

ETUDE DE LA VULNERABILITE DU BASSIN VERSANT DU LAC IHOTRY A L'EROSION EN NAPPE

M. RABARIMANANA¹, R. ANDRIAMASIMANANA², E. RASOLOMANANA³, L. ROBISON⁴

1. École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Département Information Géographique et Foncière, BP1500, Antananarivo 101., rabmamy16@gmail.com

2. Asity Madagascar, rd.andriamasimanana@birdlife-mada.org

3. École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Département Mines, BP 1500, Antananarivo 101, Madagascar, e1rasolo@gmail.com

4. Centre National de Recherches sur l'Environnement, Département Systèmes Aquatiques et Côtiers, BP 1739, robison_laurent@yahoo.fr

RESUME

Madagascar est, de nature, vulnérable aux diverses formes d'érosion dû à sa morphologie, ses types de sol, sa formation végétale dominante et son climat à saisons contrastées. Cependant, peu d'informations sont disponibles pour établir l'intensité sectorielle de l'érosion et l'origine des sédiments. Notre travail consiste à fournir des informations complémentaires sur l'importance et l'origine de l'érosion en nappe dans le bassin versant du Lac Ihotry, menacé par la dégradation progressive de son environnement. L'utilisation du modèle RUSLE, l'interprétation des images de Landsat ETM+ et la mise en place d'une base de données dans un Système d'Information Géographique ont permis de dresser des statistiques et des cartes de l'état actuel de l'érosion. Ces résultats vont permettre de dégager les grandes lignes du plan d'aménagement de la région.

Mots clés : Lac Ihotry, vulnérabilité, érosion en nappe, perte de sol, RUSLE, image Landsat

ABSTRACT

Madagascar being fond of various kinds of erosion because of its morphology, soil type, dominant vegetation and climate. However, few amounts of data are available to establish its sectors situation and sediment source. The purpose is paper to provide sheet erosion intensity of around Ihotry Lake. RUSLE model, satellite image ETM+ interpretation and Geographical Information System database are used to establish statistics and the actual erosion intensity. The result can be used in the local development action plan building.

Key words: Ihotry Lake, vulnerability, sheet erosion, soil loss, RUSLE, Landsat image

Introduction

De part sa taille, le Lac Ihotry avec une superficie de 100 km² est le troisième grand lac de Madagascar après le Lac Alaotra et le Lac Kinkony. Il est inclus dans le Complexe Zones Humides Mangoky-Ihotry, une aire protégée mis en place dans le cadre du Système des Aires Protégées de Madagascar (SAPM). Le bassin versant du lac forme une dépression au sein de la plaine côtière de la côte sud-ouest de Madagascar. Ce bassin comprend une vaste zone de dépôt détritique dont la connaissance du système d'érosion serait une piste de recherche exploitable pour comprendre l'impact des pressions anthropiques sur le système lacustre et la gestion des ressources piscicoles dans la région.

L'objectif du travail est donc de réaliser une modélisation de l'érosion en nappe afin de fournir les informations de base pour l'appui à l'élaboration d'un plan d'aménagement des zones autour du Lac Ihotry.

Pour comprendre le système d'érosion (et de dépôt) dans le bassin, la description du bassin versant étudié ainsi que celle des facteurs d'érosion s'avèrent nécessaires. Elles seront complétées par celle du modèle RUSLE utilisé, suivi de la présentation du résultat obtenu et sa validation. Enfin, des recommandations seront formulées pour appuyer l'établissement d'un plan d'aménagement du site.

Le Bassin Versant du Lac Ihotry

a) Description du site

Le lac Ihotry est un des plus grands lacs de Madagascar. Il est situé dans la région de Morombe, au Sud du delta du Mangoky. Il appartient à un ensemble hydrologique et hydrogéologique de près de 4000 km² situé entre Ankililoaka au Sud et la mer à Nord. Cette zone est bordée à l'Est par les massifs de l'Analavelona et de Mikobaka et à l'Ouest par la forêt des Mikea.

