



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO



ECOLE DOCTORALE : INGENIERIE ET GEOSCIENCES

EQUIPE D'ACCUEIL DOCTORALE : GENIES MINERAL ET PETROLIER

**ENSEMBLE DE TRAVAUX POUR L'OBTENTION DE DIPLOME DE
DOCTEUR HABILITE A DIRIGER DES RECHERCHES DE
L'UNIVERSITÉ D'ANTANANARIVO**

Spécialité : GEOLOGIE APPLIQUEE

Ayant pour thème :

**GEOLOGIE ET SES INTERETS :
SCIENTIFIQUE, ECONOMIQUE, TECHNOLOGIQUE
ET SOCIO-CULTUREL**

**Volume 1 : CURRICULUM VITAE, PUBLICATIONS ET
COMMUNICATIONS**

Présenté par :

MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques
Maître de Conférences à l'ESPA, Université d'Antananarivo

Soutenu le 2 Septembre 2021 devant le jury suivant:

Président	Mr RANDRIANJA Roger, Professeur Titulaire (Université de l'Itasy)
Garant scientifique	Mr RASOLOMANANA Eddy Harilala, Professeur Titulaire (Ecole Supérieure Polytechnique, Université d'Antananarivo)
Rapporteur interne	Mr RAKOTONINDRAINY, Professeur Titulaire (Université de Vakinankaratra)
Rapporteur externe	Mme RAMANIVOSOA Beby, Professeur Titulaire (Faculté des Sciences, Université de Mahajanga)
Examineurs	Mr RAKOTONDRAZAFY Raymond, Professeur Titulaire (Faculté des Sciences, Université d'Antananarivo) Mr RAZAKAMANANA Théodore, Professeur Titulaire (Faculté des Sciences, Université de Toliary)

SOMMAIRE

SOMMAIRE	i
1. CURRICULUM VITAE	1
1.1 RENSEIGNEMENTS PERSONNELS	1
1.2 DIPLOMES UNIVERSITAIRES.....	1
1.3 DOMAINE DE COMPETENCE	1
1.4 FORMATIONS ET STAGES	3
1.5 OPPORTUNITES INTERNATIONALES ET MISSIONS A L'EXTERIEUR	4
1.6 RESPONSABILITES PEDAGOGIQUE, SCIENTIFIQUE, ADMINISTRATIVE	5
2. BILAN DES ENCADREMENTS	9
2.1 ENCADREMENTS DE MEMOIRE D'INGENIEUR ET DE MASTER	9
DEPARTEMENT ET MENTION GEOLOGIE à l' ESPA	9
2.2 ENCADREMENT DE MEMOIRE DU CAPEN à l'ENS	11
2.3 JURY DE MEMOIRE DE DEA, MASTER à la Faculté des Sciences.....	12
3. ATTESTATIONS ET CERTIFICATIONS.....	18
4. PUBLICATIONS.....	25
4.1 PUBLICATIONS NATIONALES	25
4.2 PUBLICATIONS INTERNATIONALES	26
Evolution minéralogique et géochimique du profil latéritique nickélique d'Ambatovy.....	27
Problématique de l'érosion littorale de Morondava.....	46
Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des pouzzolanes du District Betafo-Antsirabe, Région Vakinankaratra.....	58
Méthodes d'étude du composant « sol » lors de la reconnaissance et l'exploration minière - Cas de l'exploration du calcaire dans la Commune de Mariarano, District Mahajanga II, Région Boeny....	70
Pour une meilleure connaissance des nouveaux concepts relatifs à la « Terre » comme : la Géodiversité, la Géosite, la Géoconservation, leGéotourisme, le Géoparc et la Géoéducation à Madagascar.....	83
Apport de la méthode cartographique dans l'étude de l'évolution du trait de côte de la ville de Mahajanga de 1952 à 2015.....	102
Gestion intégrée des ressources en eau du Bassin versant de Soavina par Télédétection et SIG, Région Amoron'i Mania Fianarantsoa.....	116
Particularités du gîte d'oxyde de fer d'Ambohidranandriana, Antsirabe.....	131

Contexte géomorphologique des géomatériaux et leurs caractéristiques géomécaniques dans les environs du campus Vontovorona.....	154
Caractérisations physico-chimique, minéralogique et géotechnique des latérites aux environs de Vontovorona, Alakamisy Fenoarivo.....	161
Caractérisations pétrographiques des profils latéritiques nickelifères d'Ambatovy- Moramanga, Centre Est de Madagascar.....	175
Utilisation des pouzzolanes, d'Alakamisy Anativato, en briques, dans le District de Betafo, Région Vakinankaratra	193
Utilisation des SIG et de la Télédétection pour la gestion de l'environnement urbain : cas de la Ville d'Antananarivo (Madagascar).....	211
Evolution dynamique de la rivière Ilepona et méthode de protection artisanale des berges.....	225
Geoculture and geosciences in the Region of Analamanga in Madagascar.....	236

CURRICULUM VITAE

1. CURRICULUM VITAE

1.1 RENSEIGNEMENTS PERSONNELS

Nom MANDIMBIHARISON
Prénoms Aurélien Jacques
Situation familiale Marié, père de deux enfants
Nationalité Malagasy
Adresse du domicile Lot II E 26 C Bis O Ambohimirary, ANTANANARIVO
Adresse professionnelle ESPA B.P. 1500 Ambohitsaina, ANTANANARIVO
Poste actuel Enseignant Chercheur, Mention Génie Géologique, ESPA
Téléphone +261 34 31 852 96 ; +261 33 78 248 12 ; +261 32 04 024 51
E-mail raory@yahoo.fr ou mandimbiharison.aurelien@gmail.com



1.2 DIPLOMES UNIVERSITAIRES

2012 Doctorat Nouveau Régime de l'ESPA, Département Mines, Option
Génie Minéral ; Spécialité : Géologie Appliquée – Université d'Antananarivo
1987 Master en Géologie des Terrains Superficiels (GTS) de l'Université de Liège
1984 Ingénieur Géologue de l'ESPA
1978 Baccalauréat série C, Centre Antananarivo

1.3 DOMAINES DE COMPETENCE AVEC EXPERIENCES PROFESSIONNELLES

Domaines de compétences à part l'Enseignement : Géologie, Hydrogéologie, Géotechnique, Géomorphologie, Cartographie et l'Ingénierie sociale

* Pour le compte du MIJARC (Mouvement International de la Jeunesse Agricole Rurale Catholique) AFRIQUE (1990 – 1993)

- Etude et suivi du projet de grenier communautaire dans la région de Moundou au TCHAD ;
- Etude et suivi d'un projet de pisciculture pour le groupe des jeunes agriculteurs chrétiens dans la région de Dabou en COTE D'IVOIRE ;
- Etude et suivi d'un projet de construction d'un bâtiment polyvalent pour les jeunes ruraux de Sokode au TOGO ;
- Animation d'un atelier de formation en gestion et comptabilité d'un groupement de paysans dans la région d'Akono au CAMEROUN ;
- Comité de rédaction du bulletin de liaison du MIJARC (Mouvement International de la Jeunesse Agricole Rurale Catholique) basé au Cameroun en Afrique.

* Pour le compte de l'Université de Yaoundé et de l'ORSTOM Cameroun(1991)

- Contribution à l'étude métallogénique du district aurifère et diamantifère à l'Est du Cameroun à Batouri (en collaboration avec le Département de Géologie de la Faculté des Sciences à l'Université de Yaoundé et de l'ORSTOM Cameroun)

* Pour le compte de BCEOM Cameroun (1991-1992)

- Contrôle géotechnique de l'axe Yaoundé- Mfou (route goudronnée distante de 20km)

* Pour le compte de la SETAH (1993-1994)

- Etude géotechnique et pédologique d'un projet d'aquaculture dans la région de Menabe ;
- Etude, contrôle et suivi de la réhabilitation de la piste Antanetibe – Andranovelona .

* Pour le compte des privés

- Etude géologique de gisement d'améthyste de Soavinandriana dans la Commune d'Ankisabe ;
- Etude du gisement d'Anjanabonoina : tourmaline polychrome, béryl jaune, grenat spessartite.
- Prospection, conseil des exploitants miniers dans la région d'Andramoniely Sud, Commune rurale de Tsaramasoandro , FivAnkazobe ;
- Etude d'impact environnemental, suivi et conseil de l'exploitation du béryl à Ambohipierenana, Commune Ilaka Centre, FivAmbositra

*** Pour le compte des privés**

- Etude géologique de gisement d'améthyste de Soavinandriana dans la Commune d'Ankisabe ;
- Etude du gisement d'Anjanabonoina : tourmaline polychrome, béryl jaune, grenat spessartite.
- Prospection, conseil des exploitants miniers dans la région d'Andramoniely Sud, Commune rurale de Tsaramasoandro , Fiv Ankazobe ;
- Etude d'impact environnemental, suivi et conseil de l'exploitation du béryl à Ambohipierenana, Commune Ilaka Centre, FivAmbositra
- Lever géologique des périmètres miniers à Ambondromamy (2011) pour le gypse, à Betafo (2013) pour les pouzzolanes, à Ambohidranandriana (2015) pour les oxydes de fer.
- Etude géomorphologique aux environs du site d'emplacement du barrage hydro-électrique sur la rivière de Manambolo à Tsiroanomandidy (2010) ;
- Etude environnementale (volet géologique et sol) d'un projet d'exploitation du calcaire dans la région de Mariarano (Mahajanga II) (2008) ;
- Evaluation ex-post du projet d'alimentation en eau potable de la ville de Mahajanga, projet mené conjointement par Kfw et Jirama (2006).

*** Pour le compte des autres Bureaux d'Etudes**

- Consultant chez DINIKA pour le volet Géologique et Hydrogéologique dans le projet de mise en place de 150 forages d'eau dans le Sud (financement UNICEF en 1998) ;
- Coordinateur du projet « Ingénierie Sociale » pour le compte de l'ONG SCAPY (2002) concernant la mise en place des équipements et structures communautaires (BF, lavoirs, WC) afin de lutter contre la propagation de choléra dans la ville d'Antananarivo. Les quartiers concernés sont : Ambohimananarina, Avaradoha, Ampandranana et Antsakaviro.

*** Pour le compte du Bureau d'étude S.E.C.AM (1994 à ce jour)**

-Gérant fondateur du Bureau d'Etude SECAM depuis 1994 à ce jour
Ingénieur d'étude et Chef de Mission pour de nombreux projets de construction ou de réhabilitation des infrastructures rurales financés par FID (Fonds d'Intervention pour le Développement), le CNC Dégâts Cycloniques, Centre de Surveillance de Pêche, PSDR, PPRR Toamasina MTP, Min Eau et dans le cadre du PST (Programme Sectoriel du Transport) dans diverses régions de Madagascar. Projet de mise à jour du lever topographique de la carrière Cipolin à Ibity(Holcim). Prospection de gypse à Ambondromamy, de Pouzzolane à Tritriva (Holcim) Etude géotechnique des carrières de cipolin à Ibity et d'argile à Bemololo pour le compte d'Holcim.

Cartographie géologique de la Commune Rurale de Soamahamanina à l'échelle 1/50 000 (Projet Ministère des Mines et du Pétrole 2018) avec la participation de 12 enseignants permanents et vacataires et les étudiants en M2 (2017-2018) de la Mention Génie Géologique.

