water from the fresh mixture and thus, the latter would not stick to the mold during molding. The molds were then filled with

the manually compacted wet mixture. The top surface was straightened with a wooden tool and the corners of the moulds were carefully filled. Once the casting was completed, the moulds were removed. The final products were air dried in the shade for approximately 21 days, until a constant mass was obtained, in order to avoid thermal shocks that could cause cracks.

## **Experimental procedures**

### *Physical, chemical and mineralogical characterization of soils*

Water content was determined by oven drying method, according to the standard (NF P94-050, 1995).

The soil size distribution was analyzed using two techniques: the coarser fraction (>80  $\mu\text{m}$ ) by wet sieving (NF P94-041, 1995, pp.94-041) and the finer fraction (<80  $\mu\text{m}$ ) by analysis using the method based on the measurement of the sedimentation time of solid particles suspended in a solution of water mixed with sodium hexametaphosphate (( $\text{Na}_6(\text{PO}_3)_6, 10\text{H}_2\text{O}$ ) as a deflocculating agent (NF P94-050, 1995).

The plastic properties of the fine fraction, particles less than 400  $\mu\text{m}$  in size, were measured as defined in NF P94-051, 1993, pp. 94-051.

The specific weight was measured using a pycnometer. Samples were crushed to obtain material grains of sizes less than 0.2 mm.

Tests to determine the Atterberg limits were carried out in accordance with NF P94-051. They were used to determine the plasticity index of soils. The plasticity index (PI) is the difference between the liquidity limit ( $W_L$ ) and the plasticity limit ( $W_P$ ).

$$\text{PI} = W_L - W_P$$

They are carried out on the fraction less than 400  $\mu\text{m}$  of the studied soil. The liquidity limit is calculated from the equation of the mean straight line fitted on the pairs of experimental values: is obtained for a N value equal to 25 strokes, expressed as a percentage (%), and the plasticity limit by the rolling method.

The chemical composition was identified by inductively coupled plasma atomic emission spectrometry (ICP-AES). The loss on ignition was evaluated after calcination of the sample at 1000°C.

X-ray diffraction (XRD) and thermogravimetric analysis (TGA) were used to evaluate the mineralogical composition of the soil. The XRD apparatus used was a Brucker D8-Advance equipped with a SOLLER rear monochromator and a cobalt anticathode ( $\text{CoK}\alpha$ ). The identification of the minerals is carried out with the EVA software. The TGA equipment is composed of a furnace (METLER TOLEDO)

coupled with an HP 34970A acquisition system associated with the STAR ev.15 software.

The soils were crushed using an agate mortar until a powder was obtained which passed through a sieve with a 80  $\mu\text{m}$  mesh for the chemical and mineralogical characteristics.

### ***Water resistance test***

Water resistance is one of the key parameters in determining the durability of materials. For the water resistance test, we used a simple immersion method. Dry specimens are fully immersed in a box filled with water. The time taken for total dislocation is measured and considered as the water resistance of the material (Figure 2).



**Figure 2** : Water resistance test by immersion

This test was done considering the composition of the mixture, the maturation time of the paste and the characteristics of the soils.

For each formulation, three samples were used to determine the water resistance.

## **RESULTS AND DISCUSSION**

### **Soil characterization**

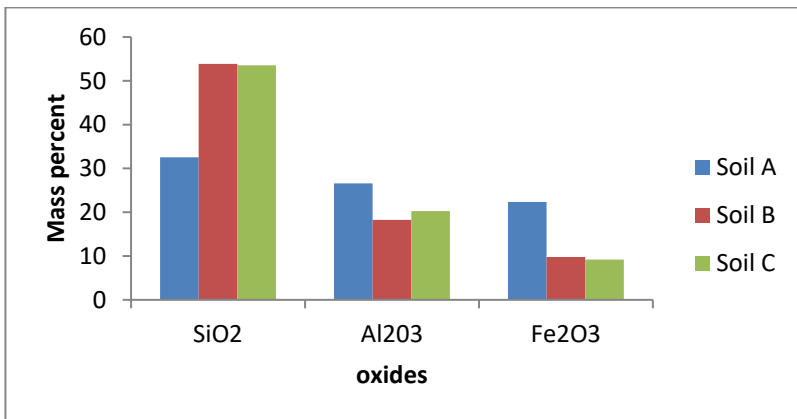
#### ***Chemical and mineralogical characteristics***

The oxide mass percentages of the samples, as well as the loss on ignition, are presented in Table 2.

**Table 2** : Soil chemical composition

Oxides	Soil A	Soil B	Soil C
SiO <sub>2</sub>	32.54	53.88	53.54
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	26.60	18.27	20.26
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	22.34	9.78	9.18
TiO <sub>2</sub>	4.40	1.75	1.69
CaO	0.20	0.11	0.54
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0.40	0.09	0.11
K <sub>2</sub> O	0.08	0.09	0.06
MnO	0.12	-	-
Na <sub>2</sub> O	0.02	0.04	0.02
MgO	-	0.05	0.08
Mn <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.06	0.05
SO <sub>3</sub>	0.04	0.04	0.03
Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	-	0.03	0.02
LOL	13.28	15.82	14.43
Total	100	100	100

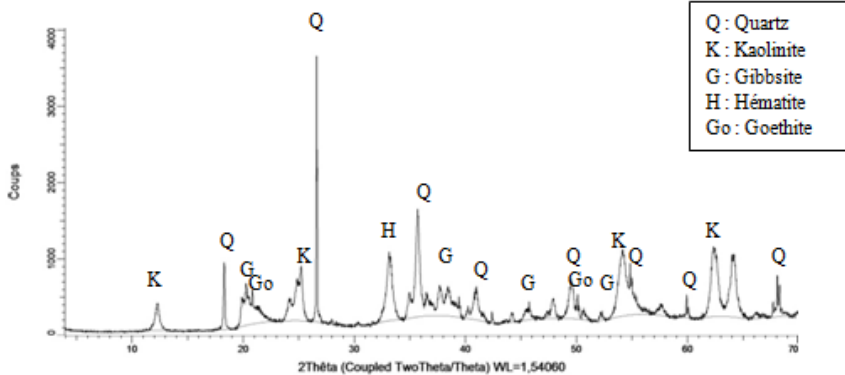
The result shows that the most abundant oxides in the three soils are SiO<sub>2</sub>, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, while the other oxides (K<sub>2</sub>O, CaO, MgO, Na<sub>2</sub>O, TiO<sub>2</sub>, MnO, Mn<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, SO<sub>3</sub>, Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) are present only in small quantities.



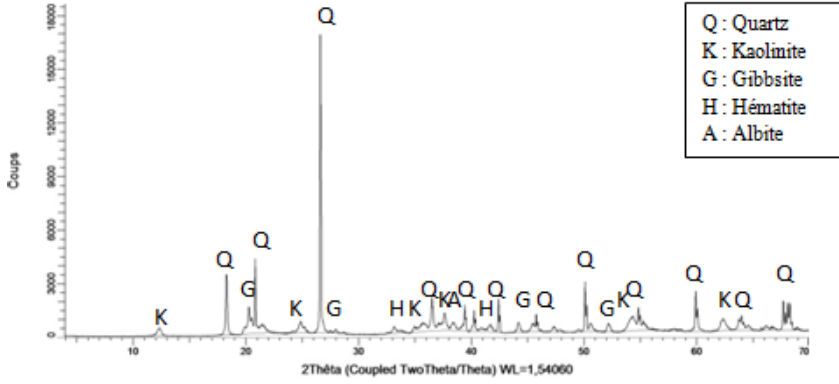
**Figure 3** : Comparison of the major chemical elements of the three soils

Soils B and C contain more SiO<sub>2</sub> than soil A. Soil A, on the other hand, has a significant amount of iron oxide compared to the other two (Figure 3), which gives it its red-brown color. The other important element in soil A is titanium oxide (4.4%).

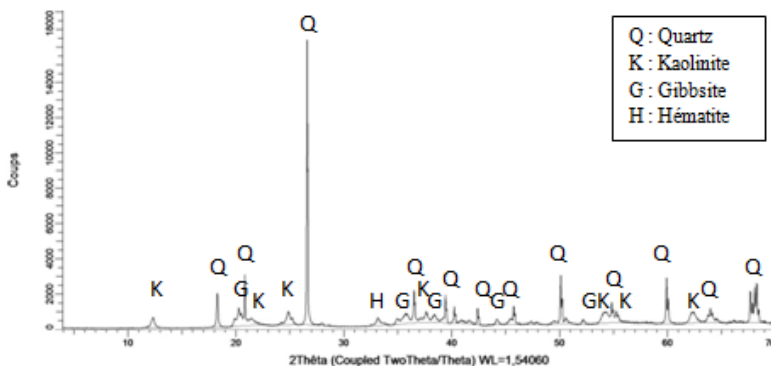
The chemical compositions of the soils were comparable to those found in the literature. Andriamihaja R., 1998, states that the average chemical compositions expressed in main elements of the soils of the Malagasy Highlands are about 50.70 % SiO<sub>2</sub>; 34.40 % Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and 11.70 % Fe<sub>2</sub>O. And according to Ramaroson J., 2018, the soil of Vontovorona contains on average 21 % Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>.



**Figure 4** : Soil A X-ray diffractogram



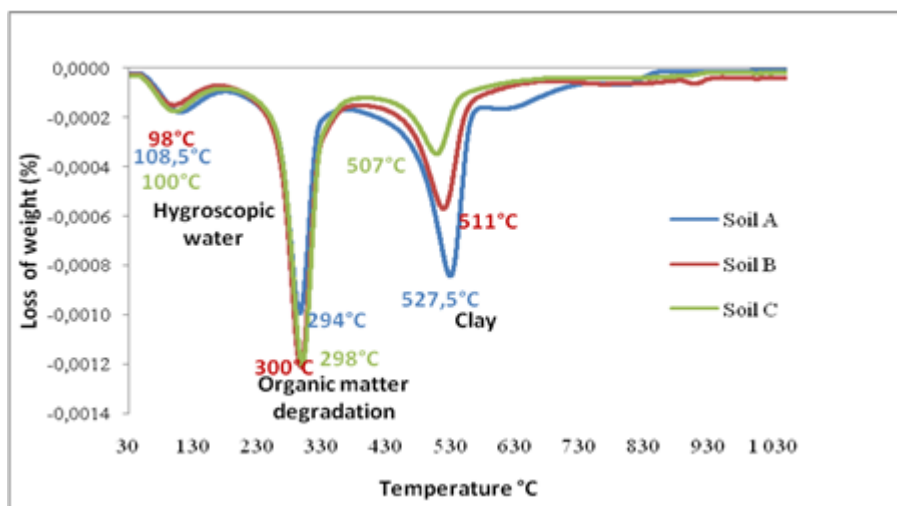
**Figure 5** : Soil B X-ray diffractogram



**Figure 6** : Soil C X-ray diffractogram

Figure 4, Figure 5 and Figure 6 show the X-ray diffractograms for the mineral phase contents of the three soils.

According to the XRD analysis, the main constituent of the three soils is Quartz ( $\text{SiO}_2$ ), which is consistent with the chemical composition that showed that  $\text{SiO}_2$  is the majority oxide of these three soils. The minerals commonly encountered in the three samples are Quartz, Kaolinite  $\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$ , Gibbsite  $\text{Al}(\text{OH})_3$  and Hematite  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , which also confirms the results of the chemical analyses (silicon oxide, alumina oxide and iron oxide are the major oxides). In addition, Sol A contains a large amount of iron hydroxides in the form of Goethite ( $\text{FeOOH}$ ) and a significant amount of titanium oxide in the form of Pseudorutile. A small amount of Albite  $\text{NaAlSi}_3\text{O}_8$  is found in soil C.






**Figure 7** : Soil thermal gravimetric analyses

Figure 7 describes the TGA curves of the soils. It can be seen in the curves that three endothermic peaks have appeared for the three soils. The first peak, which appeared at a temperature of about 100°C, is due to water removal (Faycal E., 2013). The second peak, which appeared at a temperature of about 297°C for soil A, 298 - 300°C for soil B and C, is due to the degradation of organic matter or dehydroxylation reaction of aluminium and iron hydroxides (Faycal E., 2013), possibly due to the presence of goethite for soil A. The endothermic peaks, which appeared at a temperature of about 507 - 527°C for all three soils, are due to the kaolinite loss reaction from the amorphous phase of kaolinite, called metakaolin (Faycal E., 2013).

**Physical and geotechnical soil properties**

The results of the physical and geotechnical property analyses of the soils studied are presented in Table 3. The value indicated for all tests represents the mean value for three samples tested.

**Table 3** : Soil physical and geotechnical characteristics

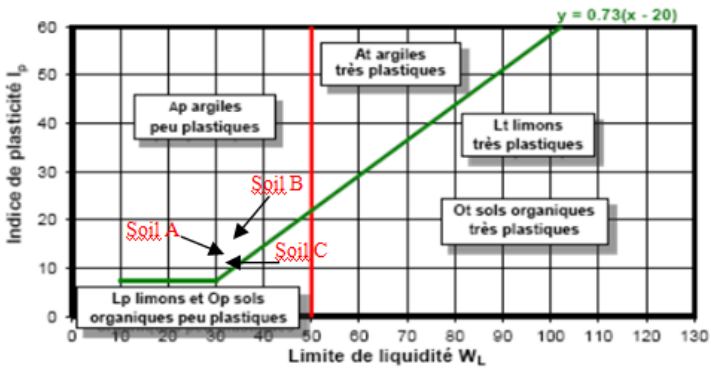
Characteristics		Soil A	Soil B	Soil C
colour				
Water content W (%)		3.41	2.45	3
Specific weight $\gamma_s$ (T /m <sup>3</sup> )		3.02	2.64	2.79
Atterberg limits	Liquidity limit $W_L$ (%)	35.95	37.8	32.2
	Plasticity limit $W_P$ (%)	24.35	22.9	19.5
	Plasticity index $I_P$ (%)	11.60	15	12.7

The soil water content values range from 2.45 to 3.41. It is a physical quantity that characterizes the moisture content of the raw materials. Its value varies according to the time of sampling. Our samples were collected in the month of July (a period without rain) and this is the reason why this moisture content is low.

The specific weight is approximately 2.64 to 3.02. This value is close to that of quartz due to the fact that all three soils have high quartz content. Soil A is the densest (3.02) because it is the richest in iron. In all cases, these values are consistent

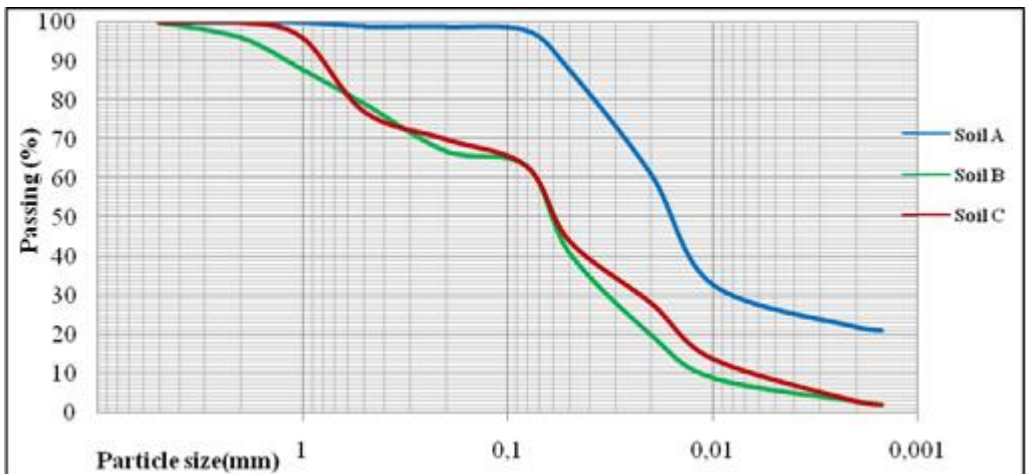
with those of lateritic soils studied by different authors (Lawane, 2014 ; Mengue, 2015 ; Issiakou, 2016).

Figure 8 shows the pairs of plasticity index (PI) and liquidity limit ( $W_L$ ) for the three soils on the Casagrande diagram. Based on this classification, the three soils can be classified as having low plasticity clay soils. Figure 9 shows the particle size curves for soils A, B and C obtained by wet sieving for particles larger than  $80 \mu\text{m}$  and by sedimentometry for particles smaller than  $80 \mu\text{m}$ .



**Figure 8 :** Soil Classification on the Casagrande Diagram

The results presented in Figure 9 and Table 4 show that soil A has an excess of fine particles compared to soils B and C, and the particle size characteristics of soils B and C are quite similar. Overall, all three soils are rich in fine fractions. Soil A is outside the limits recommended by the French standard NF XP 13-901 on CEB (AFNOR 2001) while soils B and C correspond to them.



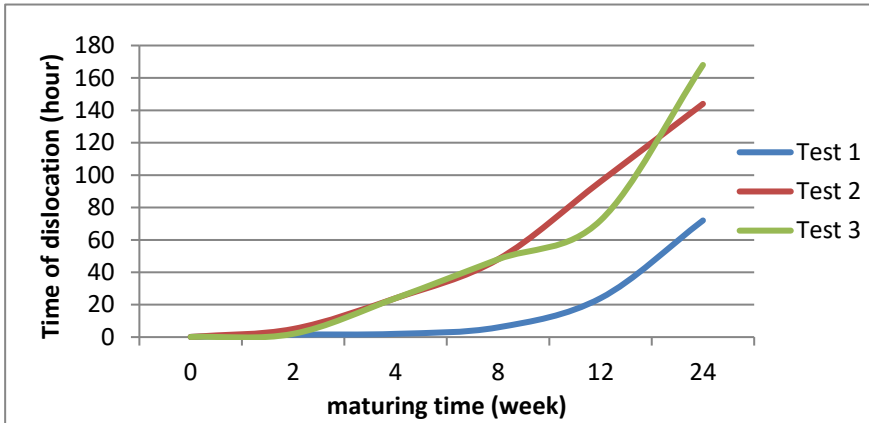
**Figure 9 :** Particle size distribution of the soil (wet sieving and size analysis by sedimentation)

**Table 4** : Granular classes of the three soils studied

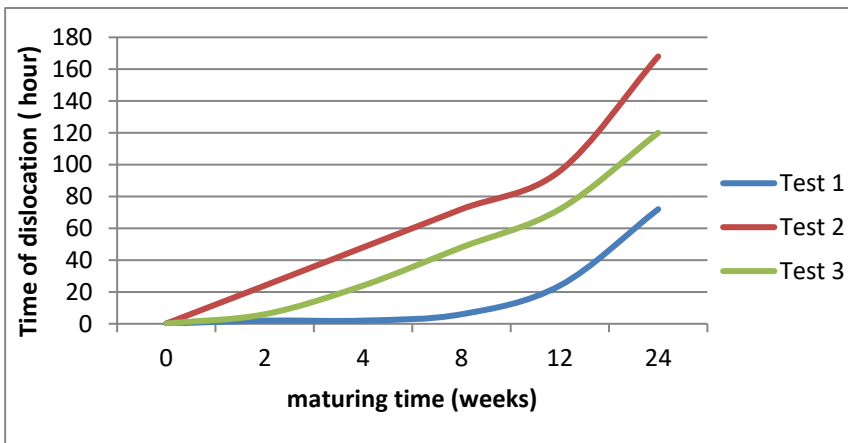
Soil	Clay < 2 $\mu m$ (%)	silt 2-20 $\mu m$ (%)	Fine sand 20-200 $\mu m$ (%)	Coarse sand 20-2000 $\mu m$ (%)	Gravel > 2000 $\mu m$ (%)
Soil A	22	39	38	1	0
Soil B	3	17	47	29	4
Soil C	3	25	42	30	0

**Water resistance test**

Figure 10, Figure 11, Figure 12 show the results of the water resistance expressed in time (corresponding to the time before disintegration of the specimen in water) by the different soils used.



**Figure 10** : Water resistance of specimens made with soil A



**Figure 11** : Water resistance of specimens made with soil B

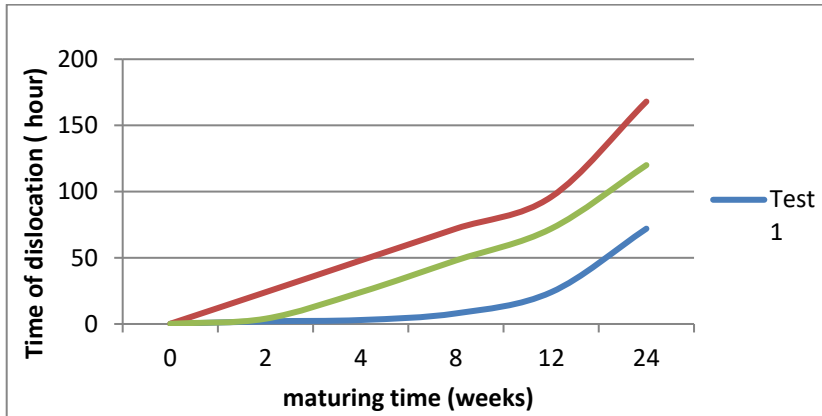


Figure 12 : Water resistance of specimens made with soil C

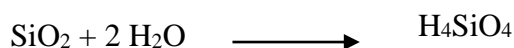
The water resistance of the specimens evolves according to the maturation time of the pastes. It increases progressively with time. Without fermentation of the paste, the specimens disintegrate completely after 10 minutes of immersion in water, whatever their formula.

Soil stabilization using cow-dung and rice straw leads to a significant improvement of the specimens' resistance to water. It evolves from 4 weeks of paste maturation time. At 24 weeks, the water resistance of the specimens is 6 days for soil A, while it is 7 days for soils B and C.

At the same time, we studied the water resistance of 100-year-old ancestral walls. They have a great resistance to water. The samples completely dislocated at 7 days. Comparing this result to our tests, after 24 weeks of maturation time, the water resistance of our specimens is comparable to that of 100-year-old ancestral walls.