Le haut bassin versant du Lac Ihotry est

occupé par le massif calcaire de Mikobaka dont les altitudes dépassent souvent 800 m. Le réseau hydrographique est dense et bien structuré. Compte tenu du substratum calcaire, les cours d'eau y sont souvent temporaires. Les principales rivières sont la Bevato, le Befandriana, l'Ambory et la Tsivoro. Les écoulements en provenance du massif calcaire se perdent rapidement dans la couverture sableuse à leur arrivée dans la plaine côtière.

Le Lac Ihotry est situé à 150 km au nord de Tuléar dans une vaste cuvette au centre de la zone dite du Bas Mangoky (figure 1) entre les latitudes de 21°36' et 22°24' et les longitudes de 43°30' et 44°24'. La plaine du lac, élément important de la région, est délimitée au Nord-Est par le fleuve Mangoky, à l'Est par la route reliant Tuléar à Morombe, au Sud par la rivière Befandriana et à l'Ouest par la dune de la côte sud-ouest.

Dans cette dernière zone à faibles pentes, couverte de formations sableuses avec développement d'un système dunaire notamment au Nord et à l'Ouest du lac Ihotry.

Le réseau hydrographique est peu structuré. Les écoulements y sont temporaires et il est possible qu'en fonction de la localisation et de l'intensité des averses les écoulements changent de direction.

Dans ce contexte, le tracé du bassin versant du lac Ihotry ne peut être qu'approximatif au niveau de la plaine côtière (Est et Sud). Deux tracés du bassin versant, effectués à partir des cartes topographiques au 1/100 000^{ème} sont proposés :

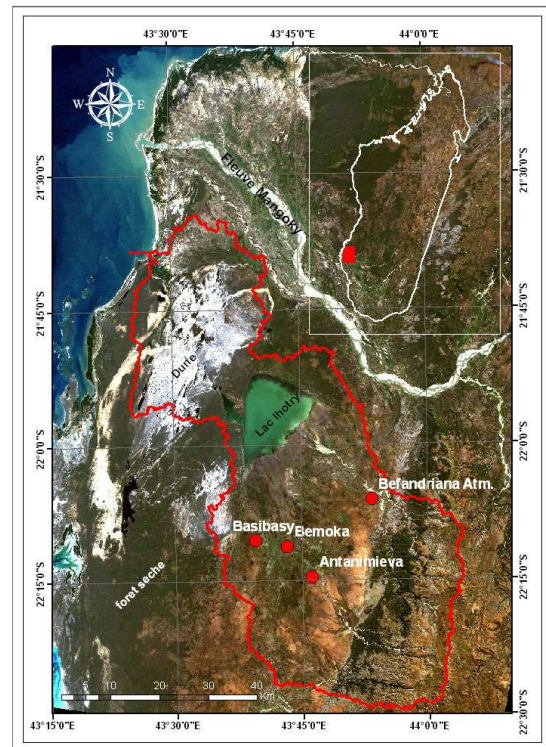


Fig. 1 Carte de délimitation des bassins versants du Lac Ihotry

- le premier qui passe par Antanimieva donne un bassin versant d'une superficie d'environ 1890 km².
- le second qui passe au sud de Betsioky correspond à la limite entre les directions d'écoulements (Sud et Nord). Avec ce tracé la superficie du bassin versant est de 2660 km².

Le Lac Ihotry est situé dans la zone semi-aride de Madagascar. Le bassin versant du lac, d'une superficie de 340000ha, est caractérisé par une pluviosité de 700mm et une température moyenne de 24°C. La saison de pluie, s'étend du début du mois de décembre jusqu'à la fin du mois de février, c'est également la période de forte chaleur (40°C) et de forte évaporation. La saison sèche s'étend du mois de mai à septembre. Cette période correspond à la saison fraîche dont la température peut tomber jusqu'à 15°C la nuit.

La végétation dominante est une formation de forêts sèches caducifoliées évoluant vers un fourré épineux. Elle possède des différents habitats, hébergeant une multitude d'espèces endémiques menacées (Songadina, 2010).