Expérience en enseignement

*** Pour le compte du CEG Amboasary Sud (Octobre1978- Février1980)**

- Service national hors force au CEG Amboasary Sud en tant que Prof de Maths du 6è jusqu'en classe de 4è

*** Pour le compte de Petit Séminaire de Mvolé à Yaoundé (1991- janvier 1993)**

- Enseignant vacataire, Prof de Maths 2nd en Terminale A

*** Pour le compte de l'Université d'Antananarivo (avril 1993-à ce jour)**

Année	Ecole, Faculté à l'Université d'Antananarivo
1997-2001	Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques (ESSA) : Vacataire Géologie Générale (2èA : Tronc commun)
1998 à ce jour	Ecole Normale Supérieure (ENS) : Vacataire Géodynamique Externe (1èA/S2) Cartographie (2èA/ S4) Hydrologie, hydrogéologie (S6) Géologie Appliquée ; Géomatériaux (4èA/S8)
	Faculté des Sciences : Vacataire Géotechnique routière (Parcours Géotechnique : L2, M1) Gestion et organisation du chantier (Parcours Géotechnique : L3) Géomorphologie littorale (Parcours PSAEECO : S8)

2006 à ce jour	<p>Aménagement et Protection du Littoral (Parcours PSAEECO et GECOGELL : S9)</p> <p>Forces en action pour la morphologie dynamique littorale (Parcours PSAEECO et GECOGELL : S8)</p> <p>Bassin Versant ; Cycle de l'Eau ; Hydrogéomorphologie (Parcours : PSEG S5)</p> <p>Photo-Interprétation (Parcours MSTGG : S7)</p> <p>Géomorphologie (Parcours BAR : S7)</p>
1993 à ce jour	<p>Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA) : Permanent à partir de 2004</p> <p>Département MINES (1994-2011)</p> <p>Photo-Interprétation et Télédétection (5èA)</p> <p>Géomorphologie et Cartographie (3èA)</p> <p>Département BTP (2013 à ce jour)</p> <p>Géologie du Génie Civil (L2 BTP Pro)</p> <p>Hydrogéologie (L3 BTP Pro)</p> <p>Département Hydraulique (2013 à ce jour)</p> <p>Géologie du Génie Civil (L3)</p> <p>Département Géologie (1993 à ce jour)</p> <p>Informatique de base (WEPP) 3èA</p> <p>Photo-Interprétation 3èA/S5</p> <p>Cartographie géologique 4èA /S7</p> <p>Gestion et organisation du chantier S7</p> <p>Traitement informatique des données géologiques S7</p> <p>Géomorphologie littorale (S8 GEA)</p> <p>Aménagement et Protection du littoral (S8 GEA)</p> <p>Géologie de l'Ingénieur (S9 GEA ; GM ; GSS)</p> <p>Géotechnique routière (S9 GSS, GM)</p> <p>Mécanique des sols 2 (GSS S10)</p> <p>Marché Public et Insertion Professionnelle (S10 GEA, GM, GSS)</p>

1.4 FORMATIONS ET STAGES

Année	Titre	Promoteur	Lieu
3 au 8 juin 2019	Formation sur le Patrimoine géologique (Géoheritage)	PanAf Geo	Mining Business Center (MBC) Ivato- Antananarivo ; Madagascar
28 au 31 mai 2018	Formation sur la Ressource en eau souterraine – Hydrogéologie	Projet MADEEHI – ERASMUS avec l'Université de Liège	Faculté des Sciences à l'Université d'Antananarivo
2 mai au 29 juin 2007	Gestion et traitement des données géologiques Télédétection	Coopération belge au développement	Musée Royal de l'Afrique Centrale – Tervuren Belgique
7 au 31 octobre 2003	Formation en géomatique, module « Télédétection Radar »	Centre Commun des Ressources en Géomatique (CCRG)	IOGA – Université d'Antananarivo
6 septembre 1999 au 28 février 2000	Geological Data Management	Belgian Administration for Development Cooperation	Musée Royal de l'Afrique Centrale – Tervuren Belgique
23 octobre au 03 novembre 1995	HIMO - ROUTE	Fonds d'Intervention pour le Développement (FID)	Centre de Formation Himo-Route à Antsirabe

18 décembre 1995 au 12 janvier 1996	Système d'Information Géographique (S.I.G.)	CFSIGE	Local du CFSIGE Ambatobe - Antananarivo
1992	Atelier de formation sur l'agroforesterie, la gestion des ressources naturelles dans les milieux (savane, équatoriale et aride)	PVO- NRMS (Private Voluntary Organisation in Natural Resources Management System) et IRA	Local IRA (Institut de Recherche Agronomique) Yaoundé
1991	Atelier de formation en gestion des projets concernant les ressources naturelles	PVO- NRMS (Private Voluntary Organisation in Natural Resources Management System)	Local ISMP (Institut Supérieur de Management Public) Yaoundé
1985	Stage de prospection géophysique et hydrogéologique sur la colline de Sart Tilman- Liège	Laboratoire de géophysique et d'hydrogéologie de la Faculté des Sciences Appliquées de l'Université de Liège	Sart Tilman - Liège
1986	Stage de prospection géochimique dans la vallée de Fleury	Laboratoire de Géochimie de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve	Fleury
1987	Stage de Géomorphologie Appliquée dans le Sud d'Espagne	Laboratoire de Géomorphologie de l'Université de Liège	Cuevas del Campo

1.5 OPPORTUNITES INTERNATIONALES ET MISSIONS A L'EXTERIEUR

Année	Pays	Description de la mission	Résultat
1985-1987	Belgique	Formation de deux ans après l'Ingéniorat à l'Université de Liège, Faculté des Sciences concernant la Géologie des Terrains Superficiels (GTS). Suivre d'autres cours dans d'autres universités de Belgique (ULB, UCL, Gembloux)	Diplôme de Master en Géologie de Terrain Superficiel (GTS) délivré par l'Université de Liège
1991-1992	Cameroun	Etude métallogénique de l'or et du diamant dans le District de l'Est à Batouri avec le Département de Géologie à la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé (sous la direction du Professeur Rose Yongue Fouateu) et de l'ORSTOM.	Les rapports concernant les deux descentes sur terrain ont été envoyés aux personnes responsables.
1997	La Réunion	Visite d'échange avec le Département des Sciences de la Terre de l'Université de Saint Denis et le département de Géologie à l'ESPA dans le cadre du projet BAD pour une durée d'une semaine.	Visite du projet du Département concernant l'hydrogéologie sur le massif volcanique de la Fournaise.
1999-2000	Belgique	Formation en anglais sur « Geological data management », techniques et méthodes de traitement des données géologiques, au Musée Royal de	Obtention du Certificat de fin de formation

l'Afrique Centrale –Tervuren

2001	Cameroun	Journées scientifiques de Télédétection organisées par l'AUF réseau Télédétection	Présentation d'une communication sur l'utilisation du SIG et de la télédétection sur la gestion urbaine, cas de la ville d'Antananarivo
2007	Belgique	Formation sur la Télédétection, utilisation du logiciel ENVI 4.0 pendant deux mois, au Musée Royal de l'Afrique Centrale –Tervuren	Obtention du Certificat
2014	Belgique	Bourse de mobilité pour enseignant (Projet DREAM) pendant un mois au Département de Géologie de la Faculté des Sciences de l'Université de Liège.	Quelques échantillons d'argile d'une étudiante de la Mention Génie Géologique ont été analysés gratuitement dans le Laboratoire d'argile sous l'égide du Professeur Nathalie Fagel et un doctorant en INGEO a effectué un stage dans ce laboratoire pour l'année 2019-2020
2015	Afrique du Sud	Présentation de l'ESPA et de l'Université d'Antananarivo lors de l'atelier sur « French and Portuguese Curriculum Development Workshop for the Regional Masters Programme in Integrated Water Resources Management (IWRM) » organisé par WATERNET du 19-20 mars 2015, Hatfield Pretoria	Aucune suite ne nous est parvenue jusqu'à ce jour pour la mise en place de ce programme de Master en GIRE
2016	Italie	Colloque de l'Association Francophone de Géographie Physique sur « La géographie physique et les risques de pertes et préjudices liés aux changements climatiques » du 19 au 21 mai 2016 en Sardaigne Italie	Présentation d'une communication sur « Evolution du trait de côte de la partie ouest de Madagascar »

1.6 RESPONSABILITES PEDAGOGIQUE, SCIENTIFIQUE, ADMINISTRATIVE

• Pédagogique

Chef du Département de Géologie de 2013-2016 ; Responsable de la Mention Génie Géologique du 2016-2019 (mai)

Elaboration des documents et remplissage de canevas pour le dossier d'habilitation de la Mention Génie Géologique avec ses 3 Parcours : Géologie de l'Environnement et de l'Aménagement (GEA), Géologie Minière (GM), Géologie du SubSurface (GSS) ;

Début effectif de l'application du système LMD pour l'ESPA est le mois de mai 2014, le nombre des étudiants reçus en L1 pour la Mention Génie Géologique s'est vu augmenter allant jusqu'à 45 au lieu d'une quinzaine chaque année.

Diriger les réunions du Département, élaborer les emplois du temps, le bon déroulement des cours et organiser les voyages d'études et les sorties géologiques pour les niveaux 3^e A/L3 ; 4^e A/M1 et 5^e A/M2 ;

Assister à la délibération des concours d'entrée en 1^{ère} Année dans le Département Géologie ou dans la Mention Génie Géologique ;

Chercher et organiser des Conférences pour les étudiants du Département ou Mention Génie Géologique.

Année	Conférencier	Thème
2013	Alain SCHILLI du GEO Gaia Global SA	International best practice and corporate responsibility in the mining sector
2013	Dr Guy DECHARNAIS, Géologue SGS Canada	Mécanismes géologiques d'enrichissement des terres rares ; Méthodologie pour l'estimation des ressources minérales
2014	RAKOTOARIMANANA Ravo, Ingénieur Géologue du QMM	- Aperçu sur la science géotechnique dans les Mines ; - Attentes et Défis actuels du Géologue minier
2015	Dr Christian KEMERLYNK de l'Université Pierre et Marie Curie- Paris	La géophysique appliquée à l'exploration minière et à l'hydrogéologie
2015	Dr RAKOTOMANANA Dominique Responsable Technique à la Sté TREM	Le marché mondial des Terres Rares
2016	Pr Georges SARAZIN	L'énergie géothermique et le champ géothermique d'Antsirabe
2016	Dr RANDRIANASOLO Brice	Entreprenariat géologique et minier

- **Scientifique**

- Membre de l'Association Francophone de Géographie Physique (AFGP) ;
- Membre du comité de rédaction dans la revue Geo-Eco-Trop (Université de Liège)

- **Administrative**

- Membre du Conseil d'Ecole de l'ESPA de 2013-2019 ;
- Membre du Conseil Scientifique de l'ESPA de 2013-2019

ARRETE N° 22383/2014 MESupReS portant versement dans le corps des Maîtres de Conférences d'Enseignement Supérieur

REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA
Fitiavana-Tanindrazana-Fanaraharana

MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT
SUPERIEUR ET DE LA RECHERCHE
SCIENTIFIQUE

ARRETE N° 22383/2014 MESupReS
portant versement dans le corps des Maîtres de
Conférences d'Enseignement Supérieur

Visas :

FIN : 5395 du 24 Avril 2014

CF : 9432 du 19 Mai 2014

LE MINISTRE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR
ET DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE

Vu la Constitution ;

Vu la Loi n°95-023 du 06 septembre 1995 portant statut des enseignants chercheurs de l'Enseignement Supérieur ;

Vu la Loi n°2003-008 du 05 Septembre 2003 modifiant et complétant certaines dispositions de la loi n°95-023 du 06 Septembre 1995 portant Statuts des Enseignants et Chercheurs de l'Enseignement Supérieur ;

Vu le Décret n°2014-200 du 11 Avril 2014 portant nomination du Premier Ministre, Chef du Gouvernement ;

Vu le Décret n°2014-235 du 18 Avril 2014 portant nomination des membres des Gouvernements ;

Décret n°2014-634 du 03 juin 2014 fixant les attributions du Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique ainsi que l'organisation générale de son Ministère.