To understand this resistance, we can explain the following mechanisms :

- Laterite grains are sealed by a kind of cement :
  - of  $\text{Fe}(\text{OH})_3$  type: indeed, during the maturation of the paste, the reduction of Fe III forms Fe II. The Fe II formed is then oxidized to Fe III (Ramaroson J., 2018). It will have a precipitation of  $\text{Fe}(\text{OH})_3$ . This precipitation is favoured by the presence of pre-existing hydroxides. Oxidation is carried out in the presence of oxygen from the air or by microorganisms.
  - of silica type: during fermentation, silica dissolves giving silicic acid :

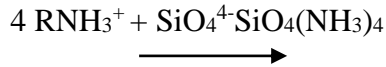


Silicic acid polymerizes in the presence of urea or amino acids. (Thibaud C *et al.*, 2001). This polymerization contributes to the formation of cement.

- of ammonium silicate type : Millogo Y. et al. (2016) proposed that silicic acid obtained during bacterial fermentation reacts with the amine function contained in the cow dung.



$\text{RNH}_3^+$ , then, reacts with the silicic acid according to the reaction:



Polarization of the edge of the kaolinite sheets with urea : kaolinite is an uncharged lamellar clay (neutral sheet), so between the two sheets there are only pendent hydroxides, hence the possibility of intercalating very polar molecules such as the urea contained in cow dung. In general, clays are charged and it is ion exchange that will give rise to intercalation processes. The insertion of the urea molecule into the space between sheets modifies the laterite's physico-chemical properties. For example, there may be a bridging between sheets, which considerably reduces the swelling effect and increases water resistance.

The results show that the specimens made with soil A are less resistant to water compared to those made with soil B and C.

Soils B and C are richer in  $\text{SiO}_2$  and therefore, more favorable for cement formation according to these mechanisms. Moreover, soil A is thinner than soils B and C, therefore, the grains of the latter give a good grip to the infiltration of cement between the laterite grains to better seal them, resulting in a better cohesion between them, hence their high resistance.

## CONCLUSION

This paper presents the preparation process of raw clay bricks according to the *Tambohon'ny Ntaolo*, the ancestral Malagasy technique of wall making. The determination of the water resistance of the bricks was made in comparison with that of the 100-year-old ancient walls. The soils used are lateritic soils, essentially composed of  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  and  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ . They have a fine granulometry, of slightly sandy silty-clay type and belong to the class of clays with low plasticity.

Before the design of the bricks, the earth pastes were fermented according to the desired time (0 to 24 weeks).

The paste maturation is proportional to the water resistance of the specimen. Soil stabilization with cow-dung and rice straw leads to a significant improvement in the water resistance of the specimens. After 24 weeks of paste maturation time, the water resistance of our samples is comparable to that of ancestral walls over 100

years old. They are water resistant for 7 days. This resistance is due to laterite grain sealing by a kind of mineral and organic cements.

The determination of other durability parameters is the perspective of our work.

Finally, the interest of such work for the design of future eco-materials contributes to :

- the valorization of the heritage left to us by our ancestors (ancestral walls),
- the valorization of laterite, a local inexhaustible and economic resource, and
- the protection of the environment protection and the reduction of poverty.

## **ACKNOWLEDGEMENT**

We would like to thank all those who contributed to this research:

- The French Government, the French Embassy and the French Cooperation in Madagascar for the financial support of the doctoral mobility through the BGF 2019 scholarship carried out at the Paul Sabatier University of Toulouse.

- The Laboratory of Materials and Durability of Constructions (LMDC) at the Paul Sabatier University of Toulouse.

- The National Laboratory of Public Works and Construction (LNTPB) of Antananarivo.

The Chemical Engineering and Technical Block Laboratory of the Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA).

## **BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES**

- 1) Adrien M. (1970). Contribution à l'étude des villages fortifiés de l'Imerina Ancien. Doctoral dissertation, Clermond Ferrand. 246- 255.
- 2) Andriamihaja R. (1998). Etudes chimiques des latérites des hauts plateaux de Madagascar. Doctoral dissertation, EES Sciences Antananarivo.
- 3) Esoavelomandroso F. V. (1985). Spatial Layout and Occupation in Antananarivo Mid-Townduring the Colonial Period. The Case of Ankadifotsy Neighbourhood. Cahiers d'études africaines, 337-361.
- 4) Faycal E. (2013). Conception, production et qualification des briques en terre cuite et en terre crue. Doctoral dissertation, Ecole centrale de Lille.
- 5) Houben H., Guillaud H. (2006). Traité de construction en terre. CRATerre, Edition Parenthèse, Marseille, France, 355 p.
- 6) Laurent C. (2011). Phyllosilicates des sols : de l'indentification à la quantification. HDR dissertation, Potiers.

- 7) Lawane G. A. (2014). Caractérisation des matériaux latéritiques indurés pour une meilleure utilisation dans l'habitat en Afrique. Doctoral dissertation, Le Havre.
- 8) Millogo Y., Aubert J. E., Douani S., Antonin F., Morel J. C. (2016). Earth blocks stabilized by cow-dung. *Materials and Structures*, DOI 10.1617/s11527-016-0808-6.
- 9) Nativel D. (2005). Maisons royales, demeures des grands à Madagascar : l'inscription de la réussite sociale dans l'espace urbain de Tananarive au XIXe siècle. KARTHALA Editions.
- 10) NF P94-041 (1995). Reconnaissance et essais - Identification granulométrique - Méthode de tamisage par voie humide. 14.
- 11) NF P94-050 (1995). Reconnaissance et essais - Détermination de la teneur en eau pondérale des matériaux - Méthode par étuvage. AFNOR 10.
- 12) NF P94-057 (1992). Analyse granulométrique des sols, Méthode par sédimentation 17.
- 13) Rakotomalala Z. (2013). Etude de l'influence des propriétés chimiques, physiques, géotechniques sur le comportement des sols latéritiques. Domaines d'utilisation des terres rouges de la région d'Analamanga. En particulier, le cas des routes en terre rouge. Doctoral dissertation, ESPA Antananarivo.
- 14) Ramaroson J. D. (2018). Etude de la stabilisation de la latérite par les micro-organismes : cas de la latérite Vontovorona. HDR dissertation, ESPA Antananarivo.

# L'INNOVATION POUR UNE EFFICACITE D'UNE VITRINE GEOTOURISTIQUE A MADAGASCAR

par

RABEARY Frédéric Anaclet<sup>(1)</sup>

(1) Enseignant-Chercheur, Mention Science du Tourisme, Faculté des Lettres et des Sciences Humaines (FLSH),  
Université d'Antananarivo, Madagascar

## RESUME

Madagascar est caractérisé par la diversité de ses données naturelles, de ses éléments humains et de ses atouts culturels qui constituent les potentialités touristiques. Le pays détient une filière touristique : le *Géotourisme*. Il offre une opportunité de promouvoir un développement touristique durable.

Cet article se penche sur les questions qui touchent et influent sur la mise en place d'une vitrine Géotouristique. Il s'appuie sur un bilan de la littérature et sur l'exploitation des données touristiques qui s'accompagnent des profils relatifs sur l'identité, le patrimoine et l'image touristique du pays. Il s'en différencie, par la place qu'il accorde à la nature de l'innovation sous ses multiples formes : de l'innovation économique et technologique à l'innovation non-technologique et sociale. L'objectif est d'identifier l'existence des représentations stéréotypées de l'innovation : compétitivité, richesse et emploi ; et d'examiner cet objet mobilisé par et pour la vitrine Géotouristique.

La méthodologie d'approche utilisée est la démarche logico-déductive basée sur une approche globale de la réalité perçue. Une utilisation de la théorie du cycle de vie du tourisme comme théorie d'ancrage avec un certain nombre d'outils élémentaire d'analyse économique servira à organiser la démarche de l'état de connaissance de manière objective. Le résultat dégagé dans la vérification des hypothèses est la mise en œuvre de l'innovation complètement liée à la bonne conception, la bonne conduite et l'efficacité d'une vitrine Géotouristique. Le degré d'objectivité de ce travail est la réussite de la vitrine Géotouristique qui servira de pilier au tourisme.

**Mots-clés** : Madagascar, développement, tourisme, innovation, géotourisme.

## **ABSTRACT**

Madagascar is characterized by the diversity of its natural data, its human elements and its cultural assets which weave tourism potential. The country has a tourist industry: Geotourism. It offers an opportunity to promote sustainable tourism development.

This writing examines the issues that affect and influence a Geotourism showcase. It is based on a review of the literature and on the use of tourist data, which is accompanied by relative profiles on the country's identity, heritage and tourist image. It differs from it, by the place it gives to the nature of innovation in its many forms: from economic and technological innovation to non-technological and social innovation. The objective is to identify the existence of stereotypical representations of innovation: competitiveness, wealth and employment; and to examine this object mobilized by and for the Geotourism showcase.

The approach methodology used is the logical-deductive approach based on a global approach to perceived reality. Using development theory as an anchor theory with a number of basic economic analysis tools will serve to organize the state of knowledge process objectively. The result of the verification of the hypotheses is the implementation of innovation completely linked to the good design, the good conduct and the efficiency of a geotourism showcase. The degree of objectivity of this work is the success of the Geotourism showcase which will serve as a pillar for tourism.

**Keywords:** Madagascar, development, tourism, innovation, geotourism.

## **FINTINA**

Miavaka Madagasikara amin'ny fahamaroan'ny endrika natoraly hananany, ny fananana sehatry ny tamban-zotran'ny maha-olobelona sy ny ara-koltoraly. Manana zana-tsehatra ara-pizahantany matanjaka izy dia ny "Géotourisme" izany. Izy ity dia hafaka mitondra fampandrosoana ara-pizahantany maharitra.

Ity asa ity dia mitodika amin'ny fanontaniana maro mifandraika sy mitodika amin'ny famelomana fampiratiana ny fizahantany amin'ny alalan'ny Géotourisme. Miankina betsaka amin'ny literatiora misy sy ny vetim-pikarohana natao teo amin'ny sehatry ny fizahantany ity asa ity, ary koa amin'ny fananan'ny firenena ny tantarany, ny harenany ary ny seho ivelany ara-pizahantany. Ny manavaka ity asa ity dia ny fiomboham-panatsarana hateran'izany amin'ny lafiny rehetra: ara-ekonomika na ara-tsosialy. Ny tanjon'ity fikarohana ity mantsy dia ny hamantraka ny fomba rehetra hanatanterahana izany fiomboham-panatsarana izany toy ny sehatry ny fifaninanana, ny harena sy ny asa. Ary koa mba hampirindrana izany amin'ny fampiratiana amin'ny lafiny géotourisme.

Ny fanatanterahana izany dia amin'ny fomba fisarihan-kevitra miankina amin'ny zava-misy eto an-toerana. Ao ny fampiasana ny fomba fandinihana ara-teorika ho fanamafisana ny tsirin-kevitra ary koa ny fomba ara-tsiansa miankina amin'ny lafiny ekonomika. Ny valin'ny tsindrin-kevitra rehetra dia hivantana sy hitodika any amin'io fampiratiana io, saingy hanamafy ny filana ny fiombohampanatsarana mahomby sy marim-pototra. Ny fanamafisana izany dia avy amin'ny fampiasana ny fiomboha-panatsarana ho fitaovana hanehoana ny fampiratiana miakinan amin'ny Géotourisme ho fampandrosoana maharitra ny fizahantany.

**Teny fahatra :** Madagasikara, fampandrosoana, fizahantany, fiombohampanatsarana, geotourisme.

## INTRODUCTION

Le monde actuel se caractérise par l'omniprésence de divers échelons régionaux qui mettent en exergue des mesures locales, nationales et internationales pour développer toutes les formes du tourisme d'une manière durable. La littérature internationale souligne qu'à un niveau global on passerait d'un tourisme de masse, standardisé, à des formes de tourisme alternatives, marquées par l'orientation de la demande vers une consommation plus «authentique»<sup>1</sup> : tourisme de niche, écotourisme, tourisme patrimonial, géotourisme...etc

A Madagascar, le tourisme est un domaine étendu qui intègre, dans un effort commun, les trois axes de développement : social, économique et environnemental. Ce qui veut dire que le tourisme a des implications dans le processus de croissance économique perçue en tant qu'objectifs essentiels poursuivis au niveau de l'économie nationale.

Cependant, la fragmentation du tourisme et la complexité de ses relations liées à la nature composite de ses produits, placent l'accès à l'information au centre de son organisation. L'acquisition d'informations est fondamentale car elle permet de réduire l'incertitude liée aux aléas économique et, peut être une assurance et une garantie de la réalisation des objectifs et des anticipations. C'est pour cette raison qu'il est important de favoriser une innovation de l'information pour coordonner les offres et les demandes touristiques par une mise en route d'une vitrine Géotouristique. D'où la grande question suivante : **Comment dynamiser et piloter une dynamique touristique par une vitrine Géotouristique ?**

La présente étude portera sur les méthodologies utilisées pour la mesure de l'impact des évènements à vocation touristique susceptible d'attirer une

---

<sup>1</sup> MINVIELLE (2010) : «*Le tourisme au Sahara : pratiques et responsabilités des acteurs*», Management & Avenir, pp. 187-203

fréquentation significative de visiteurs en séjour ou à la journée dans le pays, à savoir la vitrine Géotouristique. Dans cette étude, il s'agit d'une part de vérifier l'hypothèse selon laquelle la conduite d'une planification géotouristique locale affecterait la performance économique ; d'autre part, la coordination d'un changement stratégique de la dynamique touristique exigerait la mise en œuvre d'une vitrine géotouristique plus cohérente.

## **MATERIELS ET METHODES**

Une des contributions originales de ce travail est de présenter des outils méthodologiques qui se reposent sur la nature interactionniste des données et des acteurs régionaux au service du tourisme.

### **Le cadrage méthodologique adopté**

Le terme "innovation" désigne à la fois un processus : "innover" et son résultat : "ce qui est nouveau" . Ainsi, le concept d'innovation peut être interprété comme une action de modifier ce qui existe déjà ou bien comme la création et l'introduction de quelque chose de nouveau au sein de l'organisation : un produit, un concept, un service, un procédé...

Dans la littérature, le concept d'innovation a suscité la préoccupation de beaucoup de chercheurs appartenant à différentes disciplines. Le terme «innovation» est lié à l'application des méthodes, techniques, outils et tout type de ressource de façon systématique pour accélérer et rendre plus efficace le passage d'une idée à un produit vendable sur le marché. Cependant, les activités qui mènent à créer des produits innovants avec succès peuvent être très variables de par leur nature, ce qui ne peut pas permettre à un secteur de tout maîtriser ; ce qui rend donc l'innovation incertaine et risquée.

S'appuyant sur l'étude de l'innovation technologique réalisée par l'OCDE en 1991, Garcia et Calantone (2002) proposent une définition qui permet de comprendre d'une manière générale le concept d'innovation : « *L'innovation est un processus itératif initié par la perception d'une nouvelle opportunité de marché ou de service pour une innovation technologique conduisant à des activités de développement, de production et de marketing et visant le succès commercial de l'invention* ». D'où, quelque soit son type ou sa nature, l'innovation est un processus de création de valeur basé sur la nouveauté, valeur pouvant prendre différentes formes en fonction des attentes : nouvelle fonction, nouvelle image, nouveau savoir, nouveau positionnement stratégique, etc.

L'innovation se matérialise ici afin d'organiser, exécuter et coordonner toutes les activités qui conduisent à la réalisation et à la mise à disposition d'un "système

d'innovation" par une mise en place d'un système doté de ressources humaines, techniques et d'informations :

- C'est un système à dominante organisationnelle, mis en œuvre (en particulier) pour réaliser la vitrine Géotouristique.

- C'est un ensemble d'équipes, de méthodes, de processus et de moyens organisé par un projet (d'une durée limitée dans le temps durant laquelle on conçoit le produit de «vitrine Géotouristique») pour répondre au besoin de conception, évolution et vérification du développement du secteur tourisme..

Ainsi, l'innovation est un changement, dans le but d'améliorer une situation. Cette amélioration peut toucher un produit, un processus, et peut également permettre d'atteindre de nouveaux objectifs ou objets qui n'auraient pu être abordés sans un changement de la situation. Considérée comme une action, l'innovation s'identifie ici à une commercialisation. L'innovation dans ce cas, renvoie à l'adoption d'une nouvelle méthode de commercialisation pouvant se traduire par des changements significatifs dans la conception, le conditionnement, le placement, la promotion ou la tarification d'un produit (Manuel d'Oslo, 2005). L'objectif visé par les entreprises en adoptant une innovation commerciale est de mieux satisfaire les besoins des consommateurs, d'ouvrir de nouveaux marchés ou de positionner d'une manière nouvelle leurs produits sur le marché afin d'augmenter leur chiffre d'affaires. Cette forme d'innovation est fortement liée au produit puisque les nouvelles méthodes de commercialisation et les études de marchés sont des facteurs propices à la réussite du développement ou du lancement de nouveaux produits.

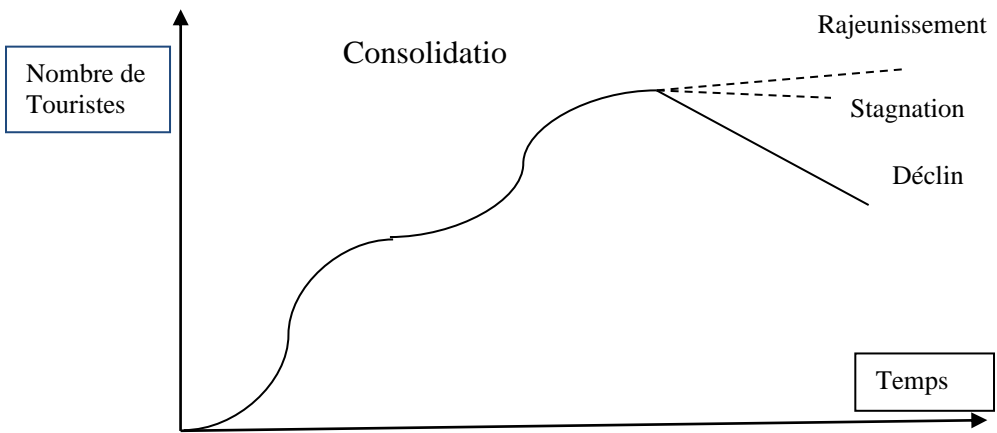
### **Le cadrage théorique retenu : «*La théorie de cycle de vie du Tourisme*»**

Selon l'Organisation Mondiale du Tourisme (OMT), le tourisme désigne les activités des personnes appelées visiteurs<sup>2</sup>. Un visiteur est une personne qui fait un voyage vers une destination principale située en dehors de son environnement habituel, s'éloigne pendant plus de 24 heures et pour une durée inférieure à un an pour tout motif principal que ce soit, notamment à des fins de vacances, de loisirs et d'activités récréatives, d'affaires, de santé, d'éducation ou à d'autres fins. Pour donner une définition plus complète, on pourrait dire que le tourisme est une activité tertiaire caractérisée par des éléments matériels et immatériels. Les éléments matériels sont notamment les systèmes de transport : aérien, ferroviaire, routier et maritime ; les services hôteliers : hébergement, alimentation et boisson ; les circuits et les souvenirs, ainsi que les services connexes : les services bancaires, les services d'assurance et les services de sûreté et de sécurité. Les éléments immatériels incluent le repos et la détente, la culture, l'évasion, l'aventure et la nouveauté.

---

<sup>2</sup> L'expression «visiteurs» désignent les touristes.

Quelqu'en soit la génération ou l'ancrage théorique, de nombreux auteurs s'accordent à dire que les activités humaines sont soumises à des cycles de vaste amplitude : une phase initiale correspondant à la naissance et à l'essor de l'activité, une phase de pleine croissance avec un développement soutenu, enfin, une phase de maturité marquée par le ralentissement, la stagnation, voire le déclin de l'activité. Les publications qui formalisent cette idée en modèle théorique sont nombreuses, mais notre seconde approche concerne ici le «Cycle de vie du tourisme». R. W. Butler<sup>3</sup> a élaboré en 1980 un modèle de cycle de vie de l'activité touristique, inspiré de la célèbre analogie biologique introduite par l'américain Vernon, pour démontrer que les produits se comportent comme des êtres vivants, qu'ils ont un cycle de vie en quatre phases : naissance, croissance, maturité et déclin.



Source : R.W. Butler, 1980/ Produit par nos soins

**Figure 1** : La théorie de cycle de vie de Butler

Le Modèle de Butler stipule cependant qu'un lieu touristique, après une phase de démarrage, d'«invention» se développait, puis stagnait avant de décliner ou de redémarrer, selon les mesures prises localement, face à la concurrence ou à la simple situation locale jugée sur place dégradée. Son modèle permet d'analyser les étapes successives de la vie des produits ou des industries de leur naissance à leur déclin. L'auteur a appliqué le concept aux zones touristiques et a distingué cinq phases de développement :

a) Une phase *de lancement*, au cours de laquelle sont prises en compte les possibilités de développement de l'industrie et pendant laquelle la croissance de l'activité est limitée.

<sup>3</sup> BUTLER R.W. (1980) : «The concept of a tourist area cycle of evolution: implications for management of resources», In Canadian geographer, vol. 24, n°1, pp.5-12

b) une phase *de développement* : période au cours de laquelle la demande est soutenue, et la fréquentation augmente parallèlement à l'offre (hébergement, service, ...).

c) Une phase *de consolidation* des acquis, durant laquelle l'industrie entra dans son stade de maturité, caractérisé par un ralentissement de plus en plus évident de la croissance.

d) Une phase *de vieillissement et de déclin*, se traduisant par une baisse du nombre des visiteurs et du chiffres d'affaires des structures d'hébergement. C'est une désaffection de plus en plus visible de la destination : les touristes sont attirés par d'autres produits et d'autres destinations.

e) Une phase *de redémarrage* ou *de rajeunissement* de l'industrie.

A ces effets, nous nous placerons dans la perspective de la théorie de cycle de vie de Butler qui privilégie une approche «*opérationnelle*» de la systémique<sup>4</sup> pour le secteur tourisme. Cette approche favorise :

1- L'analyse du système, c'est-à-dire, la définition des limites du système à modéliser, l'identification des éléments importants et leurs interactions, puis les liaisons formant un tout organisé. Il s'agit ensuite de classer, hiérarchiser, et identifier les grands processus, flux, états, etc.