La population de la région est estimée à 25000 habitants, avec une densité moyenne de 2 à 5 hab/km² en 1967 (Dandoy, 1968). Elle est en

majorité cultivateur (manioc, maïs et riz) et se concentre dans cinq villages : Befandriana, Antanimiheva, Bekipay, Bemoka et Basibasy. La géologie de la région permet d'expliquer l'origine du lac et d'étudier son évolution.

b) Origine du Lac

Le Lac Ihotry est un lac fermé sans exutoire de surface et dont les eaux sont saumâtres à salées. Il s'est installé à l'Est du barrage dunaire sur une zone d'effondrement d'origine tectonique. Il comprend une partie occidentale formant un diverticule constamment immergé d'eau et une vaste zone centrale qui n'est complètement inondée qu'en fin de saison des pluies (mois de mars). Ce lac est reconnu par le phénomène de fluctuation assez rapide de sa profondeur ainsi que l'étendu de sa zone de retrait. D'après les données publiées et les observations effectuées entre 1965 et 1975 (Moreau, 1982), pendant la période de crue, l'eau atteint la cote maximale de 48m. En période d'étiage, il y a une perte de 2,5m d'eau pour atteindre la cote de 45,5m.

En saison des pluies, l'alimentation en eau du lac se fait vers l'Est par la rivière Befandriana et vers l'Ouest par une série de petites rivières parallèles. Selon Ségalen et Moureaux (1948), l'alimentation permanente serait due à des résurgences dans le diverticule Ouest ou à des sources situées à l'ouest qui alimentent des ruisseaux. La troisième hypothèse étant, l'intercommunication entre les différentes nappes phréatiques (Rasolomanana et *al.*, 1997). Une bonne partie de l'eau serait ensuite absorbée par les formations sableuses, le reste alimente le Lac Ihotry.

Les sables roux, connus sous le terme de carapace sableuse, constituent la formation sédimentaire dominante dans la région (Besairie, 1956). Epais d'une cinquantaine de mètres, ils sont souvent imprégnés d'eau en formant une nappe secondaire. Ces formations se reposent sur des calcaires marneux parfois gréseux daté de l'éocènes. De haut en bas, on trouve ensuite la succession de la lithologie suivante :

- un banc de grès constituant l'aquifère ;
- un niveau constitué de marnes argileuses ;
- une assise d'argilites dans la partie orientale et de marnes dans la partie occidentale.

Les sédiments lacustres sont globalement argilo-calcaires et recouverts par des vases récentes.

Modélisation de l'érosion

Cette étude concerne uniquement l'érosion en nappe malgré l'importance de l'érosion éolienne dans le Sud-ouest de l'île. La méthodologie de l'étude s'appuie sur l'utilisation du modèle USLE ou « Universal Soil Loss » suivant l'équation $A = RKL_sCP$ (1) comme moyen de calcul des pertes de sol sur le bassin versant (Wishmeier et Smith, 1960-1978). Cette relation comprend : la perte de sol (A), l'érosivité de la pluie (R), l'érodibilité du sol (K), le facteur topographique (L_s), le couvert végétal (C) et l'indice de pratiques antiérosives (P).

La méthode de calcul de certains paramètres de l'équation (1) a été modifiée pour tenir compte de l'évolution du concept et le manque de données dans certaines régions telles que le Sud de Madagascar. On est alors dans le cas du modèle RUSLE ou « Revised Universal Soil Loss Equation » (Renard et *al.* 1997).

Le calcul de la valeur moyenne de l'érosivité des pluies (R) dans cette étude utilise l'équation (2) de Rango et Arnoldus (1987), formule alternative n'impliquant que les précipitations mensuelles et annuelles, seule condition réalisable dans le Sud malgache.

$$\text{Log}(R) = 1,74\text{Log}(\sum P_i^2/P) + 1,29 \quad (2)$$

avec :

R : Coefficient d'érosivité moyenne de pluie (MJ.mm/ha/h/an)

P_i : Précipitations moyennes mensuelles (mm)

P : Précipitations moyennes annuelles (mm)

Cette équation autorise l'utilisation de la base de données mondiale « worldclim » (Hijmans et *al.*, 2005). Cette base offre la possibilité de calcul du paramètre R, directement dans un SIG, avec une maille spatiale de 1km.