Vu le Décret n°81-065 du 10 Mars 1981 fixant la hiérarchie et l'échelonnement indiciaire des corps des enseignants chercheurs et chercheurs enseignants de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique ;

Vu le Décret n°96-178 du 06 mars 1996 fixant le taux de l'indemnité de sujétion pour les enseignants et chercheurs de l'Enseignement Supérieur (en ce qui concerne uniquement l'indemnité de sujétion) ;

Vu le Décret n°2010-044 du 09 février 2010 portant modification de certaines dispositions du décret n°2004-639 du 15 Juin 2004 et du décret n°2009-1215 du 06 octobre 2009 fixant le taux d'indemnité de recherche et d'investigation alloué aux Enseignants Chercheurs et Chercheurs Enseignants de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique ;

Vu le Décret n°97-969 du 07 juillet 1997 fixant le taux des indemnités de logement, de résidence et de transports perçues par les enseignants et chercheurs de l'Enseignement Supérieur ;

Vu l'Arrêté n°1800-96 du 12 avril 1996 fixant le rattachement des enseignants et chercheurs de l'Enseignement Supérieur au Ministère de l'Enseignement Supérieur et leurs dénominations ;

ARRETE :

Article 1^{er}.- Suivant tableau ci-dessous, les Assistants d'Enseignement Supérieur titulaires des Diplômes de Doctorat, dont les noms suivent, sont versés dans le corps des Maîtres de Conférences d'Enseignement Supérieur aux grades, classes et échelons ci-après, pour compter des dates de leur prise de service lesquelles ne doivent pas être antérieures à celle du présent arrêté tant au point de vue de la solde que de l'ancienneté (Postes budgétaires accordés par la lettre d'accord d'Aménagement de postes budgétaires n°0212/14/MFB/SG/DGB/DSP/SVCE du 30 janvier 2014).

E. E. S. P. - PE
Arrivée le... 22 AOUT 2014
Sous le n°... 1561 PERS

Nom-Prénoms Matricule-Etablissements	Diplômes et Pays de délivrance	Situation antérieure	Nouvelle Situation
MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques IM.289.963 Ecole Supérieure Polytechnique de l'Université d'Antananarivo	Doctorat Nouveau Régime, Spécialité : Génie Minéral, délivré par l'Ecole supérieure Polytechnique de l'Université d'Antananarivo	Assistant d'enseignement Supérieur de 1 ^{er} classe, 1 ^{er} Echelon Indice : 1725-FOP	Maître de Conférences d'enseignement Supérieur 2 ^{ème} Classe, 3 ^{ème} Echelon Indice : 1860-FOP

Article 2.- En cette qualité, la rémunération des intéressés sera augmenté des indemnités de sujétion et de recherche prévues par les décrets n°96-178 du 06 Mars 1996 et n°2010-044 du 09 Février 2010 et des indemnités de logement, de résidence et de transport prévues par le décret n°97-969 du 07 Juillet 1997 susvisés.

Article 3.- Les intéressés restent à la disposition de l'Université d'Antananarivo. Les dépenses correspondantes sont en charge par le Budget Général, Chapitre 00-84-0 Article 210.

Article 4.- Le présent arrêté sera enregistré et communiqué partout où besoin sera. *fm*

POUR EXTRAIT CONFORME *R*

Antananarivo, le 18 juin 2014

RASOAZANANERA Marie Monique



BILAN DES ENCADREMENTS

2. BILAN DES ENCADREMENTS

2.1 ENCADREMENTS DE MEMOIRE D'INGENIEUR ET DE MASTER

DEPARTEMENT ET MENTION GEOLOGIE à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA)

N°	NOM ET PRENOMS	TITRE MÉMOIRE	ANNEE
01	RANDRIAMANANAINA Nirina Jonah	Essai de caractérisation des signatures radiométriques des formations à corindon de Tranomaro , d'Andranondambo et d'Ialakaka dans le sud de Madagascar	29/07/2004
02	MARISAONA Rivo Mickaël Odon	Contribution à l'Aménagement de la Commune Rurale d' Antsapandrano (Ambatolampy) à partir des outils modernes : SIG et Télédétection.	29/07/2004
03	RAKOTOARIVONY Herintsoa Nantenaina Harilanto	Rasolution des problematiques de site d'Ambohimanga en vue de sa valorisation	04/09/2004
04	ANDRIATSARAFARA Domoina Lalaina	L'importance du volet géologique dans les processus d'évaluation environnementale des projets en vue de l'élaboration du PCD de la Commune Rurale d'Alasora	15/09/2006
05	ANDRIAMIRIJA Jean Timothée	Nouveaux apports sur la connaissance du gisement Nickelifère de Valozoro	11/08/2008
06	RAVOMANANA Randrianantenaina Herimamy Harisoa	Détermination des Paramètres Géologique et Géotechniques des environs du site du Projet d'Extension et de Renforcement du Tarmac d'Ivato	07/12/2009
07	WALTER Samuel Adolphe	Caracteristiques petrographiques des roches de la carrière SCB - d'Anosiala en vue d'améliorer la qualité du béton	28/10/2010
08	RATOVONDRAHONA Andriamalala	Délimitation et proposition d'exploitation des bancs calcaires de Soalara pour le traitement des minerais de Nickel – Cobalt d'Ambatovy	22/07/2011
09	RAHAINGOARIMANANA Fanjaniaina	Base de données des matériaux de constructions routières au sein du District de Manjakandriana. Cas des axes: Manjakandriana-Mantasoa via Andriambazaha. Andriambazaha-Ambohitrandriamanitra et la RIP 64 reliant Maharidaza – Andriampamaky	16/05/2012
10	RAKOTONJANAHARY Lalaina Henintsoa	Monographie des ressources minérales dans le fokontany Soamiakatra , Commune Rurale Antanambao, District Antsirabe II, Région Vakinankaratra	08/10/2014
11	RINAEELINTSOA Mioranimanana Salama	Correction et valorisation des lavaka dans le bassin versant de Sahamaloto , Région Alaotra Mangoro	20/03/2014

12	ANDRIANAIVORAVELONA Herimampionona Haingosoa Tatiana	Analyses et traitements des données Géochimiques en vue d'élaboration d'une carte des indices. Cas de la zone d'Andrafiava ; Nord-Ouest de Madagascar	05/02/2014
13	RANDRIAMANANJARA Hajanandrianina Aimée Sylvia	Caractéristiques géologique et minière de l'or d'Androfia Andranganala dans le secteur Andriamena en vue de son exploitation à l'échelle semi-industrielle	03/01/2015
14	RAZAFINIARIVO Andoniaina	Proposition technique d'adduction d'eau potable dans la Commune Rurale d'Antanimandry, District Antsirabe II	23/01/2015
15	RANDRIARILALA Tefinanahary	Modélisation géologique à partir d'un levé de terrain et des outils modernes (SIG,DAO) cas de Bemavo Maevatanana	23/03/2015
16	RAHAJARIVELO Sophie Fanomezantsoa	Monographie de la minéralisation ferrière de Tongarivo, Commune Rurale d'Ambohidranandriana, District d'Antsirabe II	05/11/2015
17	RAJAONARY Harisitraka Fanantenana	Analyse multicritères des facteurs de l'érosion et suivi de l'évolution de l'occupation de sol du bassin versant Alaotra	03/12/2018
18	RANDRESIARISON Volahasina Soraya	Caractérisations des géoressources argileuses de Bemololo Mangatany et Miandrivazo pour leur valorisation	13/02/2019
19	NAMANA Horlando	Reconnaissance géotechnique et réhabilitation de la route nationale temporaire 14 (RNT 14) reliant Ifanadiana - Ikongo	14/06/2019
20	RAVELOMANANA Alain Désiré Thierry Ambinintsoa	Recherche des matériaux et détermination de leurs caractéristiques géotechniques, de la route nationale secondaire RNS43 entre Faratsiho et Ambatondradama (P.K. 81+476 au P.K. 100+250) dans la Région de Vakinankaratra.	13/09/2019
21	RASOLOFOARILANTO Banjasoa Amitiana	Amélioration d'un sol argileux pour une couche de fondation sur les travaux de réhabilitation de la RNS 43 entre Faratsiho et Sambaina au PK 101+200 – PK 107+300	23/10/2020
22	RAMANINANDROANA Arsène	Evolution du trait de côte Mahajanga dans la Région Boeny, au Nord-Ouest de Madagascar	31/10/2020
23	RAKOTOMALALA Hasina Laurence Elisa	Gestion intégrée de ressource en eau par le modèle WEAP 21 : cas de sous bassin d'Onilahy, Sud-Ouest de Madagascar	07/12/2020
24	RAKOTONDRA SAMBO Andriamamonjy Tsiravàna	Reconnaissance géotechnique, diagnostique de dégradation et aménagement de la RN 44 reliant Moramanga-Ambatondrazaka du PK 80+050 – PK 100+00	09/12/2020

Nombre d'étudiants : encadrés 24 à l'ESPA

2.2 ENCADREMENT DE MEMOIRE DU CAPEN à l'Ecole Normale Supérieure (ENS)

N°	NOM ET PRENOMS	TITRE MÉMOIRE	ANNEE
1	RANDRIANOMANANA Olivier	Inventaire des principales ressources minières industrielles malgaches	2001
2	ANDRIANAVALONA Rijaso Seth	Impacts environnementaux de l'exploitation minière artisanale dans la Commune Rurale de Mahazina Ambohipierenana	2002
3	THAMOND	Etude comparative de briques en terre cuite et de brique en terre crue à Andranofady, Fianarantsoa	2002
4	RASAMIMANANA Rija Benamina	Les pegmatites à beryl d'Andranomiely, Sous-Préfecture d'Ankazobe : essai d'évaluation des pegmatites durant les travaux de prospection et d'exploitation	2003
5	ANDRIANJANAHARY Jean Tiana Haritandra	Environnement Humain de l'érosion en Lavaka dans le Fokontany de Moratelo, Région Lac Alaotra	2003
6	RAKOTOVOHITRA Mendrika Henintsoa	Diagnostic du système d'adduction d'eau potable, d'assainissement et d'hygiène à Antanifotsy, Chef-lieu du District	2010
7	IRINTSOAMIORA	Diagnostic du système d'adduction d'eau potable, d'assainissement et d'hygiène dans les périphériques de la ville de Manjakandriana	2012
8	RASOLONJATOVO Mirantsoa	Lien entre la culture sur les "VATO" ou rochers et leur signification scientifique (Géoculture), cas aux environs de la zone d'Andringitra, District d'Ambohidratrimo, Région Analamanga	2014
9	RANDRIAMIALISOA Njara Herizo	Maîtrise de l'eau déterminant de la réussite de la vie rurale malagasy (Cas du village d'Anosiravo Nord, Commune Rurale d'Alarobia Ambatomanga)	2015
10	RAKOTONDRAMANANA Kantosoa Nirina Jeannine	Caractéristiques et impacts socio-économiques et environnementaux de la fabrication artisanale et industrielle des briques et des tuiles dans le quartier Volotara à Andoharanofotsy	2015
11	RANDRIANARIJAONA Sitraka Eliane	Caractérisation de la bande riveraine du lac Lanirano à Fort-Dauphin	2015
12	RATSIMBA Tanjona Nirafa	Caractérisations, impacts socio-économiques et environnementaux de l'exploitation d'or dans le Fokontany Miantsoarivo, Commune Rurale de Mahatsinjo, District de Maevatanana, Région Betsiboka	2016