2- La modélisation du système, c'est-à-dire, la construction d'un modèle à partir des données de l'analyse. Il s'agit d'un schéma complet des relations causales entre les éléments des différents sous-systèmes, qui décrit la nature des liaisons et des interactions

3- La simulation du système, c'est-à-dire : l'étude du comportement du système dans le temps en faisant varier simultanément des groupes de variables (simulation de la réalité). Il s'agit d'une phase nécessitant le recours à des moyens informatiques (calculs, sortie graphique, etc.)

Mais avant tout, pour pouvoir traiter notre thème de recherche, il semble impératif d'adopter une théorie d'ancrage basé sur la théorie de cycle de vie du tourisme de Butler, en sa correspondance avec ce travail, qui consiste à analyser chacun des acteurs œuvrant dans le tourisme, et qui représente le système entier. Il montre le fonctionnement général et la structuration d'un système tel que le tourisme. Ce système ne peut exister sans chacun des secteurs qui lui sont liés comme le transport, l'hébergement, la restauration, les activités sportives, les parcs naturels, les parcs d'attraction, les réserves, la biodiversité, le paysage, l'accueil des

---

<sup>4</sup> VERNON, R. (1966): "International investment and international trade in the product cycle." In Quarterly Journal of Economics, vol. 80. Cambridge, Massachusetts, Harvard University.

communautés, les guides, les tours opérateurs, les agences de voyage, l'environnement, les sites à visiter.

## **Etats de connaissance sur les conditions matérielles du Géotourisme**

Le Géotourisme est un terme inventé par Jonathan B. en 1997 et publié par la «*Travel Industry Association of America*» en 2002. Il précise que : «*C'est un tourisme qui soutient et rehausse le caractère géographique d'un lieu, son environnement, sa culture, son esthétique, son patrimoine ainsi que le bien-être de ses résidents, c'est-à-dire : A la contribution de générer des retombées économiques pour la communauté, à économiser les ressources et au respect de la culture locale et des traditions.*»

Le Géotourisme est une forme de tourisme qui s'oriente vers des pratiques intégrant la responsabilité écologique, la solidarité sociale et l'efficacité économique, c'est-à-dire : un concept qui englobe les principes de développement durable, dans la promotion de la conservation de la nature et de la protection des caractéristiques locales de la destination ainsi que les bénéfices qu'il peut apporter aux visiteurs comme aux résidents, donc : à la contribution de générer des retombées économiques pour la communauté, à économiser les ressources et au respect de la culture locale et des traditions.

Le concept de Géotourisme est apparu dans la littérature depuis les années 1990. Plusieurs définitions ont été proposées depuis, mettant parfois en avant le but de protection du patrimoine que ce type de tourisme doit favoriser et, d'autres fois, l'objectif de valorisation :

- REYNARD (2006 : 69) précise que «*le Géotourisme est un ensemble de pratiques, d'infrastructures et de produits visant à promouvoir les sciences de la Terre par le tourisme; et qu'il constitue une forme d'écotourisme mettant au centre de ses activités la valorisation du patrimoine géologique et géomorphologique d'une région.*»
- HOSE (1996 : 211) le définit comme : «*La provision d'interprétatif et installations du service permettre aux touristes d'acquérir la connaissance et comprendre de la géologie et géomorphologie d'un site (inclure sa contribution au développement des sciences de Monde) au-delà le niveau d'appréciation esthétique simple.*»
- PRALONG (2006 : 30) le complète : «*A cheval entre l'écotourisme et le tourisme culturel, le Géotourisme vise une clientèle particulière. La provision d'installations et des services encouragent la valeur et les avantages sociaux de la géologie ; la place de la géomorphologie et de ses matières assurent leur conservation, pour l'usage des étudiants, des touristes et les autres visiteurs*

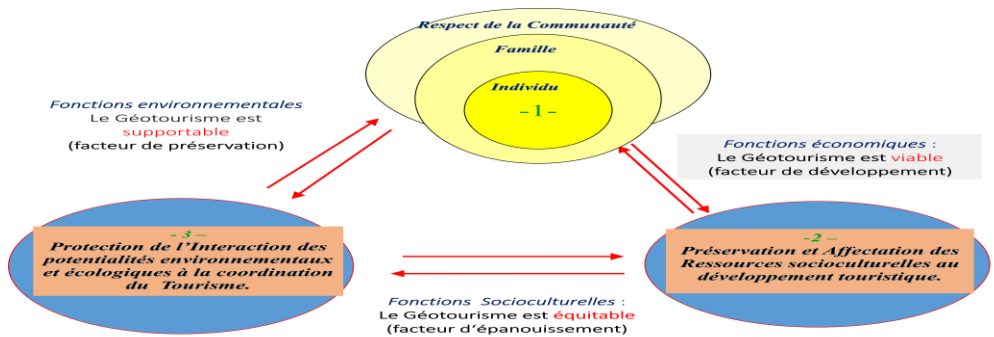
*informels*». Mais son travail se concentre surtout sur la définition des principes de vulgarisation de la géologie, et plus particulièrement de la géomorphologie, dans une optique de développement durable et de protection des sites géologiques.

- ORIGET DU CLUZEAU (1998 : 3) suggère que *«le géotourisme est une composante du tourisme culturel, dont la motivation principale est l'élargissement des horizons (intellectuels), la recherche de connaissances et d'émotions au travers de la découverte d'un patrimoine et de son territoire.»*
- CAYLA (2009 : 17) définit que *«Le géotourisme est une niche touristique qui a pour objectif de promouvoir auprès du plus large public le patrimoine géologique, au travers de pratiques ludiques, culturelles ou sportives s'inscrivant dans des démarches à la croisée de l'écotourisme et du tourisme culturel. Il s'appuie sur une ressource territoriale clairement identifiée, reconnue par les géoscientifiques et dont la protection a été assurée préalablement à sa mise en tourisme. Il mobilise un large réseau d'acteurs qui interviennent dans les différentes étapes du processus de valorisation : géoscientifiques et médiateurs, acteurs du tourisme et bien sûr, acteurs des territoires dont la société civile à part entière. Il génère des pratiques, des outils et des infrastructures qui participent au développement durable des territoires concernés ».*
- BASSET T. (2006 : 1) établit, pour sa part, que *« le géotourisme permet de développer une nouvelle forme de vulgarisation scientifique, plus didactique, ludique et conviviale qu'auparavant. Le géotourisme participe aussi à la mise en valeur des sites d'intérêts géologiques et géomorphologiques d'une région ».*
- GRAY (2004 : 83), cette forme de tourisme est *un marché en expansion*, qu'elle soit liée ou non à l'écotourisme, en raison de l'attraction et de l'intérêt croissant des populations urbaines pour les paysages ruraux, une telle activité a un (réel) potentiel économique

Cependant, des auteurs comme FREY *et al.* (2006 : 97) posent aussi comme condition du Géotourisme, sur la présence d'une médiation scientifique puisqu'il s'agit pour les touristes d'acquérir des connaissances et de comprendre la géomorphologie d'un site, dépassant une première valeur esthétique : *« The main tasks of geotourism are the transfert and communication of geoscientific knowledge and ideas to the general public ».* Mais largement investi par les sciences sociales et les praticiens, mais également par les géosciences, le concept est tiraillé entre une prise en compte du fonctionnement écologique des sites (Gallet, 2010) jusqu'au marketing territorial *«dur»* (Errami *et al.*, 2015), dans la lignée de ce qui peut être observé pour le patrimoine culturel (Silberberg, 1995 ; Zbucheá, 2014). D'où, un

consensus semble émerger considérant le Géotourisme comme une branche du tourisme durable voire de l'écotourisme (Duval et Gauchon, 2010 ; Sarrasin et Dion, 2014), et fondé sur la visite interprétée des géosites (Dowling et Newsome, 2006), et aussi des usages récréatifs et ludo-sportifs (Cayla *et al.*, 2010 ; Cayla, 2013).

S'interroger sur le Géotourisme nécessite de prendre à la fois en considération les types de lieux dans lesquels cette activité se développe, mais également des aménagements réalisés pour satisfaire une logique de découverte, qu'il s'agisse d'infrastructures lourdes ou plus légères, nécessaires à une diffusion à destination de différents publics touristiques. Le Géotourisme s'inscrit au cœur de logiques multiples : non seulement naturel, mais aussi une composante d'ordre culturel.<sup>5</sup> Croisant des enjeux de préservation, d'éducation à l'environnement, de création de lien social et identitaire, autant de facettes d'une volonté de développement touristique, ou : supportable à long terme sur le plan écologique, viable sur le plan économique et équitable sur le plan éthique et social pour les populations locales<sup>6</sup>.



Source : Auteur<sup>7</sup>, 2015

**Figure 2** : Le principe du Géotourisme

Il est pertinent de penser que cette forme de tourisme tend à être **durable**, c'est-à-dire supportable à long terme sur le plan écologique, **viable** sur le plan économique et **équitable** sur le plan éthique et social pour les populations locales. Cependant, parmi les nombreuses définitions concernant le géotourisme, nous allons

<sup>5</sup> DUVAL M. et GAUCHON C. : «Tourisme, Géosciences et enjeux des territoires : Actualités du Géotourisme». Téoros, vol.29, 2010. pp. 11-13

<sup>6</sup> PRALONG J. P., 2006 : «Géotourisme et utilisation de sites naturels d'intérêt pour les sciences de la Terre : dans les régions de Crans-Montana-Sierre (Valais, CH) et de Chamonix-Mont-Blanc (Haute-Savoie, F)». Institut de Géographie, Université de Lausanne, pp. 30-31

<sup>7</sup> RABEARY F. 2014 : «Promotion du Géotourisme pour un Développement Touristique Durable à Madagascar», thèse de Doctorat pour l'obtention du Grade de Docteur en Sciences Agronomiques, délivré par l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.

retenir celle avancée par l'American National Geographic Society: «*Geotourism is defined as tourism that sustains or enhances the geographical character of a place - its environment, culture, aesthetics, heritage, and the well-being of its residents* » (cité par Zorn *et al.*, 2009: 2).

Cette définition combine la dimension culturelle, esthétique et sociale et l'exigence d'un véritable contenu scientifique transmis au public. Et, si l'on s'en tient à cette définition, presque toutes les pratiques touristiques peuvent être qualifiées de «*vision de développement*» géotouristiques, dès lors qu'elles sont proposées et perçues par les acteurs comme des moyens de «*valoriser la personnalité géographique d'un lieu*».

## RESULTATS

Le potentiel touristique de Madagascar quoique impressionnant n'a pas encore été traduit en une activité touristique florissante en raison de l'insuffisance des actions de promotion de la destination. En effet, le pays regorge d'atouts multiples : environ 5 000 Km de littoral avec des plages de sables fins, de criques et de lagunes permettant entre autres la pêche sportive et les sports nautiques ; et, traversée par le Tropique du Capricorne et disposant d'un plateau<sup>8</sup> continental égal à 20% des zones terrestres. Des petites îles malgaches gravitent autour de la Grande Ile. Les deux principales sont habitées et à vocation touristiques : Nosy Boraha appelée aussi Sainte-Marie (200 km<sup>2</sup>) et Nosy-Be (320 km<sup>2</sup>).

Madagascar est l'un des pays qui possède le plus de potentialités touristiques au monde : des sites historiques, des sites classés patrimoine mondial. Il bénéficie de la diversité biologique des forêts, des mers et des côtes, qui est plus importante que celle de n'importe quelle île de l'Océan Indien ; d'un peuple très hospitalier, une richesse culinaire inégalée dans l'Océan Indien du fait du mixage des cultures et des populations, et un dispositif hôtelier offrant une capacité d'accueil adéquate (plus de 10 000 chambres) avec des hôtels de toute classe, confort, qualité et prix. L'Ile est même considérée comme un sanctuaire de la nature caractérisée par un haut degré d'endémisme en espèces végétales et animales. (80% pour la faune et 90% pour la flore). Ce patrimoine a une valeur exceptionnelle aussi bien pour la Communauté scientifique que pour le développement du Pays.

A cet effet, l'intégration de ces critères, de ces situations économiques, de l'espace de vie qu'ils représentent et de sa géographie, est la base des variables principales de la démarche pour souligner : la dynamique économique par rapport à la fréquentation touristique. Cette approche se fera d'une part, par le cycle du produit

---

<sup>8</sup> Dr. Elizabeth Crompton, République de Madagascar : Etude du secteur Tourisme (Washington, 2003). p. 20

touristique et d'autre part, par une adéquation de mise en route d'une vitrine Géotouristique.

### **Analyse discursive de l'application du cycle du produit touristique**

On se propose d'évaluer ici les implications que le tourisme peut avoir sur le développement à travers le cycle de vie du tourisme. Elle consiste à réaliser un focus sur les relations directes et indirectes entre les variables socio-économiques, et sur leur influence ou dépendance vis-à-vis du développement touristique. Cette analyse permet d'identifier les opportunités et les contraintes qui pèsent sur le développement du tourisme, dont la raison première de voyage des touristes est le dépaysement du lieu habituel où ils vivent.<sup>9</sup> (Tableau 1)

---

<sup>9</sup> RABEARY F. 2010 : *«Enjeux et Dynamisme du Tourisme Durable par les richesses Forestières et Ecosystémiques à Madagascar»*, Mémoire de Fin d'études pour l'obtention du Diplôme d'Etudes Approfondies (D.E.A.) en Sciences Agronomiques, délivré par l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA-Forêt), Université d'Antananarivo

**Tableau 1 : Evolution du nombre de visiteurs à l'Aéroport d'Ivato de 1991 à 2019  
(mois de janvier à juin)**

Année	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Total 1 (Nombre)
1991	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>
1992	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>
1993	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>
1994	3 767	3 040	4 014	3 586	4 974	3 970	<b>23 351</b>
1995	5 235	4 832	5 603	5 847	5 252	4 321	<b>31 090</b>
1996	6 190	5 667	6 558	6 838	6 297	5 410	<b>36 960</b>
1997	5 202	5 169	6 790	7 325	7 535	7 458	<b>39 479</b>
1998	7 795	7 105	8 449	9 007	9 230	8 089	<b>49 675</b>
1999	8 377	7 673	10 620	9 497	10 285	10 073	<b>56 525</b>
2000	10 632	7 638	10 973	11 841	12 459	12 855	<b>66 398</b>
2001	11 209	9 011	11 027	13 107	13 218	15 762	<b>73 334</b>
2002	7 174	2 942	2 743	2 792	1 761	3 061	<b>20 473</b>
2003	11 861	9 919	12 763	9 364	13 179	12 139	<b>69 225</b>
2004	12 011	10 019	12 981	17 062	21 172	19 473	<b>92 718</b>
2005	16 590	13 751	18 734	22 005	22 548	25 418	<b>119 046</b>
2006	19 908	16 089	22 294	24 667	25 765	23 733	<b>132 456</b>
2007	20 138	16 639	23 834	25 752	26 354	28 857	<b>141 574</b>
2008	23 594	18 593	25 975	27 850	28 775	31 698	<b>156 485</b>
2009	18 785	9 526	11 172	11 670	12 467	13 624	<b>77 244</b>
2010	17 910	11 087	13 645	13 925	14 387	15 849	<b>86 803</b>
2011	18 770	13 380	16 119	16 696	17 513	18 214	<b>100 692</b>
2012	19 804	14 940	16 935	20 018	21 318	20 932	<b>113 947</b>
2013	19 847	12 989	12 408	13 029	15 162	15 326	<b>88 761</b>
2014	18 196	15 636	20 604	16 746	18 054	15 277	<b>104 513</b>
2015	19 193	17 253	19 789	19 501	19 718	17 284	<b>112 738</b>
2016	26 629	14 974	19 324	15 002	18 066	16 111	<b>110 106</b>
2017	28 206	19 228	19 024	17 053	22 778	17 228	<b>123 517</b>
2018	18 989	30 820	19 861	21 576	19 229	17 309	<b>127 784</b>
2019	43 100	33 248	33 252	26 763	23 347	22 006	<b>181 716</b>

*n. d.* : Non define

Source : Ministère en Charge du Tourisme

**Tableau 2 : Evolution du nombre de visiteurs à l'Aéroport d'Ivato de 1991 à 2019**  
(mois de juillet à décembre)

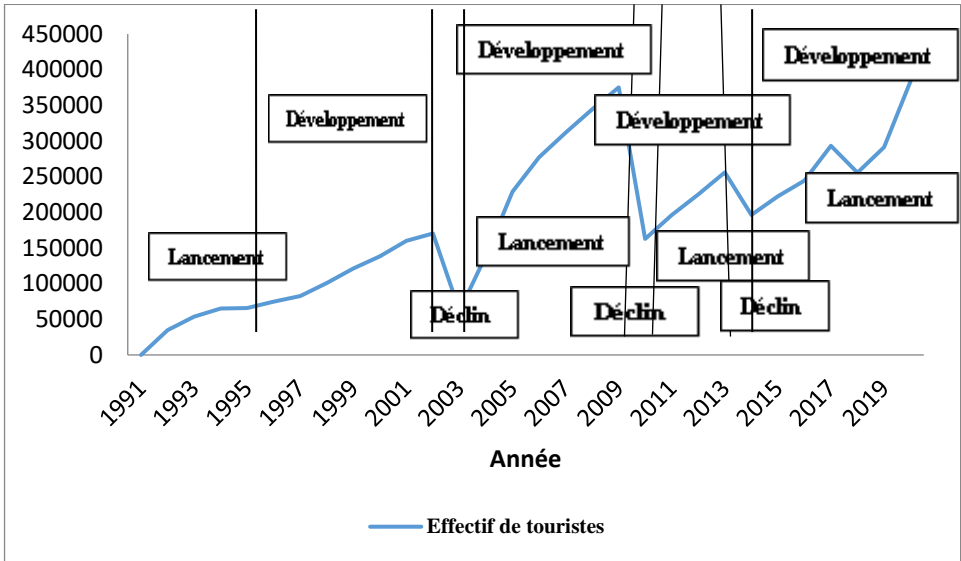
Année	Total 1 (Nombre)	Juil.	Août	Sept	Oct.	Nov.	Dec.	Total 2 (Nombre)
1991	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<b>34 891</b>
1992	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<b>53 656</b>
1993	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<i>n. d.</i>	<b>65 102</b>
1994	<b>23 351</b>	5 692	5 780	5 347	7 452	7 837	9 380	<b>65 839</b>
1995	<b>31 090</b>	5 749	6 936	6 509	6 856	7 919	9 563	<b>74 619</b>
1996	<b>36 960</b>	6 673	6 901	5 830	7 503	8 770	10 043	<b>82 681</b>
1997	<b>39 479</b>	11 031	12 860	8 069	9 462	10 410	9 720	<b>100 762</b>
1998	<b>49 675</b>	12 076	12 960	11 742	12 255	12 302	10 096	<b>121 207</b>
1999	<b>56 525</b>	15 504	13 679	11 876	15 410	13 838	11 421	<b>138 253</b>
2000	<b>66 398</b>	16 942	17 321	15 417	15 514	14 319	14 160	<b>160 071</b>
2001	<b>73 334</b>	18 034	17 166	16 008	16 121	14 307	15 238	<b>170 208</b>
2002	<b>20 473</b>	5 123	6 636	6 392	7 505	7 173	8 372	<b>61 674</b>
2003	<b>69 225</b>	15 053	13 953	11 707	10 124	10 036	9 132	<b>139 230</b>
2004	<b>92 718</b>	26 970	25 109	22 361	21 568	20 489	19 569	<b>228 784</b>
2005	<b>119 046</b>	28 943	27 215	27 280	26 097	24 792	23 678	<b>277 052</b>
2006	<b>132 456</b>	31 956	30 628	32 165	32 364	28 511	23 650	<b>311 730</b>
2007	<b>141 574</b>	34 104	36 714	32 213	34 231	32 612	32 900	<b>344 348</b>
2008	<b>156 485</b>	37 850	37 300	35 845	37 390	35 315	34 825	<b>375 010</b>
2009	<b>77 244</b>	14 351	14 487	13 270	15 295	13 740	14 300	<b>162 687</b>
2010	<b>86 803</b>	19 540	18 650	17 307	18 295	17 257	18 200	<b>196 052</b>
2011	<b>100 692</b>	21 296	23 193	19 816	21 481	19 502	19 075	<b>225 055</b>
2012	<b>113 947</b>	23 210	28 843	22 689	25 222	22 039	19 992	<b>255 942</b>
2013	<b>88 761</b>	21 157	16 538	16 744	20 512	16 830	15 633	<b>196 375</b>
2014	<b>104 513</b>	21 621	18 680	18 195	21 378	19 484	18 503	<b>222 374</b>
2015	<b>112 738</b>	23 815	20 490	18 629	21 939	22 204	24 506	<b>244 321</b>
2016	<b>110 106</b>	23 763	20 277	19 759	38 548	42 471	38 261	<b>293 185</b>
2017	<b>123 517</b>	27 551	23 688	22 050	20 850	18 034	19 770	<b>255 460</b>
2018	<b>127 784</b>	17 295	24 405	24 302	19 244	41 643	36 043	<b>291 299</b>
2019	<b>181 716</b>	29 582	27 303	28 861	30 712	45 085	40 458	<b>383 717</b>

*n. d.* : Non define

Source : Ministère en Charge du Tourisme

La théorie du cycle de vie du produit touristique développée par R.W. Butler et adaptée dans cet écrit de recherche donne une nouvelle grille d'analyse de l'évolution de l'activité du secteur sur la période 2009 à 2019. Les statistiques disponibles en matière de fréquentation touristique se révèlent effectivement en phase avec la chronologie du cycle de vie développée par Butler.