Le calcul de l'érodibilité des sols (K) à partir d'un échantillon de sol nécessite des données sur la granulométrie, la texture, le taux des matières organiques et la perméabilité de diverses unités pédologiques d'une zone d'étude. Dans le cas de la région d'Ihotry, ces

unités de sol sont issues de la carte pédologique (MRSTD-CNRE, 1991-1992), la carte est ensuite ajustée par le traitement des images ETM+ de Landsat de l'année 1999 et 2005 pour compléter sa partie sud (figure 2). L'évaluation du facteur K, a été effectuée, par analogie, à partir des travaux antérieurs, faute de mesures directes. L'érodibilité des sols (K) mesurée sur place (Malvos et Bailly, 1976), ajustée par celui de (Roose et Sarrailh, 1990), Ranivoson (2008) a permis de fixer la valeur par types. On a attribué pour chaque type de sol les valeurs d'érodibilité suivantes :

| K | Unités pédologiques |
|--------|---------------------------------------|
| 0.1623 | Sol peu évolué d'apport colluvial |
| 0.1710 | Sol hydromorphe humifère |
| 0.0000 | Plan d'eau |
| 0.2300 | Sol ferrugineux tropical sur sable |
| 0.2200 | Sol calcaire et lithosols sur marne |
| 0.2500 | Sol ferrugineux brûlant sur basalte |
| 0.3000 | Sol ferrugineux tropical sur calcaire |

Le facteur topographique (L_s) dont S est la pente (%) et L la longueur des pentes (mètre), ont été calculés à partir du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de GDEM au pas de 30m. Pour adapter la formule empirique initiale aux conditions de terrain en montagne avec une topographie complexe, la formule de Moore et Burch (1986a,b), en particulier, fait intervenir une aire d'accumulation et la pente qui rend son utilisation adaptée à l'utilisation du SIG et du MNT. On obtient alors la formule (3) suivante:

$$LS = (\text{Flow Acc} * \text{pas du MNT}/22.13)^{0.4} * (\sin \text{Pente}/0.0896)^{1.3} \quad (3)$$

Avec :

- Flow Acc : « Flow Accumulation »
- Pas du MNT : 30m

Le couvert végétal (C) a été estimé en utilisant les images satellites Landsat TM et ETM+ prise entre 1993 et 2000 (De Jong et al., 1998). Pour passer du NDVI (Normalised Difference Vegetation Index) au facteur C , De Jong et al. (1998) utilise la relation (4) suivante pour estimer le facteur C .

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

L'indice de pratiques antiérosives (P) est considéré comme inexistant.

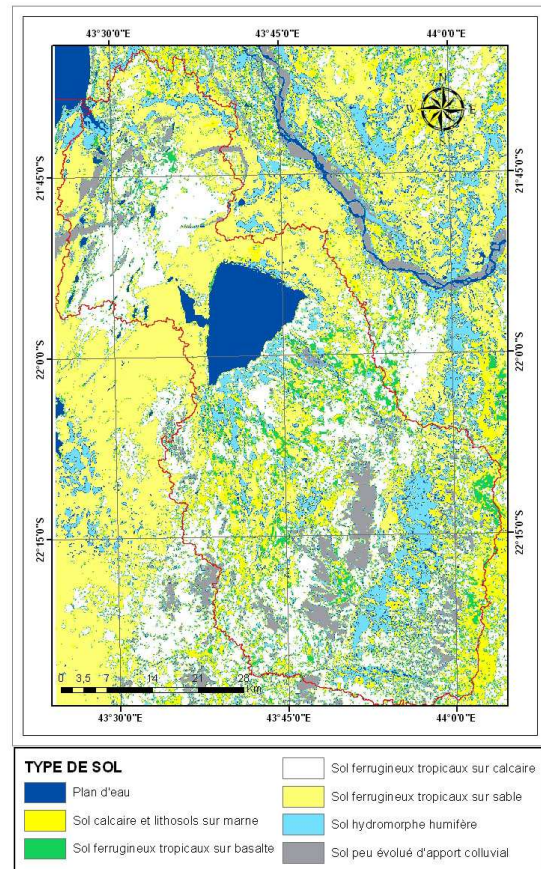


Fig.2 Carte pédologique issue de l'image Landsat

Le but étant de déterminer les zones à risques potentiels et in fine les zones où un aménagement antiérosif pourrait s'avérer nécessaire. On a donc pris comme hypothèse l'absence totale de dispositifs antiérosifs dans le bassin. Par conséquent on a fixé la valeur de P à 1.