Nombre d'étudiants : encadrés 12

2.3 JURY DE MEMOIRE DE DEA, MASTER à la Faculté des Sciences

Département ST et Mention STE

N°	NOM ET PRENOMS	TITRE MÉMOIRE	ANNEE
1	RASOLOARISOA Stéphanie Domoina	Valorisation des pouzzolanes de Tritriva, Région Vakinankaratra en vue de fabrication de béton légers (Béton ordinaire, micro-béton et béton caverneux)	30/09/2015 Master
Mention BEC			
2	RAJOELIMANANA Fanantenana Andraina	Evolution spatiale et temporelle du littoral de Mahajanga I " 1965 - 2015 "	20/07/2017 Master
3	ABNER Taoufiki	Etude de l'évolution de la forêt du Cap Masoala (Nord-Est de Madagascar) par des méthodes de télédétection	27/07/2017 Master
4	FOUADI Sita	Evolution du trait de côte aux Comores : cas de Ngazidja, dans la région de Bambao vers Mbadjini	16/06/2018 Master
5	ANDRIAMIHAMINA Rivohanitra Véronique	Conséquences de l'érosion marine du point de vue économique et sociale dans le District de Morondava	19/07/2018 Master
6	RASOARINORO Harinirina	Caractéristiques du Lac Mantasoa : état des lieux et mesures de protection	25/09/2019 Master
7	SOANOMENJANAHARY Hanitriniaina Hervea Violette	Evolution spatio-temporelle du Lac Alaotra, Région Alaotra Mangoro	11/12/2020 Master
Parcours MSTGG			
8	RANDRIAMIANDRA Nafindra Nihasy	Caractéristiques géotechniques de l'axe Ampasimpotsy- Farafangana sur la R N 12	19/03/2016 Master
9	SETARINERA Mamitiana Josefa	Proposition de lutte contre l'évaporation et l'envasement des lacs artificiels et naturels dans le haut bassin versant de l'Ikopa	01/04/2016 Master
10	RASOANAIVO FANEVANIONJA Manjakahandrainy Ninah Nardine	Etude de la dynamique de paysage forestière et analyse des pressions causantes. Cas du parc National Ranomafana 2009 - 2015	18/08/2017 Master
11	RANDRIANARISOA Mavanina	Evolution de l'ensablement dans le bassin versant de Ranofotsy à l'aide du SIG et de la télédétection au cours de 1949 à 2016	18/08/2017
12	ANDRIAMIADANA Feno Sitraka	Détection de changement et étude de la régénération naturelle de la forêt humide dans le District de Brickaville, Région Atsinanana	23/10/2017
13	ILIASSA Moindjie	Recherche de sites favorables à l'implantation d'un centre de formation professionnelle agricole à Ankadinondry-Sakay	

Nombre d'étudiants encadrés : 13 à la Faculté des Sciences

ATTESTATIONS ET CERTIFICATIONS

3. ATTESTATIONS ET CERTIFICATIONS



BCEOM CAMEROUN SARL

A T T E S T A T I O N

Je soussigné, Etienne RAZAFINDRALAMBO, Chef de Mission, atteste que MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques, Ingénieur Géologue, a effectué un stage de formation pratique en contrôle géotechnique sur l'axe routier YAOUNDE-MFOU, avec la Mission de Contrôle BCEOM et le LABOGENIE, du 30 Mai au 31 Août 1991.

Ce stage porte essentiellement :

* sur les différents essais d'identification au laboratoire :

- pour le sol :

. Analyse granulométrique, Limite d'Atterberg, Proctor, CBR, Teneur en eau, Poids spécifique.

- pour le béton frais :

. Essai de propreté, essai de compression, analyse granulométrique.

- pour le béton bitumineux ou corps noir :

. Essai Duriez, essai Marshall, essai de pénétration, teneur en liant, détermination de la viscosité, analyse granulométrique.

* sur les différents essais "in-situ" sur le chantier :

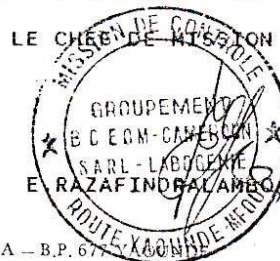
. Teneur en eau, densité, déflexion, contrôle de la température du B.B lors de la mise en oeuvre, carottage sur les enrobés.

* sur les diverses observations sur le chantier référant à la géotechnique,

* sur les interprétations de ces essais et observations.

En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit./-

FAIT A YAOUNDE, LE 20 DECEMBRE 1991



BCEOM CAMEROUN SARL

SOCIETE A RESPONSABILITE LIMITEE AU CAPITAL DE 5.000.000 FCFA - B.P. 677
R.C. YAOUNDE 1430 - TEL: 21-10-13 & 20-18-82 - FAX : 20-02-46



Centre de Formation aux Sciences de l'Information Géographique et de
l'Environnement

ATTESTATION

Je soussigné, AMADE Joseph, Directeur Général du Centre de Formation aux Sciences de
l'Information Géographique et de l'Environnement, atteste par la présente que

MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques

a suivi avec assiduité la formation en « S.I.G. » (Système d'Information Géographique)
organisée par le Centre du 18 décembre 1995 au 12 janvier 1996.

En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit. *h*

Fait à Antananarivo, le 05 janvier 2001

Le Directeur Général

AMADE Joseph

C.F.S.I.G.E. - Bâtiments EASTA - Ambatobe / Nanisana - B.P. 5103 - ANTANANARIVO 101 - MADAGASCAR
Téléphone : (22)402-02 ou (22)703-06 ou (22)703-13 ou (22)703-15 Fax : (22)402-02
Comptes bancaires B.N.I. ANTSAKAVIRO - FMG N° 04.247650.8.020.0.00 / Devises N° 04.247650.8.016.0.02

ATTESTATION

Le Directeur Général

du

FONDS D'INTERVENTION POUR LE DEVELOPPEMENT

Atteste que Monsieur MANDIMBIHARISON Aurélien J. du Bureau d'Etudes SECAM - Antananarivo a participé
au séminaire de formation HIMO-ROUTES organisé du 23 Octobre 1995 au 03 Novembre 1995 à ANTSIRABE

Antananarivo, le 03 Novembre 1995

LE CONSULTANT FORMATEUR
LE CHEF DU PROJET
HIMO-ROUTES
Marc Van IMSCHOOT : RASOANAJVO Andriamampionona

LE DIRECTEUR GENERAL
RAKOTOMAVO Alain

~ ATTESTATION ~

Je soussigné, **RAELISON A. Elysée**, Coordonnateur National, Projet
PNUD/BIT/MAG/94/001, atteste que :

Monsieur Mandimbiharison Aurélien Jacques

de l'Entreprise : **SECAM**

a suivi les séminaires de formation en Gestion / HIMO des MPE organisé par le
Projet **PNUD/BIT/MAG/94/001** à Antsirabe du 10 au 14 juin 1997.

La présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Le Coordonnateur National

Elysée **RAELISON**

CERTIFICATION

N° du Diplôme d'inscription 08

REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA
Tanindrazana - Fehafahana - Fohamadinana

N° du diplôme 08

MINISTRE DES TRAVAUX PUBLICS
ET DE L'AMENAGEMENT DU TERRITOIRE

CENTRE DE FORMATION
HIMO-ROUTES

C E R T I F I C A T

Le Centre de Formation Himo-Routes - Antsirabe,
certifie par la présente que :

- Monsieur (Mademoiselle) (Madame) (1) **MANDIMBIHARISON Aurélien J.**
- né(e) le **21 Octobre 1957** à **Antananarivo**
- de l'Entreprise (du Bureau d'Etudes) (1) **SECAM Antananarivo**

a suivi avec succès la formation de bureaux d'études en matière de conception, suivi et contrôle des travaux routiers réalisés à Haute Intensité de Main d'Ouvre (HIMO), y compris ceux des ouvrages d'assainissement et des ouvrages d'art.

Ce certificat lui est délivré pour servir et valoir ce que de droit.

Antananarivo, le
Le Chef du Projet Himo-Routes,

Andrianampioasona
Ingénieur Principal des T.P.



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

INSTITUT ET OBSERVATOIRE DE GEOPHYSIQUE D'ANTANANARIVO

CENTRE COMMUN DE RESSOURCES EN GEOMATIQUE



C E R T I F I C A T

Le Président de l'Université d'Antananarivo certifie que :

Mme/Mlle/Mr. **MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques**
né(e) le **21 Octobre 1957** à **Antananarivo**
a suivi avec assiduité la formation en Géomatique, module «Télédétection Radar» organisée par le Centre Commun de Ressources en Géomatique (CCRG), du 27 octobre 2003 au 31 octobre 2003 à Antananarivo.

Ce certificat lui est délivré pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Antananarivo le, 31 octobre 2003

Le Président de l'Université d'Antananarivo,

RAKOTOBE Pascal
Professeur Titulaire

Le Formateur,

Prof J.-P. RUDANT
Université de Marne la vallée, France

CERTIFICAT

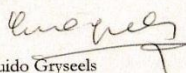
Le Directeur du Musée royal de l'Afrique centrale à Tervuren (Belgique), le Chef du Département de Géologie et Minéralogie et
le Maître de stage certifient que

Mr MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques


a suivi la session du stage « **Gestion et Traitement de Données Géologiques – Télédétection** » comportant les éléments suivants :
Introduction et bases physiques de la télédétection - Utilisation des propriétés physiques des surfaces dans les applications thématiques - Le traitement (géométrique et
radiométrique) des images avec PCI et avec ENVI, et réalisation d'un travail personnel.
Suivi d'un séminaire en « **Cartographie géologique assistée par ordinateur** » comportant les éléments suivants : Introduction à la cartographie et acquisitions des
données (dont l'utilisation du GPS différentiel) - La conception des légendes des cartes géologiques - Les modules « édition des cartes » des GIS (y compris l'expression
des résultats sous forme de cartes et l'export des fichiers) - Les outils d'édition cartographique non GIS avec la réalisation d'un travail personnel.

organisée du 02/05/2007 au 29/06/2007

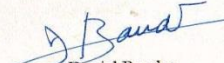
Le Directeur


Guido Gryseels

Le Chef de département


Johan Lavreau

Le Maître de stage


Daniel Baudet



AFRICAMUSEUM
TERVUREN

Kingdom of Belgium
Royal Museum for Central Africa - Belgian Administration for Development Co-operation
Certificate


Mr...**MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques**....born on...**21/10/1957**.....at...**Andranomavalina, Antananarivo**.....

has attended a training session on
"Geological Data Management"
organized from September 6, 1999 to February 28, 2000.

The programme includes:

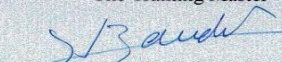
Introduction to DOS, Norton and Windows; The use of spreadsheets;
Tabular database management; Georeferencing; Geographical Information
Systems; Definition, storage and processing of typical geological data
(collection management, geological mapping and field data, geochemistry,
bibliography, mining data, mineral resources management, remote sensing,
engineering data, structural geology, environmental applications of GIS).