**Graphe 1** : Le Cycle de vie du tourisme de Madagascar de 1994 à 2019



Source : Annexe et confection de l'auteur

La "phase de lancement" du Tourisme se situe de «1991 à 1996». Elle est présentée comme un axe prioritaire de développement pour le pays. Comparativement à la période allant de la fin de l'Indépendance jusqu'au début des années 1990, Madagascar a connu une croissance soutenue de l'activité économique. Le cadre de définition et de mise en œuvre des politiques de développement a été profondément marqué par la transition entre les stratégies d'ajustement structurel (Programme d'Ajustement Structurels ou PAS), caractérisant les années 1980 à 1990, et dont la stratégie était décrite dans un Document cadre de politique économique (DCPE). Dans le cas de Madagascar, les politiques de libéralisation ont principalement touché le commerce extérieur et le secteur agricole. Dans le contexte de la fin des années 1980 où le régime Ratsiraka était en quête d'une nouvelle image, la problématique de l'environnement s'inscrit à l'époque dans un courant en vogue depuis que la grande majorité des organisations internationales a intégré cette préoccupation à leurs conditions de financement. Le positionnement environnemental de Madagascar devient rapidement une plate-forme pour le développement du tourisme (ONE, 1995). Le tourisme à Madagascar s'appuie ainsi sur la construction d'une image de marque à l'étranger, basée sur la richesse de la

culture et de la biodiversité.<sup>10</sup> Cette position se résumait dans «l'intermède» de gouvernance du feu Président Albert Zafy (1992-1996).

La période allant de «**1997 à 2001**» est marquée par le début de la "*phase de développement*" du secteur. On remarque une période de croissance soutenue du secteur : la fréquentation augmente de façon importante. La politique touristique se poursuit. La stratégie des responsables du tourisme est fondée sur une valorisation des aspects originaux de Madagascar par rapport au tourisme balnéaire des îles voisines (Réunion, Maurice). Pour eux, un tourisme de «découverte» aurait de forts potentiels à Madagascar et cette découverte serait essentiellement celle du milieu naturel. Dans cette même foulée, l'économie malgache a progressé à un rythme fort et soutenu sur la première période de la décennie, entre 1997 et 2001, la croissance a ainsi été de 4,5 % par an en moyenne, le taux d'inflation est passé de 14 % en 1999 à 8 % en 2001, les exportations ont été multipliées par deux et les réserves de devises ont sensiblement augmenté. A la veille de la crise politique de la fin 2001, la croissance avoisine les 7 % et permet au PIB par habitant de progresser sensiblement, après quatre décennies de baisse ininterrompue.

Le «**clash de 2002**» : La crise politique de 2002 qui a suivi les élections présidentielles de décembre 2001 a marqué une rupture dans la trajectoire de l'économie malgache en générale et du développement du secteur tourisme en particulier : Manifestations populaires, affrontements armés sporadiques, et de nombreuses infrastructures détruites (routes, ponts, etc.) ont littéralement paralysé le pays, provoquant l'effondrement du PIB en volume et du PIB par tête (-12,7 et -15 % respectivement) et l'envolée des prix (le taux d'inflation était de 25 % en août 2002). Dans le même temps, les flux nets d'Investissement Direct Etranger ont fortement baissé, atteignant en 2002 un niveau inférieur à 10 % de celui enregistré une année auparavant. Les visiteurs ont diminué terriblement pour arriver au presque même nombre de visiteurs que dix ans auparavant (en 1992, le nombre de touristes était de 53.656) : c'est la «*phase de déclin*» du secteur

De «**2003 à 2008**» : On remarque en même temps une "*phase de lancement*" rapide du Tourisme suivie par une "*phase de développement*" du secteur. Le pays s'est vite relevé de la crise de 2003. La croissance est redevenue positive et forte et l'inflation, contenue. Cette reprise s'est accompagnée d'une série de réformes visant à réhabiliter les routes, désenclaver certaines régions isolées et améliorer les secteurs de l'éducation et de la santé. Cependant, en 2004-2005, plusieurs événements exogènes défavorables sont venus infléchir la trajectoire ascendante de l'économie malgache : l'augmentation significative des prix du pétrole sur le marché international, la mauvaise pluviométrie et son incidence négative sur la production

---

<sup>10</sup> SARRASIN B. 2002 : «Environnement, développement et tourisme à Madagascar : quelques enjeux politiques», Université de Québec, Montréal.

d'électricité, la chute du cours de la vanille et le démantèlement des Accords multifibres (AMF). Les difficultés financières et structurelles de la JIRAMA ont également pesé sur la croissance. Celle-ci est néanmoins restée à un niveau satisfaisant (+4,6 %) grâce aux performances enregistrées dans les secteurs de la construction, du tourisme : la performance de la filière du tourisme ainsi que les perspectives de croissance se montraient prometteuses. En dépit de cette embellie, en 2004, le revenu par tête en termes réels demeurait inférieur à celui qui prévalait en fin 2001, et la proportion de pauvres dans la population est supérieure à celle observée avant la crise. Les arrivées de visiteurs ont cependant augmenté d'environ 11% par an, et pour l'année 2008, on a enregistré 375.010 touristes, soit une hausse de 8,9% par rapport à 2007.

La crise de «**2009**» : Depuis le début de cette année, Madagascar traversait deux types de crises: d'une part, la crise financière mondiale qui affectait la situation macroéconomique voire sociale du pays. D'autre part, la crise sociopolitique qui amplifiait ces complications dans tous les domaines, et qui avaient engendré une crise socio-économique du pays. D'après les résultats économiques et financiers pour l'année 2009, deux agrégats sont remarquablement en baisse, il s'agit des taux de croissance et des investissements publics. Le premier agrégat est de l'ordre de 0.6% contre 7.9% prévu initialement. Cette baisse résulte de la crise économique mondiale et de la conjoncture politique qui continuent de secouer le pays. En effet, avec l'arrêt des financements extérieurs, plusieurs projets ont été mis en suspens ou en veilleuse. L'abaissement du second agrégat est dû aux grèves et la réduction de l'aide étrangère. Ce dernier est visible à cause de l'amputation de 571,9 milliards Ariary d'aide budgétaire, c'est-à-dire de 29,6% du montant prévu. Cette diminution a fait baisser l'investissement total à 3.329,7 milliards Ariary. Le taux de croissance du pays en 2009 était de - 4,0 % alors qu'il était 7,1 % en 2008<sup>11</sup>. L'industrie du tourisme à Madagascar subit de plein fouet les revers de la crise politique dans laquelle le pays s'est enlégé : Un taux d'annulation des voyageurs, proche de 100% pour le premier trimestre 2009 et des mises en veilleuse de confirmation d'arrivées allant jusqu'en octobre 2009. Une baisse de 55,37% du nombre de touristes est enregistrée durant les neuf premiers mois de l'année 2009, ce qui est due certainement aux incertitudes engendrées par la crise sociopolitique. Le nombre total de visiteurs en 2009 de 162.687 avoisinait celui enregistré dix ans plutôt dans le pays : en 1999, 160.071 touristes étaient enregistrés, c'est ainsi une «*phase de déclin*» pour le secteur.

De «**2010 à 2012**» : La crise politique de 2009 à Madagascar a consisté en une série de manifestations, d'émeutes et de confrontations politiques qui secouent Madagascar de janvier 2009 à décembre 2013. Cependant, pendant cette période,

---

<sup>11</sup> Banque Centrale de Madagascar (BCM), (2007) :«Rapport annuel», décembre 2007, p4.

Madagascar a connu une forte croissance démographique, de l'ordre de 2,9%, avec un revenu national qui stagne. D'où, le schéma d'analyse est sans contexte le même que ceux notés dans les 2003 à 2005 : une "*phase de lancement*" très rapide suivie par une "*phase de développement*" du secteur.

En «**2013**», le revenu par habitant est retombé à son niveau de 2001. Le grand facteur de blocage du pays demeure la situation d'instabilité au niveau des politiciens. Cela a eu un impact sur la venue des visiteurs à Madagascar. En effet, les arrivées touristiques durant l'année 2013 ont baissé de 22% par rapport à l'année 2012. Sur une année, la Grande île enregistre 56 000 touristes en moins par rapport à l'année précédente : c'est la «*phase de déclin*» marquée par une baisse du nombre de touristes dans le pays liés à des problèmes socioéconomiques.

De «**2014 à 2019**», l'économie malgache poursuit une phase de reprise, suite à la crise politique prolongée (2009-2013) qui a désorganisé l'économie. Le taux de croissance du PIB a atteint 3,1 % en 2015, contre 3,3 % en 2014, confirmant un scénario de reprise économique modeste, c'est une "*phase de lancement*" rapide du Tourisme. Ce secteur regroupe 9% du PIB, avec un objectif extrêmement ambitieux consistant à dépasser en cinq ans le nombre maximum d'arrivées de touristes jamais enregistrés (375 000 visiteurs en 2008). Il a atteint son but en 2019 avec 383.717 touristes. C'est la "*phase de développement*" du secteur. Cette dernière a été rendue possible grâce à une politique de promotion touristique.

La «*phase de consolidation*» qui montre que le produit touristique entre dans sa phase de maturité, ainsi que la «*phase de stagnation*» démontrant une croissance nulle des flux touristiques dans lequel le nombre des touristes est stable, ne sont pas encore arrivées dans le pays. Cependant, R.W. Butler affirme qu'une «*phase de renouvellement*» peut avoir lieu. Durant cette phase, les acteurs du tourisme adoptent de nouvelles politiques de promotion touristique. De ce fait, l'offre se diversifie et s'adapte inévitablement à la demande. Et en s'appuyant sur les «*zones de relance*» comme produit touristique et en valorisant l'apport «*des marchés de niche*» et le développement économique et social du pays en général. Implicitement, cela suppose l'élaboration d'un nouveau mécanisme pour que le nombre de touristes puissent augmenter continuellement et que les indicateurs montrent toujours des résultats à la hausse.

En résumé, comprendre le concept de cycle de vie du tourisme est important pour une planification et une gestion efficace des sites et lieux touristiques. En cherchant à fournir une justification empirique d'une démonstration causale théorique, cette recherche s'est attachée, dans le cas de Madagascar, à décrire et analyser, à l'aide du modèle du cycle de vie de Butler, le lien qui existe entre cet instrument d'analyse et son degré de relation pour le pays, et d'en déduire les enseignements et implications politiques qui en découlent.

L'application du modèle de Butler a permis d'analyser empiriquement sur plus de trois décennies (1991-2019), les différentes phases d'évolution du cycle, et de déterminer l'évolution du nombre de visiteurs. Les résultats révèlent, qu'en évaluant les «phases» de croissance ou de décroissance du secteur, dévoilent l'existence d'une relation symbiotique du cycle de vie du tourisme. Ces chocs structurels comme conjoncturels ont un impact majeur sur le tourisme et son épanouissement. En effet, ces crises condamnent le tourisme à une stagnation voire à une récession et décourage les investisseurs étrangers.

Ces périodes de 2014 à 2019 mises en perspective avec le concept de cycle de vie développé par R.W. Butler ont montré des résultats plus que favorables. Un nombre maximum d'arrivées de touristes est atteint dans le pays en 2008 de 375.010, c'était le meilleur chiffre en matière d'arrivée de touristes) ; ce chiffre a été dépassé, cependant en 2019 : 383.717.

Suite à des stratégies d'action de promotion de la destination, les touristes commencent ainsi à s'intéresser au pays. Cela peut avoir des conséquences (positives ou négatives) à multiples niveaux pour le pays, D'où, la présence d'une vitrine géotouristique devient incontournable. Notre première hypothèse portant sur la conduite d'*une planification géotouristique locale affecte la performance économique*» est ainsi ici "vérifiée".

### **Analyse relationnelle de l'adéquation de la vitrine Géotouristique**

Le développement du tourisme à Madagascar implique des investissements et une série de coûts qui déterminent des effets positifs sur les communautés et l'économie locales. L'analyse complète de l'impact du tourisme sur le développement national fait référence au moins à trois aspects : la qualité et le potentiel de la destination touristique, le type de croissance économique et l'impact économique et social sur le court, moyen et long terme.

Le concept de géotourisme englobe les principes de développement durable du Tourisme ; de la promotion de la conservation de la nature et de la protection des caractéristiques locales de la destination ainsi que les bénéfices qu'il peut apporter aux visiteurs comme aux résidents, comme précisé en amont de ce travail. De plus, ce sont des attributs qui peuvent convenir à l'innovation vers la mise en place et la dynamisation d'une vitrine géotouristique pour le pays, d'autant qu'il est fondé sur 13 principes fondateurs qui ont pour but de promouvoir un développement touristique durable<sup>12</sup>, à savoir intégrité des lieux, codes internationaux, marché ciblé, marché diversifié, satisfaction des touristes, participation de la communauté, avantages pour la communauté, conservation et valorisation des attraits de la

---

<sup>12</sup> Cf la charte composée des 13 principes du Center for Sustainable Destinations (CSD) de la National Geographic Society

destination, utilisation du territoire, conservation des ressources, planification, interprétation interactive, évaluation.

A Madagascar, le Géotourisme n'est pas très développé, cependant plusieurs activités existent : Plusieurs sentiers didactiques touristiques, des brochures et des visites guidées sont réalisés dans tout le pays en général, tels que la visite des parcs, de sites et de niches touristiques. La réalisation de ces produits a des impacts à vocation didactique géotouristique <sup>13</sup> et a développé des méthodes de vulgarisation d'approche: (i) le choix et l'analyse des attentes du secteur privé et public; (ii) la mise en place d'une transmission du savoir interactive, prenant en considération les connaissances préalables capable de les faire évoluer; (iii) la prise en considération de la complexité des différentes échelles spatio-temporelles caractérisant les potentialités touristiques et de leurs dynamiques.

La notion d'impact inclut ici l'analyse de la relation «touriste - ressource touristique - produit touristique», en partant d'un objectif de visite touristique, en passant par les paquets de services touristiques, et en aboutissant à des actions touristiques, destinés à mettre en valeur l'objectif d'un développement communicative touristique : une vitrine Géotouristique.

Cependant, la dimension économique sur laquelle nous nous polariserons ici fait référence à la notion essentiellement pécuniaire de prospérité, de création de richesses et de revenus pour le pays. L'**innovation** dans le champ de cette vitrine Géotouristique se caractérise par le soulignement de la présence de repère dont l'impact économique se focalisera à partir des multiples clés d'entrée :

- Un public : ensemble des visiteurs ou un type de public en particulier (exemple : retombées économiques générées par les visiteurs, la clientèle et les touristes...)

- Un mode de transport : voiture, train, avion (exemple : impact économique généré par la présence de lignes aériennes, des liaisons routières...)

- Un mode d'hébergement et de restauration : hôtels, restaurants, etc. (exemple : impact économique de l'hôtellerie et des restaurants...)

- Une manifestation : sportive, culturelle, etc. (exemple : impact économique d'un festival, d'une compétition sportive, d'une exposition...)

Cependant, cette question de l'innovation est frappée par la grande diversité des situations touristiques, tant au niveau du concept des manifestations que du contexte dans lesquels l'événement se déroule. Les critères à l'origine de cette diversité sont

---

<sup>13</sup> Enseignement sur la connaissance du tourisme au sein de la Licence L3 de la Mention Science du Tourisme de la Faculté des Lettres et Sciences Humaine de l'Université d'Antananarivo, Eléments constitutifs : «Concepts : Tourisme durable ; écotourisme/Géotourisme : typologie du tourisme».

nombreux et ont des incidences fortes sur la mise en route de la vitrine géotouristique, à savoir :

- Critères relatifs à la manifestation elle-même (nature et concept de l'évènement) :

- Le champ : évènements culturels, sportifs, récréatifs, culturels...
- Le type : activité support unique ou multiple (festival, concert, exposition, compétition, épreuve sportive...)
- La durée : courte (quelques jours) à très longue (plusieurs semaines), voire plusieurs mois (Exposition Universelle)
- Le niveau qualitatif : niveau de la manifestation ou de l'évènement (qualité...)
- Les modalités d'accès : manifestations gratuites, payantes, mixtes...

- Critères relatifs au mode d'organisation :

- La nature des organisateurs : Etat, collectivités, opérateurs touristiques...
- Le nombre d'organismes : unique, multiple.

- Critères relatifs à la dimension spatiale :

- Le nombre de sites : mono-site, multi-sites
- Le type de sites : clos, ouverts, mixtes
- Le nombre de territoires accueillant la manifestation : un seul, plusieurs
- Le type de territoires : rural, ville moyenne, grande ville

- Critères relatifs à la fréquentation :

- Le volume : nombre de visiteurs, de participants
- La structure : poids relatif des participants, des visiteurs...
- La provenance: poids relatif des visiteurs (locaux ou étrangers)

- Critères relatifs à la médiatisation :

- La couverture médiatique : limitée, importante, majeure...
- Le rayonnement médiatique : local, régional, national, mondial...

De façon générale, l'impact consécutif à cette vitrine (sa réalisation, son installation, sa tenue, son déroulement, ...) correspond à une évolution positive ou négative du niveau d'activité, de création de valeur ou de production de richesses pour le pays.



## **Identification des encadrés :**

1

- OS.1** : *Préserver l'identité et l'histoire* : Cette identité résulte de la diversité du peuplement et de son mode de vie fortement marqué par sa potentialité culturelle
- OO.1** : Respecter et dynamiser le patrimoine historique, la culture authentique, les traditions et les particularités de la communauté d'accueil
- R1.1**- Rendre plus accessibles aux visiteurs les produits de la Région.
- R1.2**-: Préservation des sites touristiques, témoins de l'histoire et de l'identité.
- OS.2** : *Mettre en valeur le patrimoine paysager* : La reconnaissance du paysage est marquée par le caractère géographique ainsi que par du patrimoine bâti identitaire, ressource du tourisme
- OO.2** : Intervenir de façon concertée sur toute les Régions pour assurer les responsabilités en matière de protection et de mise en valeur des paysages.
- R2.1**- Adoption et mise en œuvre à l'échelle locale, des mesures de protection et de mise en valeur des paysages.
- R2.2**-: Maximisation de la contribution du patrimoine bâti à la prospérité économique et social de la communauté
- OS.3** : *Promouvoir la Géoresponsabilité* : C'est le besoin de conserver l'intégrité des écosystèmes, des ressources naturelles et de la biodiversité en vue de préserver la qualité de vie des citoyens et l'attractivité de la région touristique
- OO.3** : Assurer un développement harmonieux de l'activité touristique et faire un meilleur usage des ressources touristiques
- R3.1** : Mise en œuvre des mesures visant à rendre la destination Géoresponsable.
- R3.2** : Identification des ressources dans le développement et l'exploitation des infrastructures et des services touristiques
- OS.4** : *Dynamiser un développement touristique endogène* : C'est la nécessité d'un développement contrôlé par les communautés dont les retombées seront locales.
- OO.4** : Viser une répartition équitable des bénéfices économiques et sociaux du tourisme, par la concertation des différents acteurs concernés
- R4.1**-: Facilitation de l'appropriation des attraits, des événements et des infrastructures touristiques par la communauté.
- R4.2**-: Détermination de la complémentarité des activités, des événements et des attraits misant sur la concertation des différents acteurs
- OS.5** : *Pérenniser l'activité Géotouristique* : C'est dans un but de tirer des bénéfices à long terme, sans dénaturer le produit et sans porter atteinte à ce qui le distingue
- OO.5** : Miser sur la satisfaction au plus haut niveau possible des visiteurs, tout en préconisant des modes de gestion et de planification
- R5.1** - Amélioration de l'accueil de la clientèle touristique en facilitant l'accès du pays
- R5.2**-: Amélioration de l'accroissement de la durée de séjour des visiteurs sur la mise en valeur de l'offre touristique

## DISCUSSIONS

Pour survivre et se développer dans un contexte économique de plus en plus incertain, il est indispensable d'anticiper dans la connaissance des besoins du marché. La réduction du cycle de vie des technologies et l'évolution rapide des marchés et de la concurrence donnent l'avantage aux entreprises qui maîtrisent et intègrent rapidement les flux d'informations à leur processus d'innovation. En effet, l'innovation est un processus complexe et incertain qui nécessite de posséder une vision globale de son environnement, de détecter les nouveaux produits de ses concurrents, d'identifier les meilleurs partenaires et de suivre les évolutions du marché.

Or, les impacts économiques ont également de multiples origines : les bénéfices liés au renforcement de l'attractivité suite à la médiatisation de l'évènement (stimulation de la fréquentation touristique, implantation de nouveaux habitants, de nouvelles entreprises...), les dépenses réalisées par les visiteurs de l'évènement à l'occasion de leur séjour, l'activité découlant de l'exploitation des équipements réalisés à l'occasion des évènements, etc. Cependant, ces impacts ont d'autant plus de chances de se produire que les évènements sont importants, originaux ou reconduits sur une période prolongée. Plus diffus, leur lien avec la manifestation est plus difficile à établir. Aussi, s'ils sont parfois évoqués dans les études économiques, ils sont rarement mesurés.

Au terme de notre analyse, découlent certaines stratégies à adopter afin d'améliorer la compétitivité de la destination «Madagascar» ou de remédier à la crise présente du tourisme Malgache. Ces stratégies sont formulées en guise de recommandations, en se basant fortement sur les problèmes ou blocages identifiés lors de l'étude, les analyses effectuées, puis toutes les potentialités existantes. Elles sont spécifiques, et en direction des autorités du pays, des responsables touristiques du pays puis des professionnels du secteur, c'est à dire le privé.

### **L'innovation par le développement de la créativité**

L'impact de l'innovation souligne l'ensemble des retombées direct et immédiatement associées à la présence de la vitrine, à savoir, principalement : les dépenses effectuées dans le tissu économique du pays pour l'organisation de la vitrine (achats de produits, de matériels, versements de salaires...) et les achats et consommations faits localement par les visiteurs venus pour y assister (dans les commerces, les hébergements, les restaurants...).

Etant la première étape du processus qui mène à l'efficacité de l'innovation, la créativité peut être considérée comme un incontournable pour l'innovation. Et, l'utilisation des techniques de créativité permettrait d'accroître la capacité d'innovation. Ces techniques sont utilisées à tous les niveaux hiérarchiques, plus

particulièrement au niveau des employés qui participent directement à la réalisation de l'innovation. Les techniques de créativité contribuent directement à la capacité de génération de solutions et d'idées nouvelles par les employés. Et, il existe plusieurs méthodes pour promouvoir la créativité des employés de manière directe : des techniques comme le brainstorming, ou la formation d'équipes autogérées de petite taille composées d'environ cinq personnes. L'avantage est que ces équipes sont plus autonomes et plus performantes. De plus, en renforçant la confiance et la communication entre les membres, ces équipes contribuent à l'amélioration du climat du travail, ce qui a pour effet de libérer la pensée créatrice des employés.