L'intégration de ces facteurs de RUSLE sous forme de base de données dans un SIG a permis le calcul des pertes de sol (A en T/ha/an) et la présentation des résultats sous forme de cartes. Une classification des pertes de sol à l'aide de l'histogramme a été faite pour faciliter l'interprétation du résultat.

Situation de l'érosion dans le bassin versant

Le modèle RUSLE a permis de dresser la carte actuelle du risque d'érosion en nappe dans le bassin versant du Lac Ihotry. D'après les

statistiques de l'image, l'érosion potentielle maximale peut atteindre 13T/ha/an. La moyenne de l'ensemble du bassin est de 2,56T/ha/an avec un écart-type de 2,43.

La carte de l'érosion potentielle est un outil d'aide à l'identification des secteurs les plus vulnérables dans le bassin. Pour faciliter la lecture de la carte, nous avons classé le résultat en trois catégories suivant les valeurs identifiables sur l'histogramme de l'image de pertes en sol.

La première classe (0 à 2t/ha/an) correspond à la zone de vulnérabilité nulle (en verte) et concerne principalement les plans d'eau et le massif calcaire se trouvant à l'Est de Befandriana Sud.

La deuxième classe (2 à 5t/ha/an) est une zone potentiellement vulnérable (en bleu). La zone est sous une couverture végétale naturelle ou artificielle (diverses cultures). La nature du sol est généralement du sable roux non consolidé.

La troisième catégorie (5 à 13t/ha/an) est la zone qui fournit la totalité des sédiments actuels (en rouge). La zone à risque est constituée de divers types de sols nus tel que les dunes, sable de calcaire, sable roux, zone d'altération de dalles calcaires et des tavy.

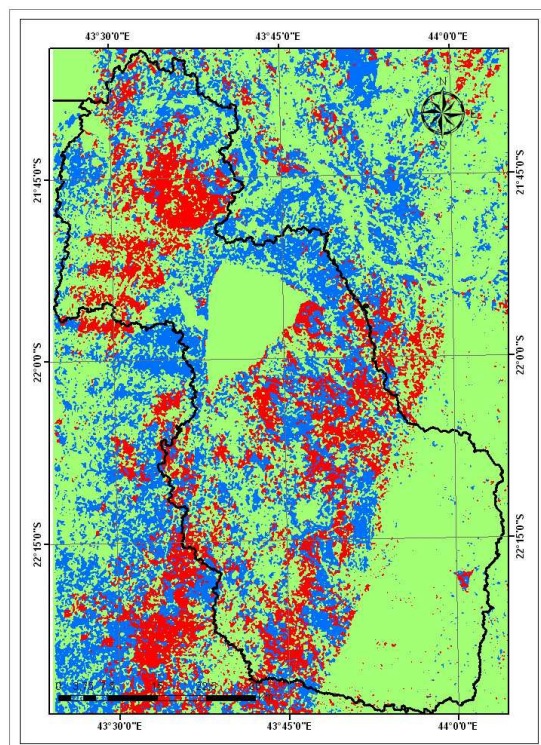


Fig.3 Carte de vulnérabilité du bassin

Ces résultats doivent être complétés par diverses coupes pour bien comprendre le risque encouru par le lac.

La coupe AB orientée Nord-Ouest, Sud-est dont le début est la Cote Ouest (A) en passant par le Lac Ihotry (b) jusqu'à la falaise (B) à l'Est de Befandriana Sud (figure 4), montre que ce lac est situé dans une dépression. C'est une zone normale de sédimentation dont l'allure et l'évolution du profil topographique favorisent le comblement total du lac. Le point (a) constitue une barrière de dunes de sable riche en calcaire, zone sensible à l'érosion d'après les résultats du calcul de pertes en terres.

L'équilibre ici, est maintenu jusqu'ici grâce à la présence de forêt sèche entre le Lac Ihotry et la dune. La comparaison des images de Landsat entre 2000 et 2005 confirme l'augmentation de la zone de défrichement (*hatsaka*) de la forêt sèche qui risque à moyen terme de rompre cet équilibre.