The Director



CIRGA

The Training Master





INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCE
RESEARCH AND INNOVATIVE IDEAS IN EDUCATION

CERTIFICATE

of
PUBLICATION

*The Board of International Journal of Advance Research and Innovative Ideas in Education
is hereby Awarding this Certificate to*

MANDIMBIHARISON AURELIEN JACQUES

In Recognition of the Publication of the Paper Entitled
GEOCULTURE AND GEOSCIENCES IN THE REGION OF ANALAMANGA IN MADAGASCAR

Published in E-Journal

Volume-5 Issue-2 2019

Paper Id : 10054
ISSN(O) : 2395-4396



www.ijariie.com

Npate

Editor In Chief

PUBLICATIONS

4. PUBLICATIONS

4.1 PUBLICATIONS NATIONALES

N°	Année	Titre	Revue	Domaine
1	2012	Evolution minéralogique et géochimique du profil latéritique nickélifère d'Ambatovy	Madamines, ISSN 2220-0681, vol. 4, 2012 pp1-19	Métallogénie (Nickel)
2	2013	Problématique de l'érosion littorale de Morondava	Madamines, ISSN 2220-0681, Vol 5, 2013, pp1-12	Géomorphologie littorale
3	2014	Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques des pouzzolanes du District Betafo-Antsirabe, Région Vakinankaratra	Madamines, ISSN 2220-0681, Vol 6, 2014, pp38-49	Géomatériaux
4	2015	Méthodes d'étude du composant « sol » lors de la reconnaissance et l'exploration minière - Cas de l'exploration du calcaire dans la Commune de Mariarano, District Mahajanga II, Région Boeny	Madamines, ISSN 2220-0681, Vol 7, 2015, pp1-13	Pédologie
5	2016	Pour une meilleure connaissance des nouveaux concepts relatifs à la « Terre » comme : la Géodiversité, la Géosite, la Géoconservation, le Géotourisme, le Géoparc et la Géoéducation à Madagascar.	Mada-Hary, ISSN 2410-0315, Vol. 5, 2016 pp19-37	Géodiversité
6	2017	Apport de la méthode cartographique dans l'étude de l'évolution du trait de côte de la ville de Mahajanga de 1952 à 2015	Madamines, ISSN 2220-0681, Vol 1, 2017, pp 1-14	Géomorphologie littorale
7	2018	Particularités du gîte d'oxyde de fer d'Ambohidranandriana, Antsirabe	Mada-Hary, ISSN 2410-0315, Vol7, 2018, pp 77- 98	Métallogénie (Fer)
8	2018	Gestion intégrée des ressources en eau du Bassin versant de Soavina par Télédétection et SIG, Région Amoron'i Mania Fianarantsoa	Madamines, ISSN 2220-0681, Vol 1, 2018, pp1-13	GIRE
9	2019	Caractérisations physico-chimique, minéralogique et géotechnique des latérites aux environs de Vontovorona, Alakamisy Fenoarivo	Mada Hary, ISSN 2410-0315, Vol8, 2019, pp73-86	Géomatériaux
10	2020	Caractérisations pétrographiques des	Mada Hary, ISSN	

11		profils latéritiques nickelifères d'Ambatovy- Moramanga, Centre Est de Madagascar	2410-0315, Vol 9, 2020, pp39-56	Métallogénie (Ni)
	2020	Utilisation des pouzzolanes, d'Alakamisy Anativato, en briques, dans le District de Betafo, Région Vakinankaratra	Madamines, ISSN 2220-0681, Vol.1, 2020	Géomatériaux

4.2 PUBLICATIONS INTERNATIONALES

N°	Année	Titre	Revue	Domaine
1	2003	Utilisation des SIG et de la Télédétection pour la gestion de l'environnement urbain : cas de la Ville d'Antananarivo (Madagascar)	<i>Télédétection</i> , 2003, vol. 3, n° 2-3-4, pp. 237-247 Edition scientifique GB	Géo-Urbaine
2	2016	Evolution dynamique de la rivière Ilempona et méthode de protection artisanale des berges	Revue Géo-Eco-Trop, 2016,3, ns : pp. 235-246	Hydrogéomorphologie
3	2019	Geoculture and geosciences in the Region of Analamanga in Madagascar	IJARIE- ISSN(O)- 2395-4396, Vol-5 Issue-2 , 2019	Géoculture
4	2020	Contexte géomorphologique des géomatériaux et leurs caractéristiques géomécaniques dans les environs du campus Vontovorona.	Actes du colloque international « Géosciences : Ressources, Risques et Technologies » pp 72-87	Géomorphologie et Géotechnique

Evolution minéralogique et géochimique du profil latéritique nickélifère d'Ambatovy

Mandimbiharison A.J.¹, Randrianja R.², Rasolomanana E.^{2,3}, Rakoto H.³, Andrianaivo L.¹

¹ Département de Géologie, ESPA, Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101, E-Mail : raory@yahoo.fr

² Département Mines, ESPA, Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101

³ Laboratoire de Géophysique Appliquée, IOGA, Université d'Antananarivo, BP 3843, Antananarivo 101

Résumé- Le gisement du nickel d'Ambatovy, situé à 110 kilomètres à l'Est d'Antananarivo, appartient au versant oriental de Madagascar. Il est issu de l'altération des roches ultrabasiques et l'épaisseur du profil d'altération peut atteindre 80m, mais en moyenne elle varie entre 30 à 60m, selon la morphologie. Il comprend quatre ensembles d'horizons : un horizon supérieur composé de cuirasse ferrugineuse et de latérite rouge avec quelques concrétions ferrugineuses ; un horizon argileux (limonite) constitué par de la latérite jaune ou saprolite fine ; un horizon d'altération ou saprolite grossière où la structure originelle de la roche mère est encore conservée et la roche mère plus ou moins fracturée constituée par de la dunite termine cette séquence.

A la base, au niveau de la roche mère et de la saprolite grossière, les minéraux silicatés (olivine et serpentine) sont très abondants tandis que l'ilménite, la smectite et la goéthite sont présents mais à l'état de traces. Au niveau de la saprolite fine, les silicates primaires sont disparus et les goéthites commencent à montrer leur abondance. C'est à ce niveau que la teneur en nickel est importante (dépassant 1%), il est associé à la goéthite et incorporé dans la matrice de ce minéral. Au sommet du profil, la prédominance de la goéthite et l'abondance de l'hématite sont très remarquées. Le gisement d'Ambatovy est du type oxydé avec des teneurs faibles en nickel.

Mots clés : *Dunite ; Latérite ; Saprolite ; Nickel ; Ambatovy ; Madagascar*

Abstract- The nickel deposit of Ambatovy, situated to 110 kilometers in the East of Antananarivo, belongs to the east side of Madagascar. It is formed by weathering of the ultrabasic rocks and the thick lateritic profile is about 80 meters, but the average is between 30 to 60 meters, according to the morphology. It's characterized by four main horizons: a superficial horizon composed by ferruginous duricrust and red laterite with some iron concretions; a clay horizon (limonite) constituted by yellow laterite or fine saprolite; a weathered horizon or coarse saprolite where the original structure of the bedrock is conserved; and the bedrock more or less broken constituted by the dunite. The base, to the level of the bedrock and coarse saprolite, the silicate mineral (olivine and serpentine) are very abundant while the ilmenite, the smectite and the goethite are present but in traces. To the level of fine saprolite, the primary silicates disappear and the goethite begins to show their abundance. It is to this level that the content of nickel is important (up to 1%), it is associated to the goethite. To the summit of the profile, the predominance of the goethite and the abundance of hematite are much noticed. The weathering nickel deposit of Ambatovy is an oxide deposit type with weak content of nickel.

Key words: *Dunite; Laterite; Saprolite; Nickel; Ambatovy; Madagascar*

1. Introduction

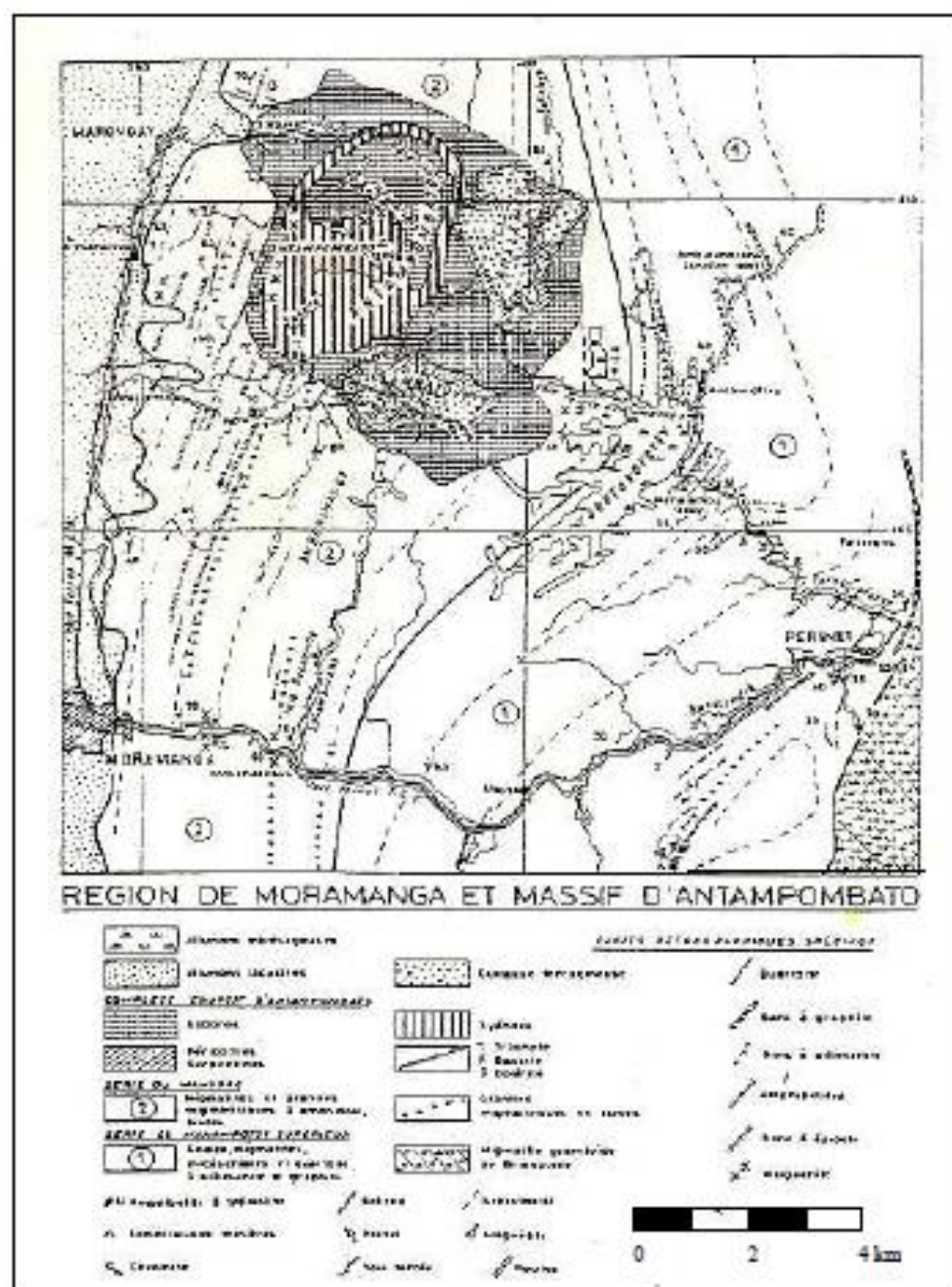
Les formations géologiques de surface, dites superficielles dont les latérites en font partie, renferment des produits métalliques : fer, nickel, aluminium, chrome, cobalt, etc. ou des métaux nobles comme l'or, qui dans certains cas peuvent être économiquement rentables et exploitables. L'altération latéritique des roches ultrabasiques conduit à la différenciation d'un épais manteau d'altérites nickélifères qui peuvent constituer des gisements de nickel et/ou du cobalt dans diverses régions du globe (Trescases, 1975, 1986). Et, c'est le cas du gisement de nickel d'Ambatovy-Analamay, découvert pour la première fois lors du levé géologique au 1/100 000^e de la région de Moramanga par Rantoanina en 1960. Mais comment évoluent-ils les éléments comme les Fe, Si, Al, Mg, Cr, Ni, etc. et certains minéraux silicatés le long de ce profil latéritique nickélifère ?