L'impact de l'innovation est ici une conséquence, une évolution plus ou moins marquée, générée par la présence de la vitrine Géotouristique. Et, les conséquences de la vitrine peuvent se manifester à de multiples niveaux : sur la satisfaction et le bien-être des populations (impacts sociaux), sur dynamisation des sites et des paysages, la faune et la flore (impacts environnementaux), sur la valorisation et le développement local des activités culturelles et géographique concernées par l'évènement (impacts culturels). Deux formes de «potentialités et de capacités nouvelles» peuvent ainsi se manifester :

(1) *en termes d'attractivité* : Du fait de la médiatisation de l'évènement, le pays est susceptible de bénéficier d'une amélioration de sa notoriété et de son image auprès des publics extérieurs.

(2) *en matière productive* : La présence de la vitrine Géotouristique peut contribuer à améliorer les capacités à générer localement de l'activité : (i) Par l'amélioration des compétences et savoir-faire des acteurs locaux qui bénéficient d'un effet d'expérience (acquise lors de l'organisation de l'évènement) permettant d'améliorer leur performance, de développer leur activité ; (ii) Par le développement d'activités secondaire ayant un lien direct avec la manifestation : création d'entreprises spécialisées (commerces, prestataires de services, entreprises de production, développement de formations...)

Or, la réalité statistique du secteur touristique est jusque là, mal cernée ; ce qui rend le secteur difficilement maîtrisable, biaisant ainsi les projections faites. Une transparence et grande visibilité doivent être présentés dans la gestion des fonds de promotion touristique. Il faudra faire intervenir des spécialistes afin d'éliminer au maximum les actions inutiles, et consacrer de façon efficiente les fonds disponibles aux actions bien étudiées et jugées importantes ou pertinentes.

Ainsi, les actions promotionnelles menées deviennent de plus en plus comme une habitude. C'est pour dire qu'elles sont pratiquement les mêmes chaque année, alors que les réalités changent. Des prospections ou études doivent désormais diriger les actions à mener, les outils à utiliser puis les différentes cibles à viser.

De plus, l'erreur selon laquelle la destination «Madagascar» est vendue comme principalement balnéaire devra être rectifiée. Les autres produits tels que le tourisme de loisirs, de vacances, d'affaires/congrès en générale et le Géotourisme en particulier, doivent faire l'objet de commercialisation. Cette diversification doit se conformer aux particularités des différents pays émetteurs. Et aussi, l'attention de promotion touristique plus tournée vers la France comme si elle était le seul pays émetteur devrait être à réétudier. C'est vrai, Madagascar doit aujourd'hui chercher à conserver et améliorer ses acquis au niveau de tous ses marchés traditionnels ou encore significatifs. Mais, la conquête de marchés ne doit pas s'arrêter ou se limiter là. Elle doit progressivement s'étendre jusqu'à d'autres marchés résiduels. Et, d'une manière générale, comme les moyens de communication utilisés sont les mêmes alors que le secteur évolue rapidement. Il faut accompagner les différentes actions promotionnelles par un plan marketing de la vitrine bien défini : Ce plan marketing doit tenir compte des études, prospections et séminaires effectués, puis que ceux-ci ouvrent vraiment aux réalités qui existent. A ces effets, les impacts de ces innovations convient à la mise en route des points suivants :

- Renforcer l'attractivité de la destination Madagascar en récréant son image : La stratégie adoptée consiste en une valorisation de la qualité de l'offre et des services. Elle opte aussi pour un nouveau positionnement image du pays, mettant en exergue l'émotion et la découverte.

- Créer de la valeur et augmenter les recettes touristiques en incitant les clientèles à multiplier leurs voyages vers Madagascar, notamment au travers de courts séjours et en proposant des produits à haute valeur ajoutée.

- Mieux promouvoir le tourisme sur l'ensemble du territoire Malgache en prenant appui sur la richesse géologique et la biodiversité d'une mosaïque culturelle Malgache.

- Désaisonnaliser le tourisme en multipliant les opportunités de séjours tout au long de l'année.

Ces arguments permettent de conquérir de nouvelles clientèles sur nos marchés traditionnels en se concentrant sur de nouveaux bassins émetteurs et cibles affinitaires. Tous ceux qui visiteraient Madagascar et d'autre encore doivent revenir si l'image qui leur parvient les incite à visiter le pays.

### **L'innovation par la mise en place de veille stratégique**

La veille stratégique relève de la capacité à gérer de façon dynamique l'ensemble des types de veilles stratégique dynamique comprenant différents systèmes de veille spécialisés, notamment : technologique, concurrentielle, commerciale, marketing ou environnementale.

A travers la veille technologique, pourrait être décelé, le plutôt possible, les technologies émergentes et pertinentes qui seront capitales pour le développement futur de ceux qui seront présent lors de la vitrine. La veille concurrentielle permet un meilleur suivi des stratégies des concurrents potentiels et actuels, tandis que la veille commerciale ou marketing permet d'avoir des informations pertinentes relatives aux clients, aux marchés et aux fournisseurs. La veille environnementale, quant à elle, permettrait de s'approprier un avantage stratégique par le décodage des signaux en provenance de l'externe.

L'innovation suppose une grande masse d'informations sur les marchés, les concurrents, les technologies. C'est à partir de cette analyse permanente qu'elles pourront lancer des projets d'innovation par le développement interne en cohérence avec les données environnementales et réduire les facteurs de risques associés à l'innovation. Une recherche d'information soutenue, des sources pertinentes ainsi qu'une diffusion large de l'information à l'intérieur de l'entreprise sont considérées comme des activités pouvant favoriser un climat créatif et une organisation flexible nécessaire au développement de l'innovation.

- Les conséquences sur l'environnement : impact sur la faune et la flore (notamment pour les manifestations en milieu ouvert ou du fait de la construction des équipements nécessaires à la tenue de la manifestation), dégradation ou embellissement des sites, pollution atmosphérique... La notion d'impact est ici le plus souvent connotée négativement.

- Les conséquences sociales, sur le bien-être des populations locales : ces conséquences peuvent être négatives, par exemple du fait des désagréments engendrés par une fréquentation excessive ou mal contrôlée (engorgement routier, bruit, sentiment d'insécurité...), ou dans le cas d'une manifestation mal acceptée par la population locale. Elles peuvent, à l'inverse, s'avérer positives : satisfaction de pouvoir assister à des manifestations gratuites (ou payantes mais sur place), de pouvoir profiter d'aménagements réalisés à l'occasion de la manifestation... ; fierté d'accueillir un évènement valorisant, de voir la ville ou la Région avoir l'honneur des médias, d'appartenir à une région dynamique et vivante... ; plaisir de s'impliquer dans un projet fédérateur et reconnu, etc.

- Les conséquences au niveau de l'activité servant de support à l'évènement : augmentation du nombre de pratiquants, des moyens alloués localement à l'activité (aides, subventions et partenariats) du fait d'une meilleure reconnaissance ou d'une plus forte visibilité ; développement des opérateurs touristiques pouvant désormais profiter d'infrastructures adaptées...

- Les conséquences économiques : Il s'agira des conséquences de la présence de l'évènement sur l'emploi, l'activité des entreprises, la richesse captée ou créée et in fine, la prospérité des populations locales.

Le secteur du tourisme de Madagascar est un secteur éclaté et hétérogène. L'environnement mondial dans lequel il évolue est et deviendra de plus en plus instable. Les menaces futures ne sont pas encore connues. Dès qu'un événement du type «crise : COVID-19» survient, les professionnels du tourisme doivent se repositionner rapidement : rapidité dans la communication. Garder ses atouts et ses potentialités supposent qu'il y ait eu en amont de la crise, une veille du phénomène.

Il n'existe pas de modèle absolu pour gérer et pour communiquer en période de crise. Il est nécessaire avant tout de s'y préparer via des échanges d'expériences pour mettre en commun les enseignements tirés de situations vécues. Ainsi, les professionnels vivant une crise pourront être en mesure de prendre appui sur un réseau de relations ayant déjà mené une réflexion sur le sujet. Ils pourront ainsi donner du sens à leurs actions car il n'y a de sens que dans l'action collective.

## CONCLUSION

Incontestablement, Madagascar dispose de nombreux atouts touristiques. Beaucoup d'efforts d'investissements dans le tourisme ont été accomplis. Toute une politique de promotion touristique œuvrant pour mettre le secteur sur de nouveaux rails de développement est omniprésent. A travers elle, les responsables de la promotion touristique s'investissent pour développer le maximum de visiteurs vers la destination.

Cependant, actuellement, d'innombrables problèmes freinent et continuent par obstruer le développement du tourisme, de telle enseigne que si des réactions pressantes et efficaces ne s'effectuent pas, le secteur risque de sombrer totalement dans une grave crise. Les résultats de cette étude montrent clairement que le secteur devrait être plus maîtrisé. La politique définit en matière de promotion touristique est fragile sur plusieurs plans et nécessite de véritables révisions, adaptées et efficaces, susceptibles d'amener des changements encourageants et positifs. Au delà de cela, les touristes qui sont après tout les consommateurs, ne doivent pas être négligés dans le cadre des études à entreprendre.

C'est alors, qu'il serait donc très indispensable de prêter beaucoup d'attention aux recommandations formulées, tout en partageant la vision de promotion aux principaux acteurs, et en les sensibilisant plus à un travail d'équipe par une «innovation claire d'une vitrine Géotouristique» pour le pays. Finalement, dans l'évidence que les actions promotionnelles demandent un facteur humain important et qualifié, alors que celui existant est insuffisant et pas en hauteur de la compétence qui s'impose, une grande priorité doit être accordée une **PLANIFICATION GEOTOURISTIQUE**.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Banque Centrale de Madagascar (BCM), (2007). Rapport annuel, décembre 2007, p4.
- 2) BUTLER R.W. (1980) : «*The concept of a tourist area cycle of evolution: implications for management of resources*», In *Canadian geographer*, vol. 24, n°1, pp.5-12
- 3) CROMPTON Elizabeth, 2003. République de Madagascar : Etude du secteur Tourisme (Washington, 2003). p. 20
- 4) DUVAL M. et GAUCHON C. 2010. *Tourisme, Géosciences et enjeux des territoires : Actualités du Géotourisme*». *Téoros*, vol.29, p. 11-13
- 5) Loi N° 90-033 portant «Charte de l'Environnement Malgache,» in Journal Officiel de la République de Madagascar N° 2254, Mai 1991, p. 87.
- 6) Loi N° 95-017 du 25 Août 1995 Portant «Code du Tourisme.» in Journal Officiel de la République de Madagascar N° 2 346, Fev. 1996, pp. 166-192.
- 7) MINVIELLE. 2010 : *Le tourisme au Sahara : pratiques et responsabilités des acteurs*, Management & Avenir, p. 187-203
- 8) PRALONG J. P., 2006 : «*Géotourisme et utilisation de sites naturels d'intérêt pour les sciences de la Terre : dans les régions de Crans-Montana-Sierre (Valais, CH) et de Chamonix-Mont-Blanc (Haute-Savoie, F)*» Institut de Géographie, Université de Lausanne, pp. 30-31
- 9) RABEARY F. 2014 : «Promotion du Géotourisme pour un Développement Touristique Durable à Madagascar», thèse de Doctorat en Sciences Agronomique, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA), Université d'Antananarivo.
- 10) RABEARY F. 2010 : «Enjeux et Dynamisme du Tourisme Durable par les richesses Forestières et Ecosystémiques à Madagascar», Mémoire de Fin d'études pour l'obtention du *Diplôme d'Etudes Approfondies* (D.E.A.) en Sciences Agronomiques, délivré par l'Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA-Forêt), Université d'Antananarivo
- 11) SARRASIN B. 2002 : «Environnement, développement et tourisme à Madagascar : quelques enjeux politiques», Université de Québec, Montréal.
- 12) VERNON, R. 1966: "*International investment and international trade in the product cycle.*" In *Quarterly Journal of Economics*, vol. 80. Cambridge, Massachusetts, Harvard University.
- 13) VELLAS F., 2006, *Economie et Politique du tourisme international*, Economica, Sciences Economiques, Paris, 323 p.



# COMPARAISON DE DEUX COMMANDES MPPT DANS UN NANO-RESEAU ELECTRIQUE

par

RANAIVOSON S. S.<sup>(2;4)</sup>, Le SAUX N.<sup>(4)</sup>, SAINCY N.<sup>(4)</sup>, SAMBATRA E.J.  
R.<sup>(1,2)</sup>, ANDRIANAJAINA T.<sup>(2,3)</sup>, RAZAFINJAKA N. J.<sup>(2,3)</sup>

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

(2) EDT Energies Renouvelables et Environnement, Université d'Antsiranana, Madagascar

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

(4) Nanoé – Electrification Décentralisée, Ambanja

## RESUME

Cet article a pour objectif d'analyser la performance de la production maximale de puissance dans un nano-réseau électrique en utilisant la technique MPPT. Des descriptions des éléments constitutifs d'un nano-réseau électrique ont été effectuées, à savoir (i) un module PV, (ii) un hacheur abaisseur et (iii) une commande MPPT. Les commandes Perturb and Observe « P&O » et Incrémentation de la Conductance « INC » ont été choisies pour piloter un hacheur abaisseur en raison de leur facilité de mise en œuvre. Des simulations sous différentes conditions atmosphériques de ces deux commandes, dans un nano-réseau électrique, ont été entreprises sur l'environnement Matlab/Simulink

**Mots clés :** Système photovoltaïque, Nano-réseau électrique, Hacheur abaisseur, MPPT, P&O et INC

## ABSTRACT

The aim of this article is to analyze the performance of maximum power generation in an electrical nanogrid using the MPPT technique. The components of an electric nanogrid are described, namely (i) a PV module, (ii) a buck converter and (iii) a MPPT controller. The Perturb and Observe " P&O " and Incrementing the Conductance " INC " commands were chosen to control a buck converter because of their simplicity of implementation. Simulations of these two commands under different atmospheric conditions, in an electrical nanogrid, are performed on the Matlab/Simulink.

**Keywords :** Photovoltaic system, Electrical nanogrid, Buck converter, MPPT, P&O and INC

# INTRODUCTION

La société Nanoé déploie un nouveau modèle d'électrification à base de nano-réseaux électriques dans la zone rurale du Nord de Madagascar. Dans le but de répondre aux besoins énergétiques croissants des ménages, et pour assurer la disponibilité d'énergie dans ces nano-réseaux pour leurs futures interconnexions, l'utilisation d'un régulateur de charge solaire de type MPPT (Maximum Power Point Tracking) est capitale (Boillot M. et al., 2018).

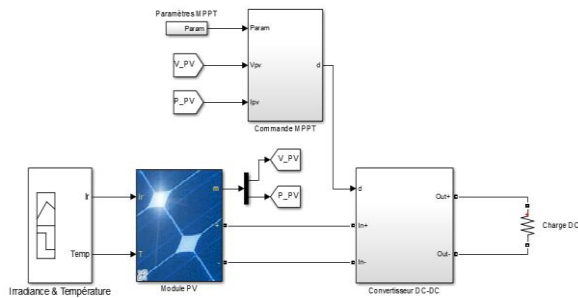
Parmi plusieurs commandes MPPT pour piloter ce régulateur de charge solaire, les commandes (i) Perturb and Observe « P&O » et (ii) Incrémentation de la conductance « INC » sont étudiées en raison de leur facilité de mise en œuvre car elles ne nécessitent que des mesures du courant et de la tension du module photovoltaïque (Abbes H. et al., 2014 ; Aouchiche N. et al., 2013 ; Saad M. et al., 2018).

Cette contribution donne un aperçu du fonctionnement d'un nano-réseau électrique. Ensuite, elle simule sur l'environnement Matlab/Simulink© les deux commandes MPPT sus-citées, pilotant un hacheur abaisseur sous différentes conditions atmosphériques.

## MATERIELS ET METHODES

### Modèle du système

Un nano-réseau électrique est comparable à un système solaire photovoltaïque individuel, raccordant 4 à 6 ménages, délivrant initialement un service électrique limité aux besoins domestiques essentiels des populations hors réseau (éclairage, recharge de téléphone, multimédia, etc.) (Boillot M. et al., 2018).



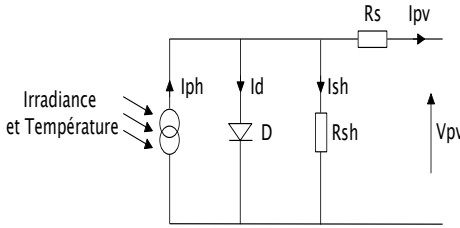
**Figure 1 :** Modélisation d'un nano-réseau électrique

Il est constitué (i) d'un module PV qui génère de l'électricité à partir d'une irradiance et d'une température, (ii) un convertisseur continu-continu « DC-DC » qui assure l'adaptation source-charge, (iii) une commande MPPT qui pilote le

convertisseur DC-DC par l'intermédiaire du rapport cyclique et (iv) et une charge DC.

### Module PV

Le module PV de la Figure 1 formé par l'association de plusieurs cellules PV, qui peuvent être considérée comme une source idéale de courant fournissant un courant  $I_{ph}$  proportionnel à l'irradiance et à la température. Une cellule PV peut être modélisée comme suit (Scott M., 2009) (Figure 2).



**Figure 2 :** Modèle à une diode d'une cellule photovoltaïque

Les équations correspondantes du modèle à une diode d'une cellule PV se résument par :

$$I_{pv} = I_{ph} - I_d - I_{sh} \quad (1)$$

Le photocourant  $I_{ph}$  s'exprime en fonction de l'irradiance et de la température :

$$I_{ph} = \frac{\phi}{\phi_{ref}} \left[ I_{cc} + \mu_{Icc} (T - T_{ref}) \right] \quad (2)$$

Le courant de la diode  $I_d$  est supposé variable avec la température selon l'expression :

$$I_d = I_{sat} * \left[ \exp \left( \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{nV_T} \right) - 1 \right] \quad (3)$$

Et le courant shunt  $I_{sh}$  traversant la résistance shunt  $R_{sh}$  est égal à :

$$I_{sh} = \frac{V_{pv} + R_s I_{pv}}{R_{sh}} \quad (4)$$

$V_{pv}$  et  $I_{pv}$  représentent la tension et le courant de la cellule PV,  $\phi$  et  $\phi_{ref}$  sont des irradiances effectives et de référence  $[W / m^2]$  ;

$T$  et  $T_{ref}$  sont des températures effectives et de référence  $[^\circ K]$  ;

$\mu_{Icc}$  est le coefficient de température du courant de court-circuit  $I_{cc}$  ;

$I_{sat}$  est le courant de saturation [A];

$n$  est le facteur d'idéalité de la jonction ( $1 < n < 3$ )

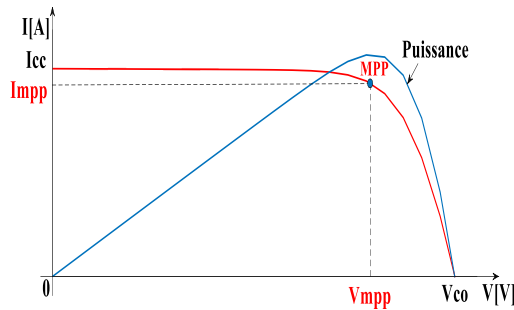
et  $V_T$  la tension thermique de la diode [V].

### Caractéristique courant-tension

Les paramètres électriques du module PV utilisé sont définis sur la caractéristique statique courant-tension (Figure 3) (Bun L., 2011).

La tension maximale aux bornes du module PV, appelée tension de circuit ouvert  $V_{CO} = 21,8$  [V] dépend de la température des cellules PV. La valeur du courant maximal  $I_{cc} = 6,18$  [A] lorsque le module PV se trouve en court-circuit dépend de la taille du module PV et du niveau d'irradiance.

Le seul point optimal où la puissance est maximale (PPM) correspond à la tension et au courant optimaux  $V_{MPP} = 17,2$  [V] et  $I_{MPP} = 5,8$  [A].

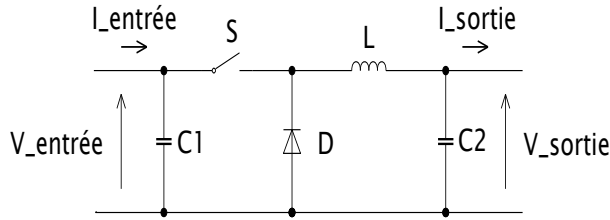


**Figure 3 :** Courant  $I_{MPP}$ , tension  $V_{MPP}$  et puissance  $P_{MPP}$  optimaux d'un PV 100 W en STC

### Etage d'adaptation entre un module PV et une charge

Afin d'extraire à chaque instant le maximum de puissance disponible aux bornes du module PV (Figure 1) et de la transférer à la charge, la solution communément adoptée est l'utilisation d'un convertisseur statique qui joue le rôle d'adaptateur source-charge (Başoğlu E. M. et Çakir B., 2016).

Les nano-réseaux électriques utilisent un hacheur abaisseur où la tension de la charge DC à alimenter doit être inférieure ou égale à celle du module PV  $V_{pv} \geq V_{charge}$  (Boillot M. et *al.*, 2018).



**Figure 4 :** Structure d'un hacheur abaisseur

Un hacheur abaisseur est une alimentation à découpage qui permet d'abaisser la tension de sortie. Son fonctionnement peut être divisé en deux phases, suivant l'état de l'interrupteur  $S$  (Rufer, A. et Barrade, P., 1994) :

- l'interrupteur est fermé : le courant fourni par le PV charge progressivement l'inductance  $L$  pendant  $t_1 \in [0, dT]$ , et la tension à la sortie du convertisseur est définie par  $V_{out} = V_{in} - V_L$  (5).
- l'interrupteur est ouvert pendant  $t_2 \in [dT, T]$ , le courant traversant l'inductance décroît et elle s'oppose cette fois-ci à cette réduction du courant  $V_L = -V_{out}$  (6).