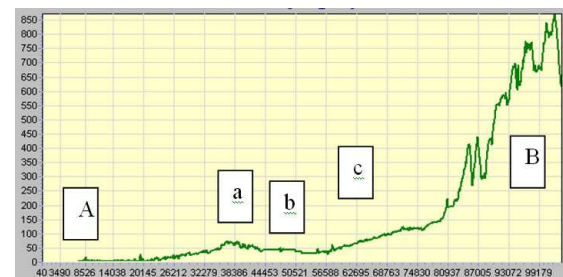


Fig.4 Profil topographique suivant AB

La zone, légèrement en pente (bc), correspondant à la zone agricole, le long de la rivière Befandriana, est également vulnérable.

Validation des résultats

L'érosion du sol se fait sentir malgré la perte de sols potentielle relativement modeste (0 à 13T/ha/an). Elle est démontrée par la comparaison de deux images satellites Landsat prises en 2000 et 2005 presque à la même période de l'année (figure 5).

Jun 2000

Avril 2005

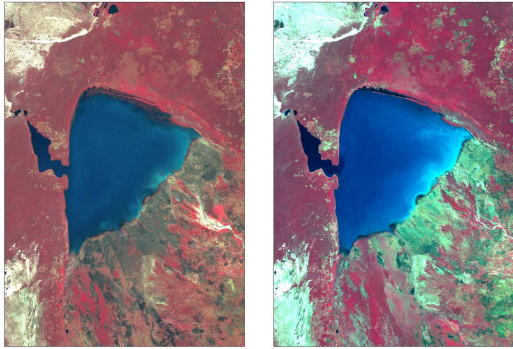


Fig. 5 Evolution de la situation en cinq ans

Le risque d'érosion est donc réel même si elle est imperceptible sur le terrain. L'eau trouble en bleu clair sur l'image de l'année 2005, indique l'apport de sédiments dans le lac et montre l'importance de l'érosion dans la partie orientale du bassin. Cependant, le décalage entre la prise de vue offre d'autres possibilités d'explication telle que le retrait du lac. Ce retrait, laisse apparaître la vase au fond du lac et probablement source de l'érosion des berges suivie du comblement de la partie orientale du lac. En tout cas, la partie orientale est beaucoup plus vulnérable que la partie occidentale malgré la nuance de réflectance due à l'effet atmosphérique et au traitement de l'image.

Les mesures directes de l'accumulation des sédiments réalisées par des scientifiques sur quelques bassins versants de 150 à 180ha situés dans la région d'Antanimora donne un taux de pertes en sol de 6T/ha/an (Benoit de Coignac et *al.*, 1971). L'auteur a pris comme référence les travaux de Fournier qui a fait une estimation des pertes en sol entre 6 à 10T/ha/an. Ces mesures antérieures donnent une idée globale non spatialisée des pertes de sol pour la zone semi-aride du Sud de Madagascar avec une érosivité moyenne (R) de 230 (MJ.mm/ha/h/an). Ces données constituent les seuils maximum de référence dans cette région. Les parties non érodables du bassin (plan d'eau, rocher, etc...) ont la valeur nulle. On peut en déduire alors que le taux d'érosion valable pour notre zone d'étude est de 0 à 10T/ha/an.

Le taux d'érosion de 0 à 13T/ha/an estimé par la présente recherche semble acceptable même avec un léger décalage par rapport aux seuils de référence. Selon, Bohn (1998), la précision de mesures pour l'estimation de pertes de sols

est de l'ordre de 20%. Avec le cumul des erreurs par étape, la somme peut dépasser même les 100%.

Le facteur de décalage est probablement la distance qui sépare le lieu de référence et le bassin étudié. Antanimora est situé à des centaines de kilomètres au Sud-est du Lac Ihotry (climat plus aride). Il faudrait souligner également qu'il s'agit ici de mesurer uniquement l'érosion en nappe. Ainsi, le modèle ne permet pas de prédire la fréquence des mouvements de masse et les coulées boueuses, cas probable dans le cas de terrain soumis à des mouvements tectoniques comme la région du Lac Ihotry. L'effet de l'aménagement agricole n'est pas non plus inclus dans ce modèle. Ceci concerne les pratiques telles que le terrassement et le drainage de surface. Bien que ces opérations puissent être incluses dans le facteur, l'effet pratique de l'exploitation agricole est presque impossible à estimer à notre échelle. Ce qui laisse une incertitude dans le calcul du taux réel de l'érosion.