2. Cadres géologique et géomorphologique

La région étudiée, incluse dans la série de migmatites et migmatites « granitoïdes » des rides anticlinales internes selon la nomenclature de Hottin (1976), fait partie du bloc d'Antananarivo d'après les travaux de Collins et Windley (2003). Elle est constituée essentiellement par un ensemble de migmatites avec intercalation de formations résiduelles d'ectinites et d'intrusions basiques et ultrabasiques plus ou moins orthogneissifiées (micaschistes, quartzites, gneiss, charnockite, amphibolites, pyroxénites, gabbros et péridotites).

Le gisement ferro-nickel d'Ambatovy et d'Analamay se trouve au sein d'une formation complexe dite « Complexe d'Antampombato », grand massif intrusif elliptique dont le grand axe mesure 12km et le petit axe de 6 à 7km, orienté N15°W suivant son grand axe et constitué essentiellement de gabbro (Delbos et Rantoanina, 1961). On y rencontre aussi une masse syénitique, deux petits massifs de péridotites sur lesquels se développe une épaisse altération latéritique surmontée par des cuirasses ferrugineuses. De nombreux filons de basaltes, dolérites, rhyolites, trachytes recoupent l'ensemble de ces différentes formations (Figure 1).

Malgré la couverture végétale, la morphologie reste bien visible et les lignes de crêtes sont fréquemment orientées Nord-Sud et apparaissent en « dents de scie », tandis que les flancs des alignements principaux sont découpés par une série de vallées en V. Le relief est tantôt moutonné arrondi, tantôt accidenté.



3. Matériels et méthodes

Les échantillons analysés proviennent : d'un sondage carotté « S1 » effectué par SIF Bachy, de coordonnées (X=804 600m, Y=596 600m) atteignant la roche mère (Service géologique); du talutage d'un affleurement appelé « Zone C » de coordonnées (X= 803 550m, Y= 596 700m) et des échantillons prélevés en cours de route dénommés « AMB11, AMB17 ». La figure 2 représente la disposition de ces points d'échantillonnages sur fond géologique. Après la description macroscopique des profils, les échantillons prélevés ont fait l'objet d'une étude minéralogique, chimique et pétrographique.

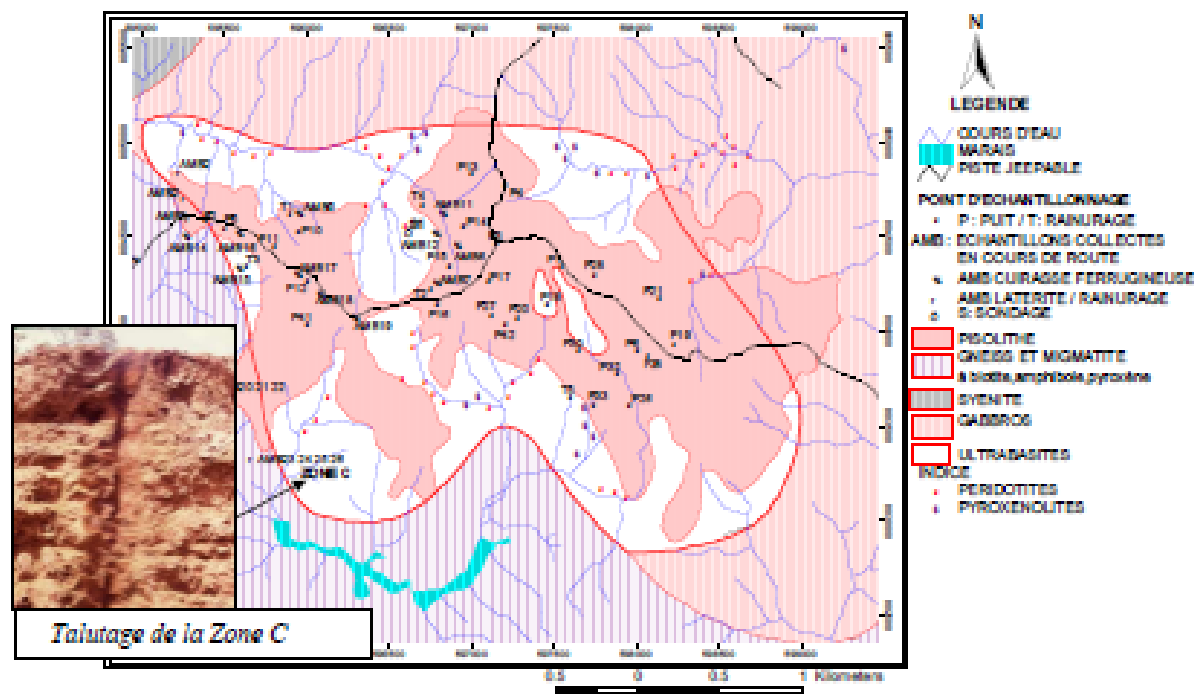


Figure 2- Localisation des points d'échantillonnages à Ambatovy

L'analyse minéralogique des échantillons a été réalisée par diffractométrie des rayons X au Laboratoire de Géologie des Argiles à l'Université de Liège. Pour la diffraction au rayon X, un échantillon par horizon a été analysé pour chaque profil. Cette analyse porte sur « poudres totales » et sur « fractions argileuses inférieures à 2µm ».

Les analyses chimiques ont été réalisées au Laboratoire de Géochimie de Louvain-la-Neuve, par spectrométrie d'émission de plasma à courant continu (DCP).

4. Description et résultats

4.1. Description des deux profils

La Zone C, située sur le flanc d'un versant à 970 mètres d'altitude, présente une épaisseur de l'ordre de 8 à 10 mètres où l'on peut distinguer d'après la figure 3 ci-dessous, cinq horizons.

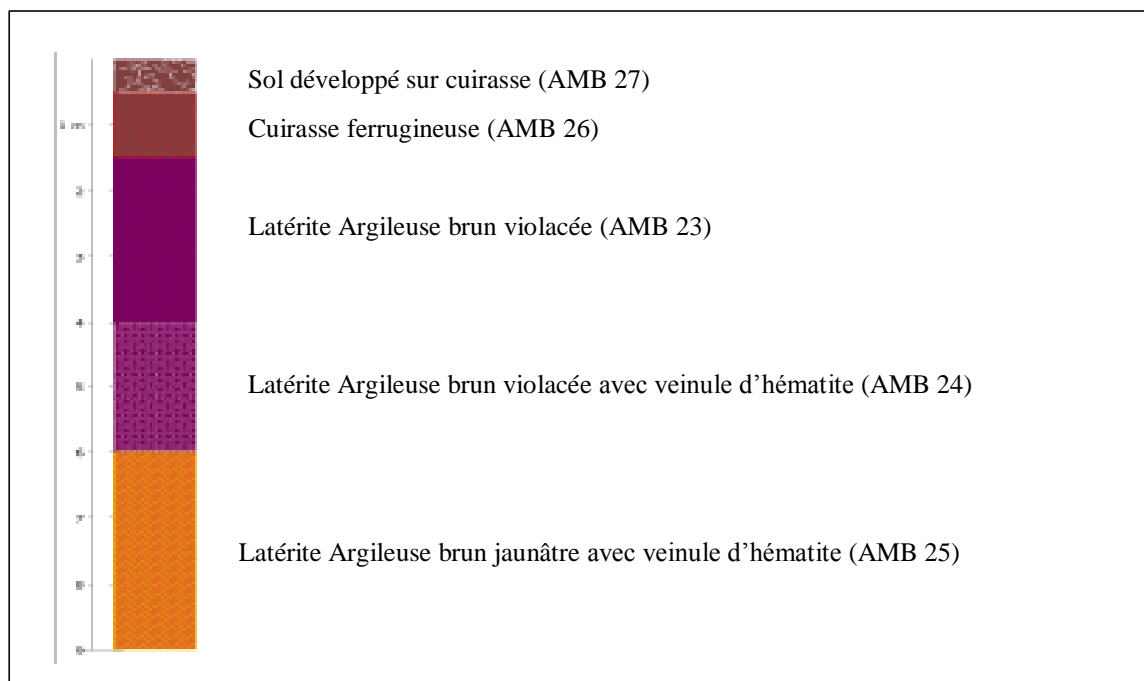


Figure 3 : Profil latéritique de la Zone C

Pour le « Profil S1 », la répartition de l'ensemble du faciès d'altération est donnée du haut en bas par la Figure 4 ci-dessous :

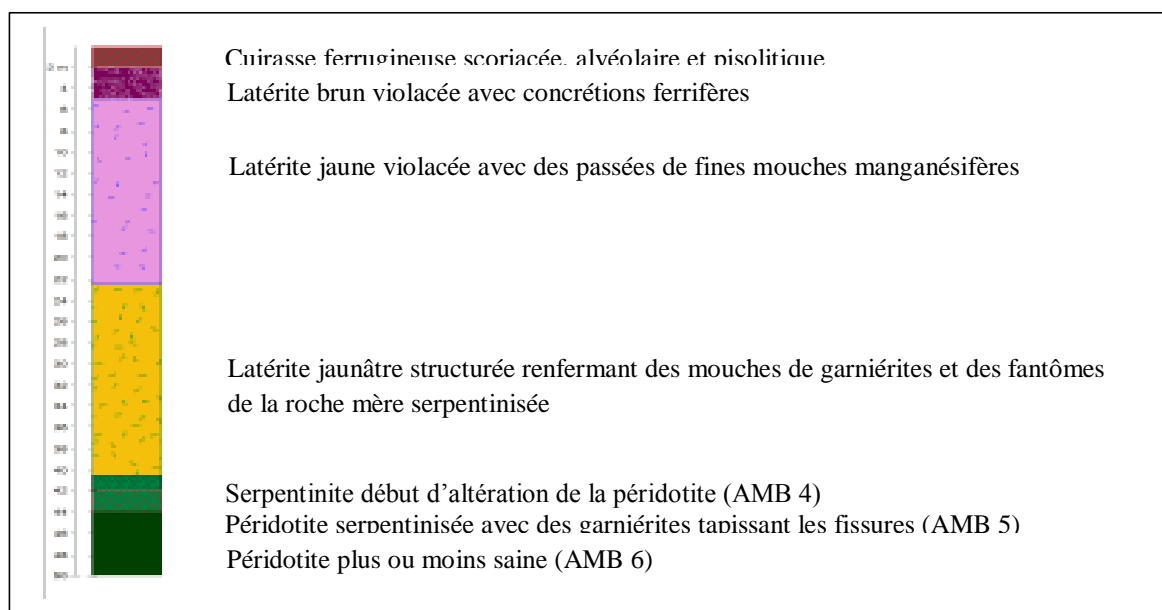


Figure 4 : Profil vertical du sondage S1

4.2. Résultats des analyses par diffraction de rayons X

Tous les échantillons des 2 profils étudiés ont été analysés par diffraction de rayons X. Les résultats de cette analyse sont représentés sur les Figures 5 et 6 et le Tableau 1, ci-après :