Le rapport cyclique  $d$  est défini par le rapport entre la durée de conduction de  $S$  et la période de commutation  $T$  :

$$d = \frac{t_1}{T} \quad (7)$$

Ainsi, 
$$V_{out} = dV_{in} \quad (8)$$

### Commande MPPT

Face à l'intermittence de l'énergie solaire photovoltaïque, la puissance maximale que peut fournir un module PV ainsi que sa tension et son courant optimaux ne sont pas connus à l'avance (Bun L., 2011).

Des lois de commandes sont associées au convertisseur DC-DC pour lui permettre d'extraire la puissance maximale du module PV à tout instant (Abbes H. et al., 2014 ; Li S., 2014 ; Rezk, H. et Eltamaly, A. M., 2015).

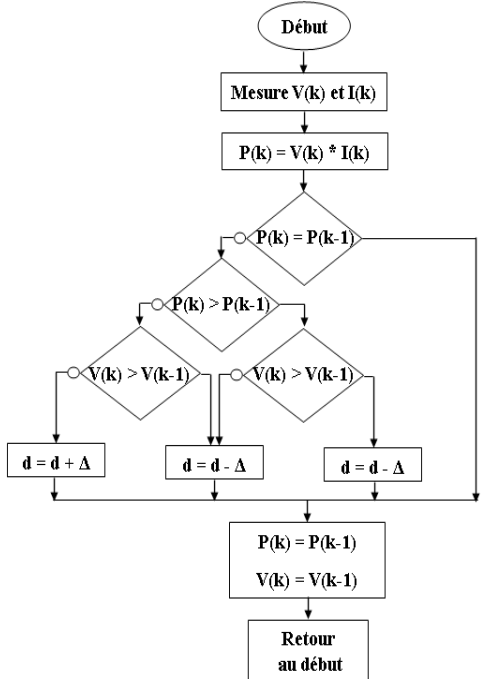
Appelées MPPT pour Maximum Power Point Tracking, elles permettent de contrôler le convertisseur DC-DC afin qu'il assure la meilleure adaptation possible entre le module PV et la charge (Başoğlu, E. M. et Çakir, B., 2016). Les plus courantes dans ces commandes sont : (i) P&O, (ii) INC, mesure d'une fraction de la tension en circuit ouvert (FCO), mesure d'une fraction de courant de court-circuit (FCC) et contrôle à base de la logique floue (LF) (Abbes H. et al., 2014).

Les deux premiers, en l'occurrence P&O et INC ont été retenus en raison de leur type extrémal (Aouchiche N. *et al.*, 2013 ; Saad M. *et al.*, 2018). Leurs algorithmes permettent de suivre l'évolution de la puissance fournie par le module PV à l'aide d'une perturbation du rapport cyclique du convertisseur DC-DC, quand toutes les autres commandes ne sont pas applicables en termes de prévisions (Abbes H. *et al.*, 2014).

*P&O*

La méthode P&O consiste à perturber la tension  $V_{pv}$  et d'observer l'impact sur la puissance de sortie du module PV (Aouchiche N. *et al.*, 2013 ; Saad *et al.*, 2018).

A chaque cycle (Figure 5),  $V_{pv}$  et  $I_{pv}$  sont mesurés pour calculer  $P_{pv}(k)$ , qui sera comparée à la valeur de la puissance précédente  $P_{pv}(k-1)$ .



**Figure 5** : Algorithme de P&O

*Incrémentation de la conductance*

Cette méthode est basée sur le calcul du rapport des dérivées de la puissance et e la tension  $\frac{dP}{dV}$  (9) pour atteindre le point de puissance maximale (Aouchiche N. *et al.*, 2013 ; Saad *et al.*, 2018).

Sachant que la dérivée du produit par rapport à la tension  $V$  donne la relation suivante :

$$\frac{dP}{dV} = \frac{d(V \cdot I)}{dV} = I + V \frac{dI}{dV} \quad (10)$$

Ce qui revient à écrire :

$$\frac{dP}{dV} = 0 \text{ équivaut à } \frac{dI}{dV} = -\frac{I}{V} \quad (11)$$

$$\frac{dP}{dV} > 0 \text{ équivaut à } \frac{dI}{dV} > -\frac{I}{V} \quad (12)$$

$$\frac{dP}{dV} < 0 \text{ équivaut à } \frac{dI}{dV} < -\frac{I}{V} \quad (13)$$

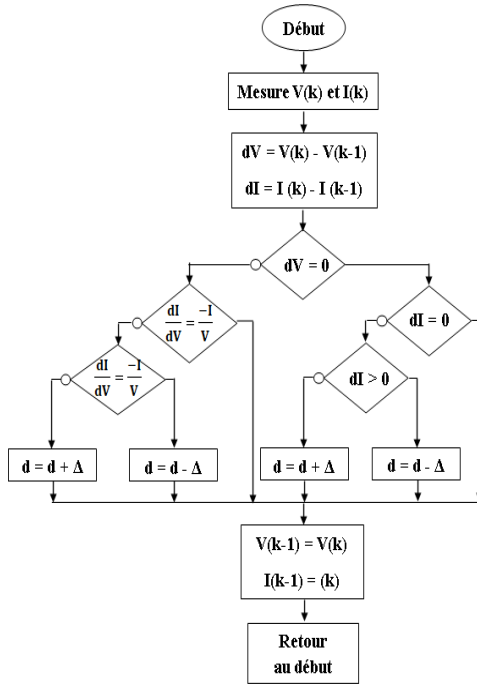
Les changements par accroissement nécessaires  $dV$  et  $dI$  sont obtenus en comparant les valeurs mesurées les plus récentes pour  $V$  et  $I$  à celles mesurées durant le cycle précédent (Figure 6) :

$$dV = V(k) - V(k-1) \quad (14)$$

$$dI = I(k) - I(k-1) \quad (15)$$

Ainsi, si la relation (11) est vraie, le MPP est atteint et aucun changement de la tension  $V(k)$  n'est nécessaire. Si la relation (11) est fautive, selon que  $V(k)$  est supérieure (13) ou inférieure (12) à  $V_{mpp}$ , la tension  $V(k)$  est ajustée en conséquence.

Contrairement au P&O, INC se stabilise à la tension optimale  $V_{mpp}$  une fois le point de puissance maximale MPP atteint. Cependant, l'atteinte de ce dernier lors de la variation brusque des conditions de fonctionnement dépend de la valeur du pas d'incrément  $\Delta$ .



**Figure 6 :** Algorithme de l'INC

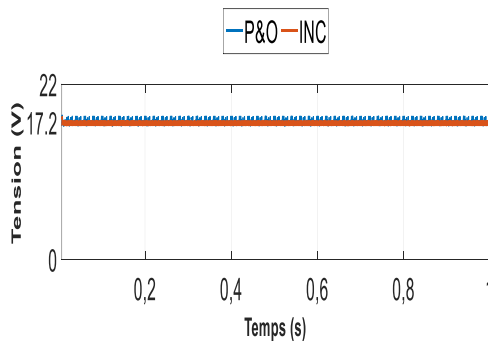
## RESULTATS

### Résultats de simulation

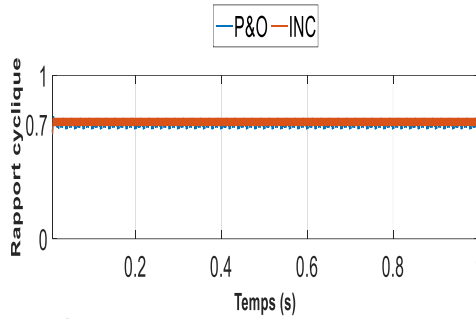
#### Conditions STC

Le module PV est exposé à une irradiance de  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température de  $25^\circ\text{C}$ .

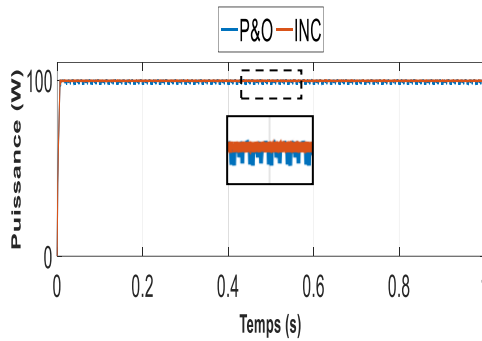
Les Figures 7, 8 et 9 suivantes correspondent aux valeurs prédéfinies (Figure 3) pour les caractéristiques du PV en condition STC.



**Figure 7 :** Tension optimale du PV en STC



**Figure 8 :** Rapport cyclique du hacheur abaisseur

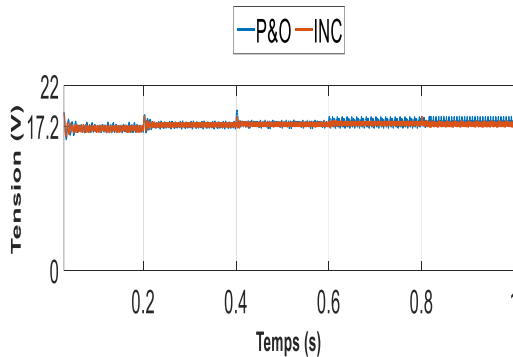


**Figure 9 :** Puissance optimale du PV en STC

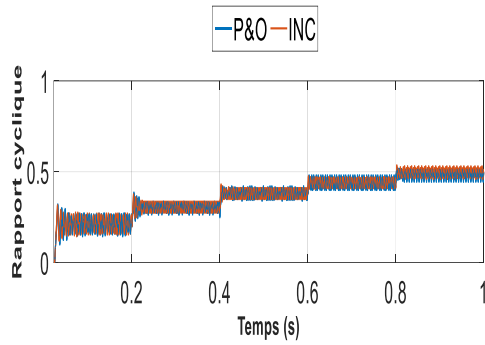
### *Cas de variation de l'irradiance*

Le système PV est simulé avec une température fixe de 25°C et une irradiance variable avec un pas de 100 W/m<sup>2</sup> (100 W/m<sup>2</sup> - 500 W/m<sup>2</sup>).

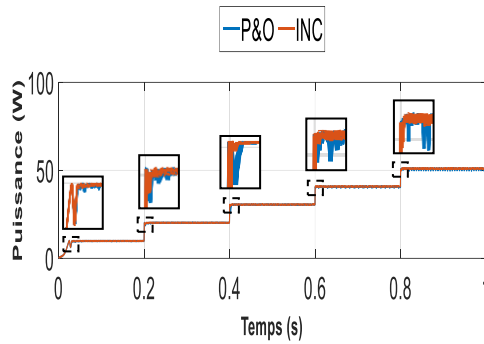
Les figures suivantes illustrent l'évolution des caractéristiques du système PV suite à l'évolution de l'irradiance avec une température fixe.



**Figure 10 :** Tension optimale du PV avec variation de l'irradiance



**Figure 11 :** Rapport cyclique du hacheur abaisseur irradiance

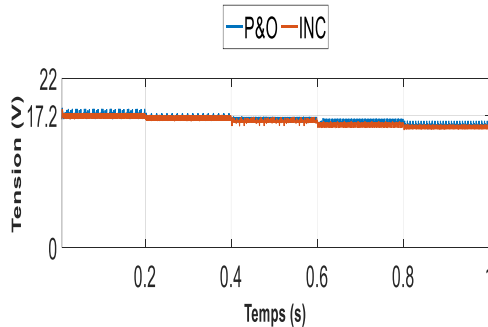


**Figure 12 :** Puissance optimale du PV avec variation de l'irradiance

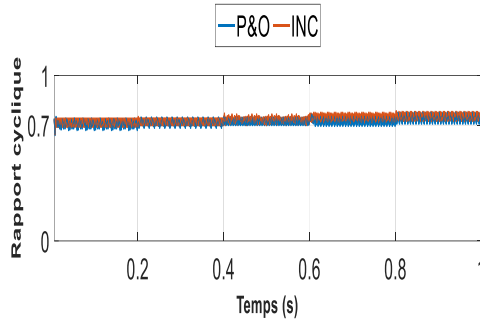
### *Cas de variation de la température*

La troisième simulation est réalisée avec une irradiance fixe à  $1000 \text{ W/m}^2$  et une température variable avec un pas de  $5^\circ\text{C}$  ( $25^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}$ ).

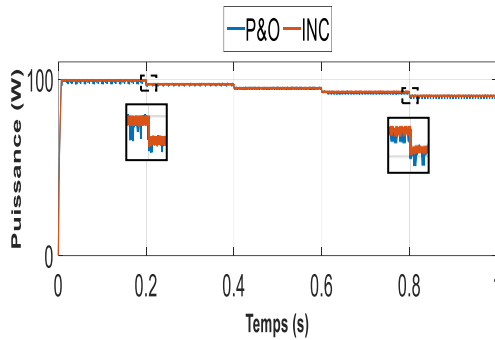
Les figures ci-dessous illustrent l'évolution des caractéristiques du système PV suite à l'évolution de la température avec une irradiance fixe.



**Figure 13 :** Tension optimale du PV avec variation de la température



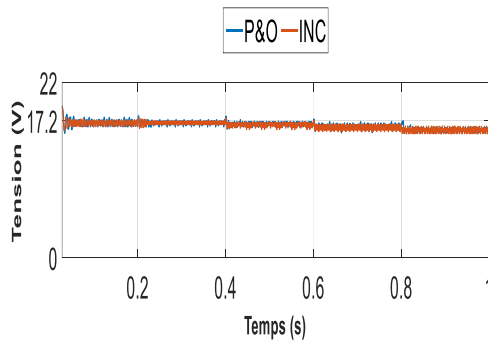
**Figure 14 :** Rapport cyclique du hacheur abaisseur



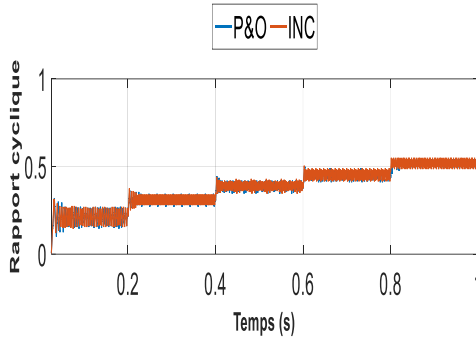
**Figure 15 :** Puissance optimale du PV avec variation de la température

### *Cas de variation de l'irradiance et de la température*

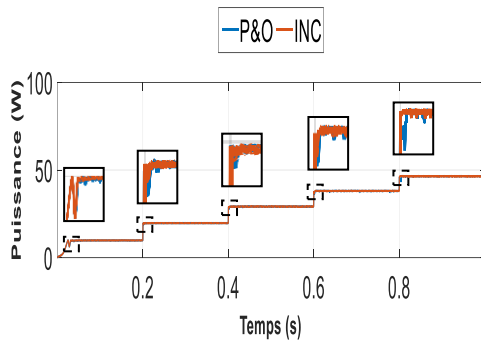
La dernière simulation est réalisée avec une irradiance variable avec un pas de  $100 \text{ W/m}^2$  ( $100 \text{ W/m}^2 - 500 \text{ W/m}^2$ ) et une température variable avec un pas de  $5^\circ\text{C}$  ( $25^\circ\text{C} - 45^\circ\text{C}$ )



**Figure 16 :** Tension optimale du PV avec une double variation de température et d'irradiance



**Figure 17 :** Rapport cyclique du hacheur abaisseur



**Figure 18 :** Puissance optimale du PV avec une double variation de température et d'irradiance

## DISCUSSION

Dans les quatre différentes conditions de simulation, (i) condition STC, (ii) Température constante et Irradiance variable, (iii) Température variable et Irradiance constante et (iv) Température et Irradiance variables, les courbes de tension, du rapport cyclique et de puissance avec les deux commandes P&O et INC ont les mêmes allures pour atteindre la valeur optimale du PV.

Pour la première simulation, en condition STC, la tension et la puissance optimales définies par la Figure 3 sont atteintes par les deux commandes. Le rapport cyclique du hacheur abaisseur, avec les deux commandes, se stabilise autour de 0,72.

Contrairement à la commande INC, des oscillations autour des valeurs optimales sont observées avec la commande P&O.

Pour la deuxième simulation, avec une température de 25°C, la puissance optimale est proportionnelle à la variation de l'irradiance qui affecte directement le courant généré par le PV selon l'équation (2). Cependant, la tension du PV est à peu près stable, et oscille aux alentours de la tension MPP.

Par rapport à la commande INC, la P&O représente quelques anomalies en condition stable et déplace le point de fonctionnement dans la mauvaise direction suite à la variation brusque d'irradiance.

Pour la troisième simulation, avec une irradiance de  $1000\text{W/m}^2$ , la variation de la température affecte la tension générée par le PV. Cette variation de température est inversement proportionnelle à la variation de puissance fournie par le PV, et le rapport cyclique se rapproche de l'unité (selon l'équation (8)) car la tension optimale tend vers la valeur de la tension de sortie.

*La commande P&O a du mal à suivre la variation brusque, et les oscillations autour de la puissance optimale sont toujours présentes dans les conditions stables.*

La dernière simulation permet de déduire l'inconvénient de la commande P&O par rapport à la commande INC suite aux variations brusques d'irradiance et de température.

Les courbes de puissance sur les Figures 12 et 18 ont la même allure. Cependant, le PV sur la dernière simulation délivre moins de puissance par rapport à celui de la deuxième simulation.

## CONCLUSION

Ce travail a pour objectif de produire le maximum de puissance dans un nano-réseau électrique avec une commande MPPT performante et facile à mettre en œuvre. Les principaux éléments d'un système photovoltaïque qui sont (i) le module PV, (ii) le hacheur abaisseur et (iii) les commandes P&O et INC ont été décrits. Ensuite, dans l'objectif d'analyser et comparer les performances de ces deux commandes, des simulations sous plusieurs conditions d'irradiance et de température avec l'environnement Matlab/Simulink© ont été faites.

Les résultats de simulations montrent que la commande INC donne des meilleurs résultats que le P&O, que ce soit en condition stable ou pendant les variations des conditions atmosphériques.

Aussi, la puissance générée par le module PV est proportionnelle à la variation d'irradiance, qui est le cas inverse pour la variation de la température. A noter que l'irradiance a plus d'impact que la température sur la puissance générée par un module PV, d'après les trois dernières simulations et l'équation (2).

Cet article conduit au prototypage d'un hacheur abaisseur piloté par la commande INC pour avoir un régulateur de charge solaire de type MPPT performant dans un nano-réseau électrique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Abbes H., Abid H., Loukil K., Toumi A., Abid M. (2014). Etude comparative de cinq algorithmes de commande MPPT pour un système photovoltaïque. In *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 17 N°3 : 435-445. Algérie : Centre de Développement des Energies Renouvelables.
- 2) Aouchiche, N. Aït Cheikh, M. S. Malek, A. (2013). Poursuite du point de puissance maximale d'un système photovoltaïque par les méthodes de l'incrémentation de conductance et la perturbation & observation. In *Revue des Energies Renouvelables* Vol. 16 N°3 : 485-498. Algérie : Centre de Développement des Energies Renouvelables.
- 3) Başoğlu, E. M. Çakir, B. (2016). Comparaisons of MPPT performances of isolated and non-isolated DC-DC converters by using a new approach. In *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 60 : 1100-1113. Elsevier.
- 4) Boillot, M. Doulet, A. Saincy, N. (2018). *Electrification latérale : Vers un nouveau modèle d'électrification pour l'Afrique*. Paris : Fondation Tuck.
- 5) Bun, L. (2011). *Détection et localisation de défauts pour un système PV*. Thèse de doctorat, Université de Grenoble.
- 6) Li, S. (2014). A MPPT control strategy with a variable weather parameter and no DC/DC converter for photovoltaic systems. In *Solar Energy* 108 : 117-125. Elsevier.
- 7) Liu, F. Duan, S. Liu, F. Liu, B. Kang, Yong. (2018). A variable step size MPPT method for PV systems. In *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 55(7) : 2622-2628. IEEE
- 8) Rezk, H. Eltamaly, A. M. (2015). A comprehensive comparison of different MPPT techniques for photovoltaic systems. In *Solar Energy* 112 : 1-11. Elsevier.
- 9) Rufer, A. Barrade, P. (1994) *Cours d'électronique de puissance – Conversion DC/DC*. Masson.
- 10) Saad, M. El Hammoumi, A. El Ghzizal, A. (2018). Photovoltaic systems with quantitative comparative between an improved MPPT and existing INC and P&O methods under fast varying of solar irradiation. In *Energy Reports* 4 : 341-350. Elsevier.
- 11) Scott, M. (2009). *A switched extremum seeking approach to maximum power point tracking in photovoltaic systems*. Berkeley : Grid Integration of Alternative Energy Sources.

# ETUDE DE L'ÉROSION DU SOL A COURT-TERME PAR LA TECHNIQUE DU <sup>7</sup>BE

par

RANDRIANANTENAINA Fanjanirina R.<sup>(1)</sup>, RASOLONIRINA Martin<sup>(1)</sup>,  
SOLONJARA Asivelo F.<sup>(1)</sup>, RABESIRANANA Naivo<sup>(1,2)</sup>

(1) Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN-Madagascar)

(2) Mention Physique et Applications, Faculté des Sciences - Université d'Antananarivo, Madagascar

## RESUME

A Madagascar, l'érosion du sol a des impacts majeurs dans les domaines de l'agriculture et l'environnement. Sa gravité s'accroît avec les activités humaines et le changement climatique. Il est alors nécessaire de produire des données quantitatives de l'érosion de sol à différentes échelles temporelles afin d'évaluer les risques associés aux pratiques agricoles traditionnelles des paysans. La présente étude utilise la technique de retombée atmosphérique béryllium-7. Cette technique a la possibilité de déterminer l'impact des événements de pluie à court-terme (< 6 mois). Cette technique innovante a été expérimentée sur un site agricole en pente, dans la Commune Rurale d'Andranomanelatra, Antsirabe. Deux campagnes de travaux de terrains ont été effectuées : la 1<sup>ère</sup> descente au mois de Décembre 2018, au début de la saison des pluies et la 2<sup>ème</sup> descente au mois de mars 2020, à la fin de la saison des pluies. Les activités du <sup>7</sup>Be dans les échantillons du sol collectés ont été mesurées par spectrométrie. Le modèle de conversion appelé Profil de Distribution a été utilisé pour convertir l'inventaire (Bq.m<sup>-2</sup>) en taux d'érosion (t.ha<sup>-1</sup>). Sur l'ensemble du site, les érosions nettes sont estimées à 2,88 t.ha<sup>-1</sup> et 7,55 t.ha<sup>-1</sup> respectivement pour la 1<sup>ère</sup> et 2<sup>ème</sup> descente. La valeur de la 2<sup>ème</sup> descente, plus importante que celle de la 1<sup>ère</sup> descente, peut être expliquée par l'abondance de précipitation et le changement de culture. Les résultats confirment la potentialité de la technique du <sup>7</sup>Be pour étudier l'érosion du sol liée à une courte-période de pluie.