Conclusion

Dans cette étude, on a analysé l'évolution de l'érosion dans le bassin versant d'Ihotry en utilisant le modèle d'érosion RUSLE.

Le résultat obtenu permet d'obtenir des informations qui aident à comprendre l'évolution de l'érosion et de la vulnérabilité du bassin du Lac Ihotry. Il faudrait donc tenir compte de tous les paramètres sus-cités pour proposer un plan d'aménagement valable.

Ce plan d'aménagement de la zone repose sur deux points essentiels :

- la conservation de la forêt sèche de la partie occidentale
- la mise en place des dispositifs anti-érosifs (drainage, stabilité des versants, ...) dans la partie orientale

Dans la partie occidentale du lac, la forêt sèche fait partie de la forêt de Mikea. Cette dernière en passe d'obtenir le statut de parc national (NAP) constitue une sorte de haie vive pour empêcher la progression de la dune vers l'Est, vers le Lac Ihotry. La forêt de Mikea est donc un élément très important pour la préservation du lac. Ainsi, la conservation du Lac Ihotry dépend de la réussite de la conservation de la forêt de Mikea. Cependant, le tavy commence

à gagner du terrain dans cette partie occidentale du lac et qu'il faudrait empêcher par tous les moyens sa propagation vers la dune.

Dans la partie orientale, malgré la pente faible, il faudrait penser aux dispositifs anti-érosifs. Les bas-fonds sont souvent aménagés en terrain de culture, ce qu'on propose, c'est d'améliorer le système d'exploitation de ces terrains. Au Sud de Befandriana, une zone de reboisement existait du moins jusqu'aux années soixante. La rive droite du lac devrait être faire l'objet également de reboisement avec des espèces adaptées à la forte salinité du sol de la zone.

Ce résultat reste encore empirique mais se rapproche des résultats des travaux effectués sur le terrain. On peut dire que pour un tel objectif de recherche, le SIG pourrait bien remplacer les travaux de terrain fastidieux et coûteux. Pourtant, il peut être amélioré en utilisant des informations plus détaillées sur les caractéristiques du sol en particulier, la texture et la structure du sol Et tenir compte également du facteur humain (taux de croissance démographique, migration) et de l'état des ressources en eaux de surface et souterraines autour du lac.

La disposition de données pédologiques plus complètes ouvre la voie à l'usage d'autres modèles, certainement un peu plus complexes tel que SWAT offrant ainsi un élément de comparaison des résultats obtenus. Ce qui nécessite l'organisation de nouvelles collectes de données sur le terrain et des analyses d'échantillons au laboratoire.

References

Bailly, C., Malvos, C., Sarrailh, J.M., Rakotomanana, J.L., Rampanana, L., Ramanandray, M., and Wischmeier, H., 1976, The susceptibility to erosion of the soils of Madagascar, Bois et Forêts des Tropiques, no 169, p.15-58.

Besairie, H. 1956, Carte géologique Horombe-Befandriana Sud, Service géographique de Madagascar, Deuxième édition, échelle : 1/200000, feuille BCDE p.54-55.

Bonn, F., 1998, La spatialisation des modèles d'érosion des sols à l'aide de la télédétection et

des SIG : possibilités, erreurs et limites, Secheresse n° 3, vol. 9, p.185-192.

Vallet-Coulomb C., Gasse F., Robison L., Ferry I., 2005. Simulation of the water and isotopic balance of closed tropical lake at a daily time step (Lake Ihotry, South-West of Madagascar). *Journal of Geochemical Exploration* 88 (2006) p.153-156.

Vallet-Coulomb C., Gasse F., Robison L., Ferry I., Van Campo E., Chalié F., 2006. Hydrological modeling of tropical closed Lake Ihotry (SW Madagascar) : sensitivity analysis and implications for paleohydrological reconstructions over the past 4000 years. *Journal of Hydrology* (2006).

Dandoy, 1968, Plaine de Befandriana Sud, Note sur les premiers résultats de recherches menées dans la plaine de Befandriana Sud, 16p.