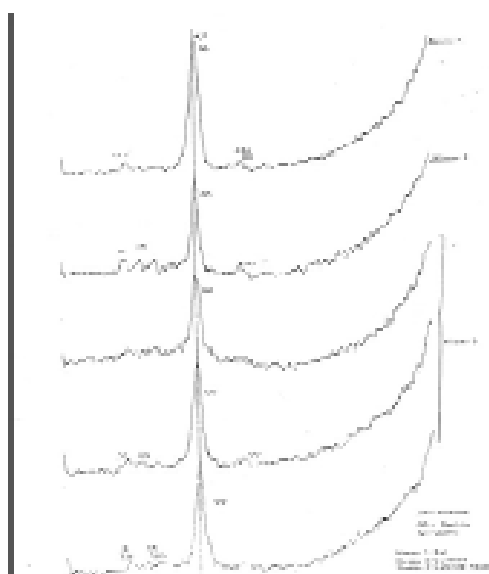


Figure 5- Diffractogramme RX du profil C

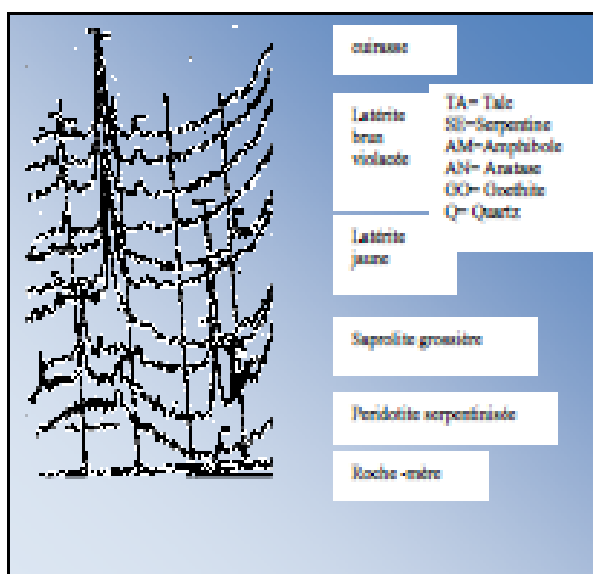


Figure 6- Diffractogramme RX du Profil S1

Tableau 1- Résultat des analyses par diffraction au rayon X

GO	HE	AN	GI	Q	SM	SE	AM	TA	MG	IL	OL	Am	CH	Int	K	Echant	prof
+++	++	(+)	-	++	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	AMB 27	0,5
+++	+++	++	(+)	+++	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	-	-	AMB 26	1,5
+++	+++	++	(+)	++	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	-	-	AMB 23	4
+++	+++	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	-	-	AMB 24	6,5
+++	+++	++	++	++	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	-	-	AMB 25	9
MINÉRALOGIE DE LA ZONE C																	
++	++	++	+++	(+)	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	-	-		2
+++	++	(+)	+++	(+)	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	-	-		5
+++	(+)	-	++	(+)	-	-	++	-	-	-	-	++	-	(+)	-		40,5
+++	-	-	(+)	++	-	-	-	-	-	-	-	(+)	-	-	-		42
(+)	-	(+)	-	++	++	+++	-	-	-	-	++	++	-	-	-	AMB4	43,2
(+)	-	(+)	-	(+)	++	+++	++	++	(+)	-	+++	++	(+)	(+)	-	AMB5	44,6
(+)	-	-	-	-	(+)	+++	-	-	++	(+)	+++	++	-	(+)	-	AMB6	45
MINÉRALOGIE DU PROFIL S1																	

4.3. Résultats des analyses chimiques des horizons d'altération

Les échantillons analysés, représentant les horizons d'altération, sont de granulométrie inférieure à 300µm et sont soumis à une décomposition acide totale. Pour l'horizon supérieur composé de « cuirasse ferrugineuse » deux échantillons AMB11 et AMB 17 ont été analysés et les résultats sont représentés sur le Tableau 2 suivant :

Tableau 2- Composition chimique de l'horizon supérieur « cuirasse ferrugineuse »

Élément Echantillon	Teneur en %							Teneur en ppm									
	Fe	Al	Mg	Mn	Cr	Ti	Ni	Zn	Cu	V	Co	Sb	Pb	La	Y	Ba	As
AMB11	52,8	5,16	0,34	0,30	0,39	3,20	0,12	118	168	436	76	54	33	7	6	60	22
AMB17	55,7	3,97	0,43	0,24	0,54	4,16	0,11	289	116	537	108	81	42	16	14	43	40

Pour la Zone C, les échantillons analysés AMB23, AMB24, AMB25, AMB26, issus du tabutage et quartage d'un affleurement, sont constitués principalement de « latérite rouge avec des pisolites ». Les résultats sont représentés par le Tableau 3, ci-après :

Tableau 3- Composition chimique de l'horizon « latérite rouge »

Élément	Teneur en %							Teneur en ppm									
	Fe	Al	Mg	Mn	Cr	Ti	Ni	Zn	Cu	V	Co	Sb	Pb	La	Y	Ba	As
AMB26	64,3	3,32	0,16	0,13	0,69	2,42	0,16	122	66	378	65	54	24	11	9	24	7
AMB23	44,3	3,88	0,06	0,18	0,90	0,44	0,98	256	72	174	34	43	13	5	4	1	8
AMB24	47,5	6,57	0,24	0,20	0,60	1,65	0,78	182	111	373	64	58	28	13	10	49	22
AMB25	42,6	4,23	0,14	0,10	0,55	1,90	0,63	210	82	275	54	52	19	5	5	5	16

Pour le profil complet « cuirasse, latérite rouge, latérite jaune, saprolite grossière, roche mère » les échantillons analysés sont issus du sondage S1 et les résultats sont récapitulés dans le Tableau 4 suivant :

Tableau 4- Composition chimique des horizons « cuirasse, latérite rouge, latérite jaune, saprolite grossière, roche mère »

Élément	Teneur en %							Teneur en ppm									
	Fe	Al	Mg	Mn	Cr	Ti	Ni	Zn	Cu	V	Co	Sb	Pb	La	Y	Ba	As
0-2m Cuirasse	40,9	9,87	0,47	0,28	0,26	5,72	0,12	147	340	842	154	109	58	11	10	7	55
2 – 5 m Latérite rouge	51,4	6,66	0,52	0,31	0,36	3,52	0,36	257	381	811	145	65	42	15	13	126	26
5- 42m Latérite jaune	42,6	5,06	2,77	0,68	1,98	0,36	1,02	556	122	116	675	91	33	70	98	57	15
42-44m Saprolite	18,6	3,12	16,91	0,22	0,72	0,52	0,62	276	121	117	191	58	81	86	82	34	31
>45m Roche mère	12,5	1,91	22,52	0,22	0,15	0,14	0,39	111	509	31	159	31	79	3	3	27	25

5. Interprétation

5.1- Interprétation des diffractogrammes

➤ *Roche mère et « saprolite grossière » ou « niveau d'altération pistache »*

Les diffractogrammes montrent la prédominance des minéraux silicatés (olivine, serpentine). Ils révèlent aussi la présence de magnétite. L'ilménite, la smectite, la goéthite et les interstratifiés sont présents à l'état de trace. Les goéthites apparaissant à la base du profil à l'état de trace sont mal cristallisés.

Au-dessus de la roche mère saine, correspondant à la péridotite très légèrement serpentinisée, apparaissent le talc, l'amphibole, le chlorite secondaire et le quartz qui est présent dans les

échantillons du profil sauf dans la roche mère fraîche s'identifie sur base de réflexion à 3,55 – 3,43Å. Au sommet de la « saprolite grossière » commence l'individualisation de la goéthite. On y remarque aussi la présence de gibbsite. La présence des amorphes très remarquée à la base du profil S1 se caractérise par la remontée spectaculaire du bruit de fond. Au sommet de la saprolite grossière, l'olivine tend à disparaître tandis que les minéraux serpentinisés maintiennent leur stabilité.

➤ « Latérite jaune » ou « saprolite fine »

Les silicates primaires ont totalement disparu tandis que les silicates secondaires néoformés (talc, amphibole) sont stables dans le niveau (39,5 – 40,5m). A partir de ce niveau, les goéthites commencent à montrer leur abondance mais elles sont toujours mal cristallisées. L'hématite, qui n'était pas discernée à la diffraction de RX à la base du profil, fait son apparition mais encore à l'état de trace.

➤ « Latérite rouge » et « cuirasse »

Les deux profils montrent la prédominance de la goéthite dans la partie supérieure du profil. A côté de cette goéthite se distingue la présence et parfois même l'abondance de l'hématite.

Pour le profil « S1 », la présence et l'abondance de la gibbsite dans les 4 niveaux sont remarquables, tandis que le quartz et les amorphes sont à l'état de trace.

Pour le profil « C », au niveau « cuirasse », l'échantillon AMB26 révèle l'abondance de la goéthite, hématite et quartz. L'anatase est également présente, contraire à l'observation réalisée dans le profil « S », la gibbsite est peu développée dans le profil « C ». Le bruit de fond élevé à la base du profil « S » révèle la présence abondante des produits amorphes. Ces produits amorphes évoluent partiellement en smectite mal cristallisée type nontronite.

Ces observations correspondent aux propos de Besset (1978) pour qui la présence de substances amorphes à la base du profil caractérise une amorphisation et silicification de la goéthite. L'analyse par diffraction de rayon X montre la stabilité des minéraux serpentineux. Cette stabilité est matérialisée par l'individualisation des pics de minéraux serpentineux à des stades plus avancés de l'altération, en l'occurrence dans le niveau supérieur de la « saprolite grossière ».

La dominance de la goéthite dans la partie supérieure des profils a été notée également par des nombreux auteurs. Segalen (1964) rapporte que les produits ferrugineux se présentent sous forme cristallisée ou amorphe, ou seront inclus dans des molécules complexes.

Suite à l'altération météorique, les minéraux ferromagnésiens de la roche – mère sont remplacés progressivement par des minéraux néoformés tels les oxyhydroxides de Fe ou d'Al, smectite, quartz et les oxydes de Mn (Trescases, 1975 ; Pelletier, 1983).

En résumé, les silicates primaires (olivine et serpentine) sont rapidement détruits lors de l'altération. L'olivine qui est le premier minéral altéré, abandonne des produits amorphes, d'où l'importance et l'abondance des amorphes à la base du profil.

Les minéraux serpentineux résistent beaucoup plus que l'olivine, et lors de leur destruction ils laissent aussi des résidus amorphes. Les silicates secondaires néoformés comprennent le talc et l'amphibole et se rencontre dans le niveau inférieur de la « latérite jaune ».




Les hydroxydes, en l'occurrence la goéthite, prédominent la « zone limonite ». Ces goéthites présentent le terme ultime de l'évolution de péridotite en surface.