**Mots clés :** Madagascar, érosion des sols, béryllium-7, spectrométrie gamma, modèle de conversion

## ABSTRACT

In Madagascar, soil erosion affects the agricultural and environmental sectors. Its severity is enhanced by human activities and climate change. In order to assess the risks associated with farmer traditional agricultural practices, it is necessary to

determine the soil erosion magnitude at different timescales. The present study uses the beryllium-7 fallout radionuclide (FRN) technique. This technique has the possibility of determining the impact of short-term rainfall events (<6 months) and the effectiveness of the agricultural soil conservation practice. The innovative technique was applied on sloped agricultural site, at Andranomanelatra, Antsirabe. Two fieldwork campaigns were carried out: the first in December 2018, at the beginning of the rainy season, and the second in March 2020, at the end of the rainy season. The soil sample  $^7\text{Be}$  activities were measured by gamma spectrometry. The Profile Distribution conversion model was used to convert inventory ( $\text{Bq.m}^{-2}$ ) to erosion rate ( $\text{t.ha}^{-1}$ ). Considering the site as a whole, the net erosion is estimated at  $2.88 \text{ t.ha}^{-1}$  (1<sup>st</sup> field work) and  $7.55 \text{ t.ha}^{-1}$  (2<sup>nd</sup> field work). The net erosion value of the 2<sup>nd</sup> field work, which is high compared to that of the 1<sup>st</sup> field work, can be explained by the abundance of precipitation and the change in culture. The results obtained confirm the  $^7\text{Be}$  FRN technique potentiality to determine the impacts of rainfall events during short period.

**Keywords** : Madagascar, soil erosion,beryllium-7, gamma spectrometry, conversion model

## INTRODUCTION

Madagascar est l'un des pays où l'érosion du sol pose des problèmes majeurs dans le secteur socio-économique, la protection de l'environnement et le développement durable. Le phénomène prend de plus en plus d'ampleur dans toutes les régions du pays. L'île perd d'année en année une quantité importante de terre arable. Plus de 30% de la superficie totale du sol de l'île, couvrant  $184\,338 \text{ km}^2$ , sont dégradées (Rabesiranana et *al.*, 2016). Pourtant, le sol est un enjeu majeur dans ce pays car 80 % de sa population sont constitués de paysans. Les causes de la dégradation du sol sont nombreuses : déforestation, feux de brousse, production de charbon, culture sur brûlis ou *tavy* et le changement climatique. A cet effet, il est nécessaire de produire des données quantitatives de l'érosion de sol afin d'évaluer les risques associés aux pratiques agricoles traditionnelles des paysans. En raison de la possibilité de déterminer l'impact des évènements de pluie à court-terme (< 6 mois) et de suivre l'efficacité des techniques de conservation des sols (Blake et *al.*, 1999, Mabit et *al.*, 2008), la présente étude utilise la technique de béryllium-7 ( $^7\text{Be}$ ) pour étudier l'érosion de ces sols sur un champ agricole des hautes terres de Madagascar.

## MATERIELS ET METHODES

### Béryllium-7

Le béryllium-7 est un radionucléide cosmogonique naturel ayant une période radioactive de 53,3 jours et une énergie d'émission gamma de  $E_{\gamma} = 477,7$  keV. Il est produit par spallation de rayon cosmique avec l'azote et l'oxygène dans l'atmosphère (Mabit et *al.*, 2008). Il atteint la surface du sol par déposition humide ou déposition sèche. La déposition humide est plus importante (environ 90 % des cas) que la déposition sèche (environ 10 % des cas) (Salisbury and Cartwright, 2005, Ioannidou et *al.*, 2005, Wallbrink and Murray, 1994). Le  $^7\text{Be}$  déposé à la surface de la terre se fixe aux particules fines du sol et aux particules fines de sédiment (Blake et *al.*, 1999). Il est absorbé rapidement et presque irréversiblement aux particules du sol (Taylor et *al.*, 2012). Lorsque ces dernières sont en mouvement, le  $^7\text{Be}$  se déplace solidairement. En raison de la période courte du  $^7\text{Be}$ , il est rare de le trouver à une profondeur supérieure à 2 cm (Sepulveda et *al.*, 2008). Si le  $^7\text{Be}$  se trouve en-dessous de 2 cm, ceci est dû au mouvement vers le bas des particules du sol à travers des fissures formées pendant des périodes sèches (Olsen et *al.*, 1985). Le  $^7\text{Be}$  est mesuré pour la première fois par Arnold and Al-Salih (1955) dans les échantillons d'eau de pluie collectée à Chicago et Lafayette, USA, entre 1953 et 1954.

### Hypothèse de la technique du $^7\text{Be}$

**Hypothèse 1 :** Avant l'érosion, la distribution des  $^7\text{Be}$  préexistants dans le sol se rencontre de manière uniforme sur la zone d'étude.

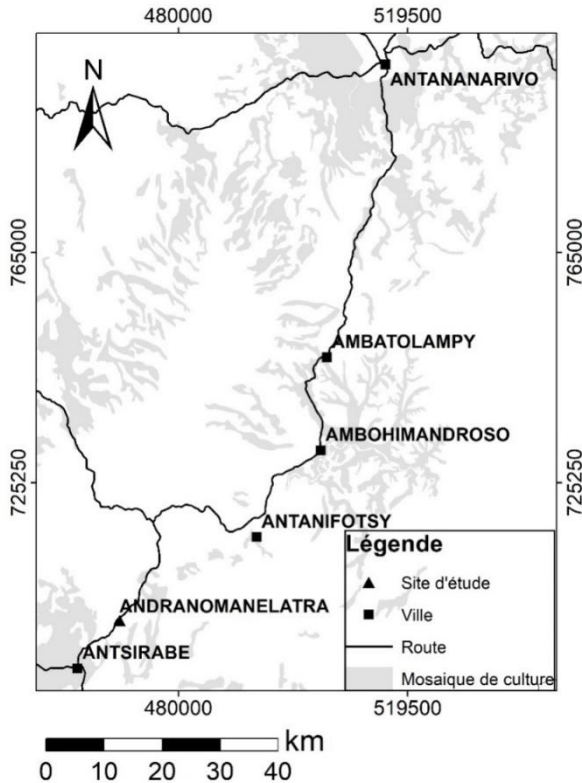
Les  $^7\text{Be}$  préexistants dans le sol disparaissent par désintégration radioactive après 3 fois la période radioactive du  $^7\text{Be}$ , qui est environ 5 mois. Ensuite, la redistribution du  $^7\text{Be}$  dans le sol due à une précipitation de faible intensité peut être considérée comme négligeable. Enfin, l'utilisation du sol, qui mélange le  $^7\text{Be}$  existant dans la couche de labour, rend l'activité du  $^7\text{Be}$  inférieure à la limite de détection. Ces trois conditions qui sous-tendent l'hypothèse 1 permettent, à partir de la date de prélèvement et l'historique des précipitations, de cerner la période de pluie qui impacte l'érosion des sols à la date de l'étude.

**Hypothèse 2 :** la retombée du  $^7\text{Be}$  associée à l'évènement érosif doit aussi être spatialement uniforme à travers la zone d'étude.

Cette hypothèse peut être considérée comme satisfaite pour une zone relativement petite où la distribution de retombée du  $^7\text{Be}$  peut être considéré comme uniforme (Sepulveda et *al.*, 2008, Schuller et *al.*, 2006). Elle suppose que le site de référence doit être assez proche du site d'étude. Dans la pratique, cette distance doit être inférieure à 500 m.

## Description de la zone d'étude

La zone d'étude se trouve dans la Commune rurale d'Andranomanelatra, région de Vakinankaratra [19°49'30,1'' S et 47°07'55,1'' E] (figure 1). Le climat de la région est défini comme étant tropical d'altitude. Il est marqué en général par deux saisons : la saison sèche et froide, de mai à septembre, et la saison pluvieuse et chaude, d'octobre à avril.



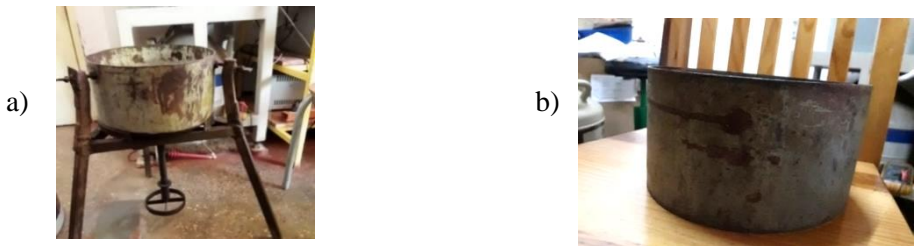
**Figure 1** : Localisation de la zone d'étude

## Protocole d'échantillonnage

La technique des radionucléides de retombées nécessite donc deux types de sites de prélèvement : un site d'étude et un site de référence. Le site d'étude correspond au lieu où l'érosion du sol est étudiée. Le site de référence est un endroit plat non perturbé situé à proximité du site d'étude. Le site d'étude est, ici, un champ agricole sur pente. Y sont cultivés simultanément ou en rotation quatre plantes vivrières traditionnelles à savoir : l'arachide, le haricot, le maïs et le manioc. Les bas-fonds sont réservés à la culture du riz. Une surface plane de 5 m x 2 m, située en contre haut et à 3 m du champ d'étude a été sélectionnée comme site de référence, et ce, dans le but de respecter l'hypothèse 2.

Deux campagnes de prélèvement ont été réalisées : la 1<sup>ère</sup> au mois de décembre 2018 et la 2<sup>ème</sup> au mois de mars 2020. Lors de chaque descente, 10 carottes de sol ont été collectées aléatoirement sur le site de référence pour déterminer le niveau de l'inventaire du <sup>7</sup>Be déposé pendant la période d'investigation. De plus, une carotte de sol a été sectionnée en tranche de 2 mm afin de fournir le profil en profondeur du <sup>7</sup>Be. Mabit et *al.*, 2014 ont suggéré que le nombre d'échantillons de sol collectés sur le site de référence doit être compris entre 10 et 15 échantillons de sol afin d'avoir une bonne précision statistique de l'inventaire.

Sur le site d'étude, 35 carottes de sol ont été collectées suivant 3 transects : le 1<sup>er</sup> contient 11 points de prélèvement, le 2<sup>nd</sup> en contient 11 et le 3<sup>ème</sup> en contient 13. Sur le transect, l'intervalle entre les points de prélèvement a été fixé à 5 m. La profondeur de chaque carotte a été fixée à 5 cm pour récupérer la totalité du <sup>7</sup>Be déposé dans le sol. Les carottes de sol ont été prélevées à l'aide d'échantillonneurs de surface confectionnés à l'INSTN-Madagascar (Figures 2a et 2b).



**Figure 2 :** Echantillonneurs confectionnés à l'INSTN-Madagascar  
a) pour profilage en profondeur et b) pour carotte entière

La figure3 illustre la stratégie d'échantillonnage, montrant le site de référence et les positions des transects dans le champ agricole.

### Précipitation sur le site d'étude

L'historique des précipitations de la commune d'Andranomanelatra avant la 1<sup>ère</sup> et la 2<sup>ème</sup> descente a été obtenu à partir des bases de données de infoclimat de la Direction Générale de la Météorologie de Madagascar. La hauteur totale des précipitations est, pour la 1<sup>ère</sup> descente, de 310 mm sur 30 jours, entre le 01 octobre 2018 et le 17 décembre 2018 (figure 4a). Elle est de 964 mm sur 73 jours, entre le 01 octobre 2019 et le 31 mars 2020, pour la 2<sup>ème</sup> descente (figure 4b).

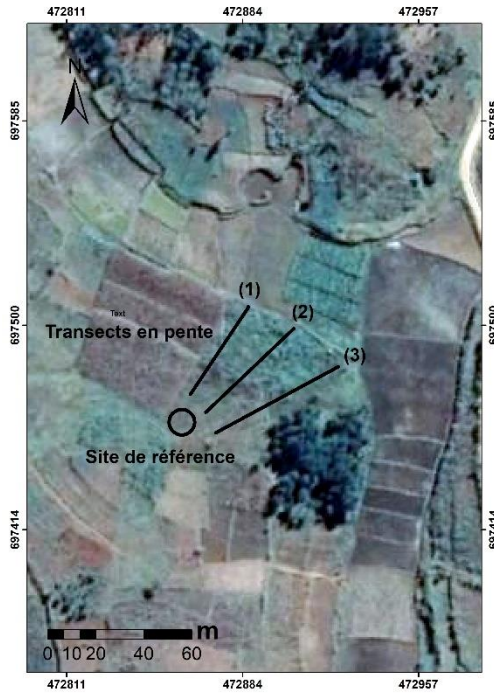
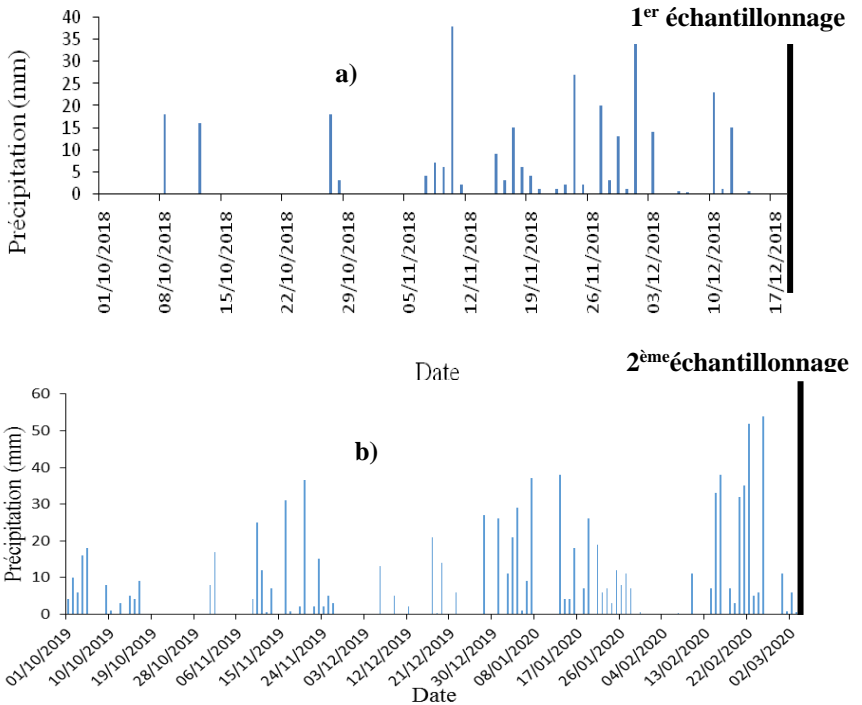


Photo extrait de googlemap

**Figure 3 : Stratégie d'échantillonnage**



**Figure 4 : Niveau de précipitation quotidienne avant la**  
a) 1<sup>ère</sup> descente et b) 2<sup>ème</sup> descente

## Préparation et mesure des échantillons

Les échantillons ont été pesés et séchés à 80°C pendant 24 h à l'aide d'une étuve une fois au laboratoire de l'INSTN. Ils ont ensuite été broyés manuellement à l'aide d'un mortier- pilon puis, tamisés avec un tamis d'ouverture de 2 mm et mis dans des porte-échantillons. Les sous-échantillons de profil ont été mis dans des porte-échantillons de 200 cm<sup>3</sup>. Les échantillons de carotte entière ont été mis dans des porte-échantillons Marinelli 1L (Figure 5).



a) Porte-échantillon de 200 cm<sup>3</sup>  
pour le profilage



b) Porte-échantillon Marinelli 1L  
pour la mesure globale

**Figure 5** : Géométrie des porte-échantillons

Les échantillons ont été analysés à l'aide d'une chaîne de spectrométrie gamma pour déterminer les activités massiques du <sup>7</sup>Be mesurées en Bq.kg<sup>-1</sup>(Figure 6).



**Figure 6** : Spectrométrie gamma, INSTN-Madagascar

Les activités massiques sont ensuite transformées en inventaire ou activité surfacique, mesuré en Bq.m<sup>-2</sup>, afin de pouvoir calculer les taux d'érosion/déposition.

## Modèle de conversion

Un modèle de conversion permet de transformer l'inventaire du <sup>7</sup>Be en taux d'érosion ou de déposition (t.ha<sup>-1</sup>). Pour le <sup>7</sup>Be, on utilise le modèle appelé "Modèle de Profil de Distribution". Le modèle permet d'évaluer les taux d'érosion sur les

sites cultivés ou non-cultivés (Walling et *al.*, 2014). Ce modèle est basé sur l'équation ci-après Schuller et *al.*, 2006) :

$$A_{Be}(x) = A_{Be}(0)e^{(-x/h_0)} \quad (1)$$

avec  $A_{Be}(x)$  : activité massique à une profondeur  $x$ (Bq.kg<sup>-1</sup>)

$A_{Be}(0)$  : activité massique à la surface du sol (Bq.kg<sup>-1</sup>)

$x$  : profondeur en unité de masse cumulée (kg.m<sup>-2</sup>)

$h_0$  : profondeur de relaxation (kg.m<sup>-2</sup>)

Pour faire abstraction de l'effet de compactage du sol, la mesure de la profondeur en unité de masse cumulée (kg.m<sup>-2</sup>) est plus appropriée. Cette unité a été systématiquement utilisée dans cette étude.

La profondeur de relaxation décrit la distribution initiale du <sup>7</sup>Be dans le sol. La valeur de relaxation  $h_0$  est déterminée sur le site de référence, de manière à ce que 63% du <sup>7</sup>Be soient retenus entre 0 et  $h_0$  de profondeur. Plus la valeur de  $h_0$  est élevée, plus la pénétration du <sup>7</sup>Be dans le sol est profonde (Zapata, 2002).

L'inventaire de référence  $I_{Be,ref}$  représente l'activité surfacique initiale du site de référence.

$$I_{Be,ref} = \int_0^{\infty} A_{Be}(x)dx = h_0 A_{Be}(0) \quad (2)$$

A partir de l'équation 2, l'inventaire  $I_{Be}(x)$  en dessous de la profondeur  $x$  pour la distribution initiale est égale à :

$$I_{Be}(x) = \int_x^{\infty} A_{Be}(x)dx = h_0 A_{Be}(0)e^{(-x/h_0)} \quad (3)$$

A la profondeur de relaxation  $h_0$ , on a :

$$I_{Be}(h_0) = 0,368 I_{Be,ref} \quad (4)$$

Supposons que l'érosion déplace une partie de la couche de sol de profondeur  $h$  à un point donné. L'inventaire du <sup>7</sup>Be restant à ce point, noté  $I_{Be}(x)$ , doit être inférieur à celui de référence  $A_{Be,ref}$ . La masse de sol érodé  $R_{Be}$  (kg.m<sup>-2</sup>) est égale à la profondeur  $h$  déplacée. En définissant  $x = h$  dans l'équation 3, on a :

$$I_{Be}(h) = \int_h^{\infty} A_{Be}(x)dx = h_0 A_{Be}(0)e^{(-h/h_0)} = I_{Be,ref} e^{(-h/h_0)} \quad (5)$$

Le taux d'érosion est alors calculé par la formule suivante :

$$R_{Be} = h = h_0 \ln \frac{I_{Be,ref}}{I_{Be}} \quad (6)$$

Avec  $R_{Be}$  : taux d'érosion ( $\text{kg.m}^{-2}$ )

$I_{Be}$  : inventaire à un point donné sur le site d'étude ( $\text{Bq.m}^{-2}$ )

$I_{Be,ref}$  : inventaire moyen du site de référence ( $\text{Bq.m}^{-2}$ )

$h_0$  : profondeur de relaxation ( $\text{kg.m}^{-2}$ )

$h$  : profondeur de sol érodé ( $\text{kg.m}^{-2}$ )

Lorsque l'inventaire du  $^7\text{Be}$  est supérieur à celui de référence  $I_{Be,ref}$ , il y a une déposition nette du sol. La masse de sol déposé par unité de surface  $R'_{Be}$  ( $\text{kg.m}^{-2}$ ) est égale à :

$$R'_{Be} = \frac{I_{Be} - I_{Be,ref}}{A_{Be,d}} \quad (7)$$

Avec  $R'_{Be}$  : taux de déposition ( $\text{kg.m}^{-2}$ )

$I_{Be}$  : inventaire à un point donné sur le site d'étude ( $\text{Bq.m}^{-2}$ )

$I_{Be,ref}$  : inventaire moyen du site de référence ( $\text{Bq.m}^{-2}$ )

$A_{Be,d}$  : activité massique moyenne du  $^7\text{Be}$  dans le sédiment déposé ( $\text{Bq.kg}^{-1}$ )

L'activité massique moyenne du  $^7\text{Be}$  dans le sédiment déposé, notée  $A_{Be,d}$ , peut-être calculée à partir de la formule suivante :

$$A_{Be,d} = \frac{I_{Be,ref}}{\int_S R_{Be} dS} \int_S (1 - e^{-R_{Be}/h_0}) dS \quad (8)$$

où  $S$  est la surface d'origine des sols mobilisés. Pour obtenir le taux de redistribution du sol en  $\text{t.ha}^{-1}$ , la relation de conversion suivante est utilisée :

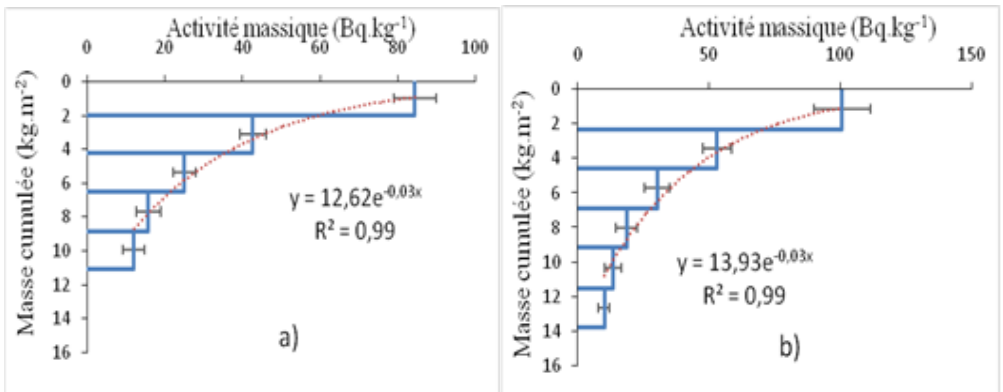
$$1 \text{ t.ha}^{-1} = 0,1 \text{ kg.m}^{-2}$$

Notons que  $h_0$  et  $A_{ref}$  sont les paramètres indispensables au modèle de Profil de Distribution.