De Jong S., 1994, Applications of reflective remote sensing for land degradation studies in Mediterranean environment, *Netherlands Geogr. Studies*, 1171, 237p.

Hijmans R. J., Cameron S.E., Parra J.I., Jones P.G. et Jarvis A., 2005, very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas, *int. j. climatol.* 25, Royal Meteorological Society, p.1965–1978.

Malvos, C., Sarrailh, J.M., Bailly, C., Rakotomanana, J.L., Rampanana, L., Ramanahadray, F., 1976, Etude de la susceptibilité à l'érosion des sols de Madagascar, Expérimentation en parcelles élémentaires, Département de recherches forestières et piscicoles, CTFT, Madagascar, 36p.

Moore I.D. and Burch, G. 1986b. Modeling erosion and deposition: topographic effects. *Trans of ASAE* 29(6), p.1624-1630, 1640.

Moore, I.D. and Burch, G. 1986a. Physical Basis of the Length-Slope Factor in the Universal Soil Loss Equation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.* 50, p.1294-1298.

Moore, I.D. and Wilson, J.P., 1992. Length-slope factors for the Revised Universal Soil

Loss Equation: Simplified method of estimation. *J. Soil and Water. Cons.* 47, p.423-428.

Moreau, J. 1982, Le Lac Ihotry, lac plat hypersalé, Madagascar, *Ecologie et peuplement piscicole*, *Rev. Hydrobiol, Trop*, 15 (1), p.71-80.

MRSTD-CNRE, 1992, Carte des ressources en sols, Projet d'inventaire de ressources naturelles terrestres, FTM, échelle : 1/200000, feuille : SE 38 EF.

Rango A. et Arnoldus H.M.J. 1987. Aménagement des bassins versants. *Cahiers techniques de la FAO*.

Ranivoson, T. A. 2008, Cartographie systématique du risque d'érosion selon RUSLE, Mémoire de fin d'étude, ESPA, Filière Hydraulique, Madagascar, 69p.

Rasolomanana E., Albouy Y., Ritz M., Robison L., Ferry L., Ralaimaro J., 1997, Reconnaissance hydrogéologique par méthodes électrique et électromagnétique dans la région du Lac Ihotry, Sud-ouest de Madagascar, Colloque GEOFCAN Géophysique des sols et des formations superficielles, Abstracts et résumés étendus Bondy, France, p.71-77.

Renard, K.G., G.R. Foster, G.A. Weesies, D.K. McCool, and D.C. Yoder, 1997, *Predicting Soil Erosion by Water: A Guide to Conservation Planning With the Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)*, *Agricultural Handbook*, 703. U.S. Government Printing Office, Washington, D.C. 404 pp.

Ségalen P. et Moureaux C., 1948, Etude géologique et pédologique de la région de Morombe-Tanandava, doc. mulling, OSTOM Madagascar, 68 p.

Songadina, 2010, Le Complexe Mangoky – Ihotry, la perle rare des zones humide de Madagascar, *Conservation Internationale Madagascar*, *Bul. Num.* 5, p.1.

Wischmeier, W. H., Smith, D. D. (1960) A universal soil-loss estimating equation to guide conservation farm planning. 7th intern. Congr. Soil Science, Vol. 1, p. 418-425. Wischmeier, W.H. 1976, Use and misuse of the universal soil loss equation, *Journal of Soil and Water Conservation*. 31(1): p. 5-9.

Wischmeier, W.H., and Smith, D.D., 1965, Predicting rainfall-erosion losses from cropland east of the Rocky Mountains: U.S. Department of Agricultural Handbook 282: Washington, D.C., U.S. Government Printing Office, 47 p.

Wischmeier, W.C., and Smith, D.D. 1978. Predicting rainfall erosion losses – a guide to conservation planning. *Agriculture Handbook No. 357*. US Dept Agric., Washington, DC., 58p

Remerciements

Nous remercions la Fondation Mac Arthur pour le financement du travail. Nos vifs remerciements également envers toute l'équipe d'ASITY Madagascar représenté par Madame Voninavoko Raminoarisoa pour l'autorisation d'accès aux données disponibles et le soutien dans la réalisation de ce travail.