## RESULTATS ET DISCUSSION

### Distribution en profondeur du $^7\text{Be}$ sur le site de référence

Durant la 1<sup>ère</sup> descente, les activités massiques du  $^7\text{Be}$  varient de  $11,05 \pm 3,23 \text{ Bq.kg}^{-1}$  à  $84,41 \pm 5,49 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Le  $^7\text{Be}$  est détectable jusqu'à la profondeur de 1 cm du sol. Durant la 2<sup>ème</sup> descente, ces activités du  $^7\text{Be}$  varient de  $10,14 \pm 2,13 \text{ Bq.kg}^{-1}$  à  $100,73 \pm 10,66 \text{ Bq.kg}^{-1}$ . Le  $^7\text{Be}$  est alors détectable jusqu'à la profondeur de 1,2 cm du sol. La figure 7 montre les profils en profondeur du  $^7\text{Be}$  sur le site de référence.



**Figure 7** : Profil en profondeur de  $^7\text{Be}$  sur le site de référence lors de a) la 1<sup>ère</sup> descente et b) la 2<sup>ème</sup> descente

L'activité du  $^7\text{Be}$  décroît exponentiellement suivant la profondeur du sol. Elle est maximale dans la première couche superficielle (0 - 2 mm de profondeur). La forme exponentielle du profil de  $^7\text{Be}$  confirme que le site de référence n'est pas perturbé après les événements de pluie et avant les travaux de prélèvement. Les profondeurs de relaxation  $h_0$  obtenues sont respectivement de  $4,6 \text{ kg.m}^{-2}$  au début de la saison des pluies et  $5,0 \text{ kg.m}^{-2}$  pendant la saison des pluies. Blake et *al.*, (1999) ont obtenu une valeur de  $h_0 = 5,4 \text{ kg.m}^{-2}$  sur un site cultivé en Argentine. Schuller et *al.*, (2006) ont publié une valeur de  $h_0 = 2,1 \text{ kg.m}^{-2}$  sur un site reboisé en Chili. Sepulveda et *al.*, (2008) ont rapporté une valeur de  $h_0$  égale à  $3,4 \text{ kg.m}^{-2}$  sur un site cultivé en Chili. Esquivel et *al.*, (2017) ont mesuré  $h_0 = 43,4 \text{ kg.m}^{-2}$  sur un petit bassin-versant ayant un sol de type sablonneux au Brésil. Juan Pablo et *al.*, (2018) ont déterminé une profondeur de relaxation égale à  $5,8 \text{ kg.m}^{-2}$  sur un site cultivé en Argentine. Ainsi, sauf pour le type de sol sablonneux, nos valeurs sont relativement similaires aux différents résultats sur sites cultivés trouvés ailleurs.

### Inventaire de référence

Les inventaires déterminés lors de la 1<sup>ère</sup> descente varient de  $370 \pm 56 \text{ Bq.m}^{-2}$  à  $501 \pm 36 \text{ Bq.m}^{-2}$ , avec une moyenne de  $431 \pm 49 \text{ Bq.m}^{-2}$ . Ceux obtenus lors de la 2<sup>ème</sup>

descente sont compris entre  $448 \pm 48 \text{ Bq.m}^{-2}$  et  $599 \pm 56 \text{ Bq.m}^{-2}$  avec une moyenne égale à  $530 \pm 50 \text{ Bq.m}^{-2}$  (Tableau 1).

**Tableau 1** : Inventaire du  $^7\text{Be}$  sur le site de référence

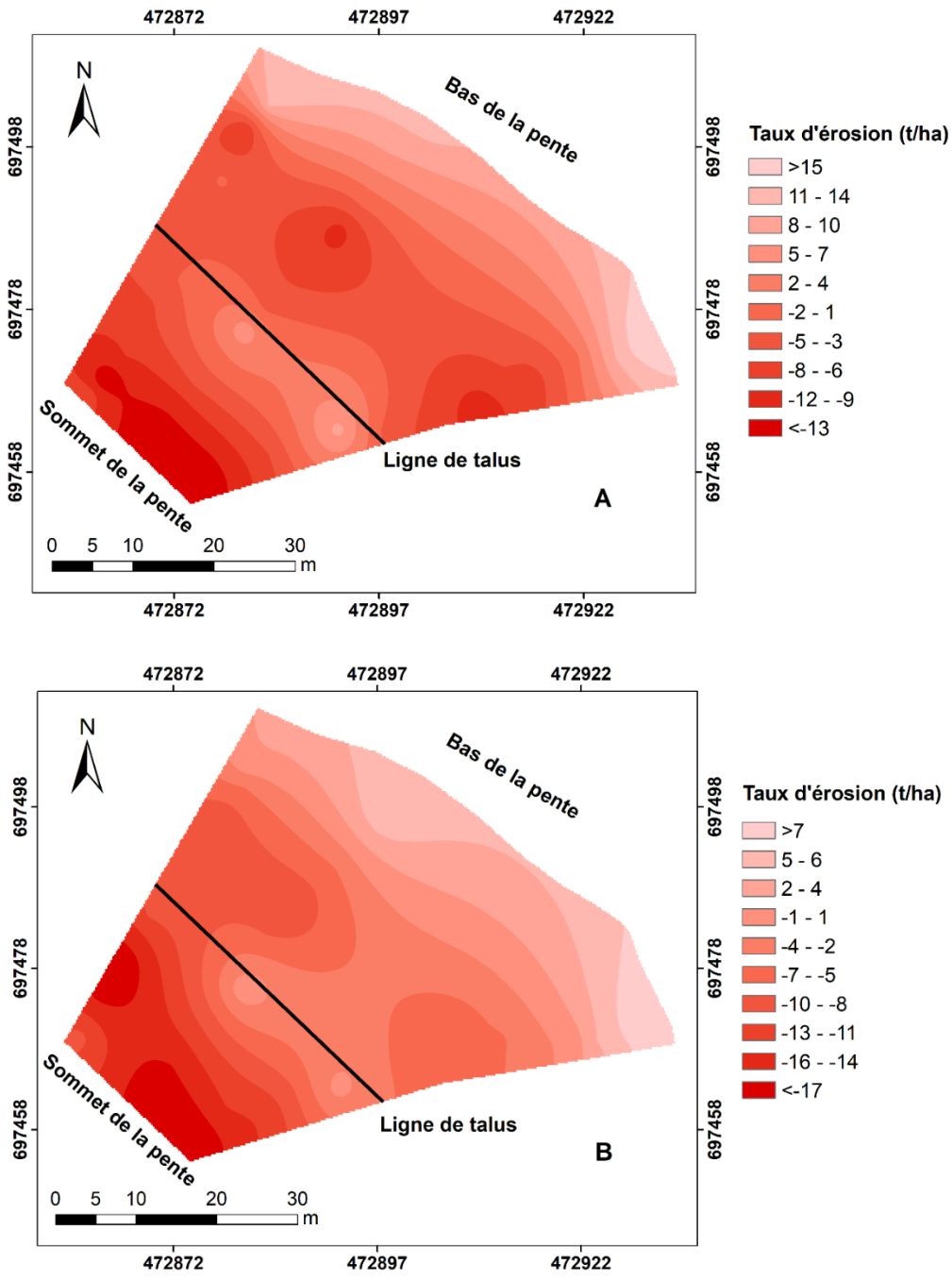
Lieu	Référence	Nombre de valeurs	Inventaire de référence ( $\text{Bq.m}^{-2}$ )		
			Moyenne	Min - Max	CV (%)
Andranomanelatra	1 <sup>ère</sup> descente	10	$431 \pm 49$	370 - 501	11
	2 <sup>ème</sup> descente	10	$530 \pm 50$	448 - 599	9

Selon Mabit et *al.*, 2014, les coefficients de variation, qui sont inférieurs à 30% sont considérés comme faibles. Cela signifie que le site de référence choisi est stable et plat. L'inventaire de référence lors de la 1<sup>ère</sup> descente est proche de la valeur trouvée, au Chili, par Sepulveda et *al.*, 2008, tandis que celui obtenu lors de la 2<sup>ème</sup> descente est proche de la valeur obtenue, au Chili, par Schuller et *al.*, 2006. Les inventaires moyens trouvés concordent avec les résultats obtenus par JuriAyub et *al.*, 2009, qui est d'environ  $600 \text{ Bq.m}^{-2}$  durant la saison des pluies.

L'activité du  $^7\text{Be}$  déposé à la surface du sol est fonction de la quantité et fréquence des précipitations (JuriAyub et *al.*, 2009, Jha, 2012). Cette activité devient non détectable après environ 5 mois, ce qui correspond à 3 fois la période radioactive du  $^7\text{Be}$  (Blake et *al.*, 1999, Sepulveda et *al.*, 2008). Les inventaires du  $^7\text{Be}$  obtenus sur le site de référence durant les deux descentes correspondent aux événements de pluie du mois de novembre jusqu'au 17 décembre 2018 (figure 4a), et du mois de novembre 2019 jusqu'au 3 mars 2020 (figure 4b). Il est à noter, qu'à chaque événement de pluie, la contribution du  $^7\text{Be}$ , diminue progressivement après dépôt à la surface du sol, autrement dit, plus l'évènement de pluie s'éloigne plus l'activité du  $^7\text{Be}$  restant dans le sol diminue et plus la contribution au calcul du taux d'érosion/dépôt est faible. Cet aspect est mentionné dans l'hypothèse 1.

### Taux de redistribution du sol

Durant la 1<sup>ère</sup> descente, les taux d'érosion varient de  $0,44$  à  $17,32 \text{ t.ha}^{-1}$ , et les taux de dépôt de  $6,82$  à  $17,47 \text{ t.ha}^{-1}$ . Ils sont respectivement de  $1,69$  à  $25,12 \text{ t.ha}^{-1}$ , et de  $1,76$  et  $13,30 \text{ t.ha}^{-1}$  durant la 2<sup>ème</sup> descente. Les distributions spatiales de l'érosion sur le site d'étude déterminées lors des deux descentes sont présentées sur la figure 8 a) et 8 b).



**Figure 8 :** Redistribution de l'érosion de sol pour  
 a) la 1<sup>ère</sup> descente et b) la 2<sup>ème</sup> descente

Les taux d'érosion sont élevés en haut de la pente et diminuent à mesure qu'on descend. Sur la partie basse de la pente, il y a dépôt de sédiments. Cependant, il est à noter que des dépôts apparaissent aussi au milieu de la pente. Cela peut s'expliquer par le système de terrasse, avec un talus qui casse le mouvement descendant des sols au milieu de la pente. La zone érodée couvre 77% des parcelles étudiées et celle de dépôt 23%.

L'érosion nette traduit le taux d'érosion à partir du site d'étude. D'après l'hypothèse 1, l'érosion nette de la 1<sup>ère</sup> descente, égale à 2,88 t.ha<sup>-1</sup>, correspond à la période de début de pluie du 7 novembre jusqu'au 12 décembre 2018, c'est-à-dire 255 mm de précipitation durant 27 jours. Les cultures sur parcelles sont le maïs, le haricot et le manioc, cultivés sur le site environ 2 mois auparavant. L'érosion nette de la 2<sup>ème</sup> descente, égale à 7,55 t.ha<sup>-1</sup>, correspond à la période des pluies, qui s'étale du 6 décembre 2019 jusqu'au 3 mars 2020, c'est-à-dire 694 mm de précipitation durant 47 jours. Cette dernière date correspond à la fin de la saison des pluies. Les cultures sur parcelles sont alors le manioc et l'arachide. Ces plantes ont été cultivées environ 5 mois auparavant.

L'érosion nette de la 2<sup>ème</sup> descente est supérieure à celle de la 1<sup>ère</sup> descente. Cette différence peut s'expliquer d'une part par la quantité et la fréquence élevées de pluie précédant la 2<sup>ème</sup> descente, par rapport à celles précédant la 1<sup>ère</sup> descente (Figures 4a et 4b). En effet, lorsque la quantité et la fréquence de pluie augmentent, le sol devient rapidement compact. Or, la compaction réduit la capacité d'infiltration et intensifie l'écoulement d'eau en surface. D'où, l'augmentation de la redistribution des sols en surface (Fournier, 1969). Et d'autre part, par la couverture végétale qui peut aussi jouer un rôle. Une parcelle couverte de manioc est plus sensible à l'érosion par rapport à celle couverte par d'autres cultures. Ceci est dû au large espacement utilisé et à la croissance lente initiale du manioc (Howeler, 2017).

Le taux de sédiment transporté hors du site (SDR : Sediment Delivery Ratio) est mesuré par le rapport du taux d'érosion nette et du taux d'érosion brute. Il montre la quantité de sédiment sortant du champ étudié (Zapata et al., 2002). Le SDR est égal à 52 % durant la 1<sup>ère</sup> descente et 82 % durant la 2<sup>ème</sup> descente (Tableau 2). Cette augmentation est en relation directe avec l'explication précédente.

**Tableau 2** : Bilan de la redistribution des sols

	1 <sup>ère</sup> descente	2 <sup>ème</sup> descente
Erosion moyenne (t.ha <sup>-1</sup> )	-7,20	-11,99
Déposition moyenne (t.ha <sup>-1</sup> )	11,68	7,44
Erosion brute (t.ha <sup>-1</sup> )	-5,55	-9,25
Déposition brute (t.ha <sup>-1</sup> )	2,67	1,70
Erosion nette (t.ha <sup>-1</sup> )	-2,88	-7,55
SDR (%)	52	82
Zone érodée (%)	77	77
Zone de déposition (%)	23	23

Selon Pablo de Rosas et al., 2018, on peut classer le phénomène d'érosion, selon la perte en sol annuelle (Tableau 3).

**Tableau 3** : Classification de l'érosion du sol

Classe de l'érosion	Valeur de l'érosion (t.ha <sup>-1</sup> .an <sup>-1</sup> )
Faible	<20
Moyenne	20 – 100
Forte	100 – 300
Sévère	>300

Un rapprochement de cette classification annuelle aux deux périodes d'évènements érosifs, qui sont de 1 à 3 mois, peut permettre de conclure que les érosions nettes de la 1<sup>ère</sup> descente et de la 2<sup>ème</sup> descente sont considérées comme moyenne.

L'étude précédente de l'érosion à Andranomanelatra, utilisant la technique du <sup>210</sup>Pb<sub>ex</sub>, a trouvé une valeur égale à 7,13 t.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> (Rasolonirina, 2016). Le résultat de l'étude annuelle, utilisant la technique du <sup>7</sup>Be, obtenu durant la 2<sup>ème</sup> descente

(tableau 2) est proche de la valeur précédente. Nous pouvons alors en déduire que l'érosion du sol à Andranomanelatra durant l'année se produit principalement durant la saison des pluies.

## CONCLUSION

Les résultats obtenus confirment la potentialité du  $^7\text{Be}$  à l'étude de l'érosion du sol liée à une courte-période de pluie (<6 mois) sur un site agricole. Ces résultats montrent que l'érosion nette obtenue au début de la saison des pluies est faible par rapport à celle obtenue pendant la saison des pluies. Ceci indique que les précipitations constituent un agent causal de l'érosion. A cet effet, le niveau de précipitation joue un rôle important dans le phénomène d'érosion des sols.

Cette technique du  $^7\text{Be}$  peut être utilisée pour évaluer l'impact du premier événement de pluie après une longue période sèche d'environ 5 mois. Appliquée sur un site d'expérimentation en parcelles d'érosion, elle peut être utilisée pour déconvoluer les contributions des facteurs de l'érosion. Finalement, l'utilisation à bon escient de cette technique permet d'aider à l'élaboration de pratiques agricoles, de conservation des sols, et de suivre son efficacité.

## Remerciements

Je remercie les paysans locaux qui ont accepté l'accès à leurs parcelles agricoles. Je suis reconnaissant à l'INSTN-Madagascar pour les appuis logistique et administrative dans les activités de recherche. Je remercie également l'AIEA pour les appuis techniques et matériels offerts dans le cadre des projets du programme de Coopération Technique.

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1) Andrews J.E., Hartin C., Buessler K. O. (2008).  *$^7\text{Be}$  analyses in seawater by low background gamma-spectroscopy*. Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry Vol 277, No.1, 253-259.
- 2) Arnold and Al-salih(1955). *Beryllium-7 produced by Cosmic Rays*. Institute for Nuclear Studies, University of Chicago, Chicago, Illinois
- 3) Blake W.H., Walling D.E., He Q. (1999). *Fallout beryllium as a tracer in soil erosion investigations*. Applied Radiation and Isotopes 51, 599-605.
- 4) He, Q. & Walling, D.E. (1997). *The distribution of Fallout  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}$  in Undisturbed and Cultivated Soils*. Appl. Radiat. Isot. Vol. 48, No. 5, pp. 677-690.
- 5) Howeler R. H. (2017). *Does cassava cultivation degrade or improve the soil?* Research Gate, 320 - 354.

- 6) Ioannidou A., Manolopoulou M., Papastefanou C. (2005). *Temporal changes of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$  concentrations in surface air at temperate latitudes (40 N)*. Appl. Radiat. Isotopes 63, 277-284.
- 7) Jha, (2012). *Quantification of short-term erosion rates using the cosmogenic radionuclide  $^7\text{Be}$* , Berlin
- 8) Juan Pablo de Rosas, Alexander Dario Esquivel, Diego Martinez Heimann, Agustin E. Negri, Flavia Lohaiza, Diego Leonardo Valladares, Alejandro L. Zavala, Hugo Huck, Jimena JuriAyub(2018). *Using beryllium-7 to evaluate soil erosion processes in agricultural lands in semiarid regions of Central Argentina*. Environmental Earth Sciences 77:587, 1-9
- 9) JuriAyub J., Di Gregorio D. E., Velasco H., Huck H., Rizzotto M., Lohaiza F. (2009), *Short-term seasonal variability in  $^7\text{Be}$  wet deposition in a semiarid ecosystem of central Argentina*. Journal of environmental Radioactivity 100, 977-981.
- 10) Mabit L., Benmansour M., Walling D.E. (2008). *Comparative advantages and limitations of the fallout radionuclides  $^{137}\text{Cs}$ ,  $^{210}\text{Pb}_{ex}$  and  $^7\text{Be}$  for assessing soil erosion and sedimentation*. Journal of environmental Radioactivity 99, 1799-1807.
- 11) Mabit L., Benmansour M., Bernard C., Fulajtar E., Walling D.E.  $^{137}\text{Cs}$ : *A widely used and validated medium term soil Tracer*. In IAEA, 2014, Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil conservation strategies, Vienna. 125-148.
- 12) NavasA., WallingD. E., GASPAR L., MACHIN J. (2008). *Use of Beryllium-7 to assess soil redistribution by erosion in two contrasting Mediterranean environments*. Sediment Dynamics in Changing Environments. IAHS Publ. 325, 43-51.
- 13) OlsenC., Larsen J., LowryP., CutshallN., Todd J., WongG., CaseyW.(1985). *Atmospheric fluxes and marsh-soil inventories of  $^7\text{Be}$  and  $^{210}\text{Pb}$* . J. Geophys. Res. 90, 10487-10495.
- 14) Rabesiranana N., Rasolonirina M., Solonjara A.F., Ravoson H.N., Raelina A., Mabit L. (2016). *Assessment of soil redistribution rates by  $^{137}\text{Cs}$  and  $^{210}\text{Pb}_{ex}$  in a typical Malagasy agricultural field*. Journal of environmental Radioactivity 152, 112-118.
- 15) Rasolonirina M. (2016). *Application du radionucléide de retombée Pb-210 comme traceur de l'érosion de sol à travers des cas des hautes terres malgaches*. Thèse de doctorat, Université d'Antananarivo, p. 4.

- 16) Salisbury, R.T., Cartwright, J. (2005). *Cosmogenic<sup>7</sup>Be deposition in North Wales: <sup>7</sup>Be concentrations in sheep faeces in relation to altitude and precipitation.* J. Environ. Radioact. 78, 353-361.
- 17) Schuller P., Iroumé A., Desmond E., Walling D.E, Hector B. M., Castillo A., Rosa E. T. (2006). *Use of Beryllium-7 to document soil redistribution following forest harvest operations.* Journal of environmental Quality 35, 1756-1763.
- 18) Sepulveda A., Schuller P., Walling D.E., Castillo A. (2008). *Use of <sup>7</sup>Be to document soil erosion associated with a short period of extreme rainfall.* J. Environ. Radioact. 99, 35-49.
- 19) Taylor A., Blake W.H., Couldrick L., Keith-roach M.J. (2012). *Sorption behaviour of beryllium-7 and implications for its use as a sediment tracer.* Geoderma 187, 16–23.
- 20) Wallbrink P.J., Murray A.S. (1994). *Fallout of <sup>7</sup>Be in South Eastern Australia.* J. Environ. Radioact. 25, 213-228.
- 21) Walling D.E., Zhang Y., He Q. *Conversion models and related software.* In IAEA, (2014). *Guidelines for Using Fallout Radionuclides to Assess Erosion and Effectiveness of Soil conservation strategies*, Vienna. 125-148.
- 22) Zapata F. (2002). *Handbook for the Assessment of soil Erosion and Sedimentation Using Environmental Radionuclides,*

## **Référence webiographie**

Infoclimat :

<https://www.infoclimat.fr/observations-meteo/archives/18/mars/2018/antsirabe/67107.html>