5.2. Interprétation des analyses chimiques

➤ Pour le *profil complet* dit *Profil S1*, les faits suivants sont observés :

- Fe - La teneur en fer s'accroît avec la profondeur dans les 5 premiers mètres qui constituent la zone « latérite rouge ».
Elle passe de 40 à 54%. Dans la zone « latérite jaune » elle passe de 37 à 48% puis subit rapidement une diminution jusqu'à la base du profil.
- Mg - La teneur en Mg décroît depuis la base jusqu'au niveau « latérite jaune ». Elle passe ainsi de 22,52% à 5,8%. En subsurface, dans la zone « latérite rouge » elle est très faible 10 à 20 fois moindre qu'à la base. Il évolue de façon contraire au Fe.
- Al - Toujours présent dans le profil, sa teneur maximale se trouve dans la cuirasse. D'une façon générale, elle diminue progressivement en profondeur.
- Ti - Il évolue de la même façon que l'Al. Sa teneur est très faible à la base du profil par rapport à celle de l'Al.
- Ni - La teneur en Ni varie dans tout le profil de 0,10 à 1,3%. Elle est très faible dans la cuirasse ferrugineuse (entre 0,10 à 0,16). Une augmentation progressive vers la profondeur est sensible. La teneur la plus élevée se trouve au bas du profil juste au dessus de la zone saprolite grossière. Une diminution progressive est ensuite observée en descendant plus profondément vers la roche-mère.
- Co - La teneur en Co varie peu (0,14 à 0,19) le long du profil sauf que dans la zone « latérite jaune » elle a subi une augmentation brusque avec une valeur maximale (0,67) qui est peut être due par la présence des « mouches noires manganésifères ».
- Mn - La teneur en Mn augmente jusqu'au contact de la zone saprolite grossière. Elle atteint son maximum à ce niveau où l'on trouve des « mouches noires manganésifères ».
- Cr - Il est présent dans tout le profil avec des teneurs très variables allant de 0,02% à 3,01%. Dans la cuirasse, sa teneur est faible 0,26%. Elle accuse une légère augmentation dans la « latérite brune jaunâtre ». Dans l'horizon « latérite jaune » où l'on trouve des « mouches noires manganésifères », sa teneur est maximale.
- V - La teneur maximale se trouve dans la « latérite brune jaunâtre » sous-jacente à la cuirasse ferrugineuse. Son allure ressemble à celle de Ti et de Al.
- Y et La - sont présents dans le profil avec une teneur constante et faible dans les cinq premiers mètres. Puis, elle augmente jusqu'au niveau « latérite jaune » pour diminuer brusquement jusqu'à la base du profil

En résumé, on peut observer 2 parties distinctes au sein de ce profil « S1 », « cuirasse et latérite rouge » et « saprolite fine, grossière et roche-mère », où l'on remarque 3 tendances d'évolution :

- une évolution croissante en surface ()
- une évolution décroissante en profondeur ()
- une stagnation plus ou moins constante qui ne montre pas une évolution de teneur ()

Pour ces 2 parties, on regroupe ces diverses tendances d'évolution dans le Tableau 5 ci-après :

Tableau 5- Tendance d'évolution des éléments dans l'horizon du profil

« Cuirasse » et latérite rouge »	
Fe, Ni, Zn, Ba	→
Al, Ti, As, Sb, Pb	→
Y, La, Cu, Co, Cr, Mg, Mn	→
« Saprolite fines, grossières » et « roche-mère »	
Fe, Al, Mn, Cr, Ni, Co, Zn, Sb, Y, La	→
Mg, Pb, As, Cu	→
Ti, V	→

Ce tableau 5 montre l'aspect totalement différent des comportements géochimiques des éléments au sommet du profil et à sa base.

➤ Pour le *profil C*, malgré le peu d'échantillons, il ressort les faits suivants :

- au niveau de « cuirasse » les Fe, Ti, Co, V présentent une teneur maximale ;
- au niveau sous-jacent à la cuirasse, les teneurs en Mg, Ti, Co, V, Y, La, Pb accusent une diminution brutale. Tandis que les teneurs en Ni, Cr, Zn présentent un maximum pour diminuer par après vers le bas du profil ;
- dans le niveau latéritique brun jaunâtre concrétionnée, on assiste à une augmentation de teneur en Fe, Mg, Al, Mn, Ti, Co, V, Cu, Y, La, Pb, As, Sb.

Contrairement au log du profil « S1 », le fer se concentre dans la partie supérieure formant la cuirasse et que l'Al a eu tendance à se concentrer vers la base.

En tenant compte de toutes les teneurs des éléments de tous les horizons du profil latéritique nickélifère, le coefficient de corrélation entre les divers éléments est représenté par le tableau 6 ci-après.

Tableau 6 : Coefficient de corrélation entre les éléments

	Fe	Al	Mg	Mn	Cr	Ti	Ni	Zn	Cu	V	Co	Sb	Pb	La	Y	Ba	As
Fe	1,00																
Al	0,38	1,00															
Mg	- 0,94	- 0,54	1,00														
Mn	0,04	0,23	- 0,04	1,00													
Cr	0,11	- 0,11	- 0,18	0,71	1,00												
Ti	0,46	0,66	- 0,42	- 0,13	- 0,55	1,00											
Ni	- 0,23	- 0,17	0,05	0,31	0,60	- 0,81	1,00										
Zn	0,06	- 0,02	- 0,10	0,78	0,88	- 0,38	0,61	1,00									
Cu	- 0,46	0,17	0,50	0,10	- 0,51	0,30	- 0,34	0,30	1,00								
V	0,57	0,79	- 0,57	- 0,05	- 0,43	0,91	- 0,60	0,24	0,25	1,00							
Co	- 0,17	0,05	0,14	0,93	0,80	- 0,30	0,42	0,83	0,04	- 0,28	1,00						
Sb	0,32	0,73	- 0,41	0,53	0,28	0,57	- 0,17	0,42	- 0,02	0,57	0,47	1,00					
Pb	- 0,78	- 0,11	0,84	0,07	- 0,33	0,05	- 0,27	- 0,12	0,63	- 0,09	0,15	0,05	1,00				
La	- 0,36	- 0,14	0,34	0,54	0,82	- 0,44	0,40	0,68	- 0,24	- 0,36	0,68	0,29	0,30	1,00			
Y	- 0,30	- 0,11	0,27	0,60	0,76	- 0,46	0,47	0,79	- 0,23	- 0,30	0,82	0,35	0,06	0,05	1,00		
Ba	0,28	0,19	- 0,10	0,41	0,02	0,14	- 0,12	0,24	0,30	0,38	0,24	0,09	0,06	0,15	0,16	1,00	
As	- 0,14	0,56	0,11	0,05	0,43	0,71	- 0,51	- 0,13	0,45	0,59	- 0,02	0,83	0,50	0,05	- 0,02	0,02	1,00

Les caractères en gras signifient que la corrélation est significative. Malgré le peu d'échantillons analysés (N=11), le tableau corrélatif montre une certaine tendance :

- une corrélation **positive et très forte** (*entre 0,80 à 0,95*) : Mg/Pb ; Mn/Co ; Cr/Zn ; Zn/Co ; Co/Y. Les deux éléments varient de manière identique sur toute la longueur du profil ;
- une corrélation **négative et très forte** (*entre -0,80 à -0,95*) : Mg/Fe ; Ti/Ni. Les deux éléments varient de manière diamétralement opposée l'augmentation de l'un de ces deux facteurs entraîne une diminution relative de l'autre et vice versa ;
- une corrélation **positive et forte** (*entre 0,70 à 0,80*) : Al/V ; Al/Sb ; Mn/Cr ; Mn/Zn ; Cr/Co ; Cr/Y ; Ti/As ; Zn/Y ;
- une corrélation **négative et forte** (*entre -0,70 à -0,80*) : Fe/Pb ;
- une corrélation **positive et moyenne** (*entre 0,50 à 0,70*) : Fe/V ; Al/Ti ; Al/As ; Mn/Sb ; Mn/La ; Mn/Y ; Cr/Ni ; Cr/La ; Ti/Sb ; Ni/Zn ; Zn/La ; Cu/Pb ; V/Sb ; V/As ; Co/La ; Sb/As ; Pb/As ;
- une corrélation **négative et moyenne** (*entre -0,50 à -0,70*) : Mg/Al ; Mg/V ; Cr/Ti ; Cr/Cu ; Ni/V ; Ni/As

6.- Discussions

6.1- Sur base géochimique

Sur base des log géochimiques des divers éléments des deux profils « S1 » et « C » (annexes 1, 2), et du coefficient de corrélation, on peut suivre la répartition des éléments majeurs, mineurs et les traces, ainsi que leurs associations.

* Le Fe et le Mg ont un comportement géochimique totalement différent. Alors que le Fe se concentre dans les niveaux latéritiques supérieurs, dans le même temps le Mg est lessivé et se concentre dans le niveau saprolitique grossier.

Suivant Besset (1978), après lessivage de Mg et Si, se produisent des accumulations des éléments résiduels Fe, Cr, Al, Mn, Co, Ni, Ti, qui vont constituer l'essentiel du profil d'altération.

* Dans le profil « S », Al, Ti et As se concentrent dans la zone « cuirasse ferrugineuse ». Al se concentre plus que le Fe dans ce niveau superficiel.

Suivant Zeissink (1969), Norton (1973), l'Al est très insoluble au cours de l'altération d'où sa rétention au sommet du profil. Ti suit exactement l'allure de Al ; ces deux éléments présentent d'ailleurs un coefficient de corrélation moyennement élevé (0,66).

Suivant Nahon (1976), l'augmentation de Ti correspond au faciès le plus argileux c'est-à-dire le plus riche en Al. Les horizons les plus pauvres en Al sont les plus dépourvus de Ti. Le titane a un comportement résiduel comme le fer, l'aluminium.

* Fe, V, Cu, se concentrent plus dans la zone sous cuirasse formée de « latérite brun jaunâtre ». De nombreux auteurs (Fischer, 1959 ; Hataway, 1959 ; Tardy, 1969 ; Paquet, 1969 ; Karpoff, 1973) reconnaissent l'affinité du Fe et du V en milieu latéritique. La rétention du Cu dans les niveaux latéritiques a déjà été signalée par Trescases (1975), Zeeger et Leprun (1979), Butt et Nickel (1981).

Le comportement identique du Cr et du V démontré par Tardy (1969) n'est pas applicable dans notre cas. Pour le profil « S », dans les 5 premiers mètres, le Fe a tendance à se concentrer en profondeur. Ce fait prouve que dans cette zone, le lessivage affecte non seulement Mg et Si mais également Fe. Cette soustraction du fer entraîne une accumulation relative d'Al sous forme de gibbsite (Boucqier et al. 1984).

Le log géochimique montre, pour la partie supérieure, une allure inverse entre Fe et Al.

* **Mn, Co, Ni, Cr, Zn**, se concentrent dans l'horizon dite « *latérite jaune* » à la base duquel se trouvent des « mouches noires manganésifères ». La variation de teneur en Mn suit exactement celle de Co dans le profil « S ». Ce parallélisme fait penser que Mn et Co sont associées dans une même phase minérale. Mn est appauvri dans l'horizon de cuirasse pour s'enrichir plus bas dans le profil en coprécipitant avec Co et Ni dans des oxydes de manganèses (Zeissink, 1969 ; Trescases, 1975).

Par ailleurs, Ammon Chokroum (1972) démontre l'absorption possible du Ni dans les oxydes de manganèses, ce qui semble être le cas dans notre étude.

Trescases (1975) note que le comportement complexe du Zn l'associe à la fois au Ni et au Mn, ce qui semble confirmer dans notre cas. Cet auteur précise aussi que Cr, Mn, Co, Ni sont rangés parmi les éléments majeurs des péridotites.

* La et Y présentent une allure semblable et se concentrent dans le niveau sommital de l'horizon « saprolite grossière » ou « altération pistache ».

* La teneur en Mg décroît lentement de la roche-mère à la saprolite grossière et devient brutalement très faible dès la base de la saprolite fine. Ce comportement de Mg est caractéristique de la plupart des manteaux d'altération des péridotites en zones chaudes, il a déjà été décrit par Trescases (1975), Zeissink (1969) et Schellmann (1964).

6.2- Sur base minéralogique

De l'observation des données de rayons X et de la détermination pétrographique (annexe 3), on peut résumer les faits suivants :

➤ Base du profil « Roche-mère » et « Saprolite grossière »

La roche-mère est une péridotite serpentinisée qui montre l'association minéralogique suivante : olivine – serpentine – magnétite – et comme minéraux accessoires : ilménite et goethite.

Les noyaux d'olivine ont une forme polyédrique et sont enserrés dans les réseaux serpentineux. L'évolution de ces noyaux est très rapide. D'abord, les bordures sont corrodées et renferment des produits amorphes ferrugineux brunâtres. Ces produits amorphes sont un mélange de gels ferriques et siliceux (Trescases, 1975) repris par Besset (1978) sous le nom de « gel silico-ferrique ».

L'analyse par diffraction aux rayons X confirme également la présence de goethite, mais encore à l'état de trace, à la base du profil. Selon Trescases (1975), ce sont les hydroxydes qui s'organisent en lamelles microscopiques de goethite, au cours de l'altération des olivines. On note également la présence des traces de quartz et de la smectite.

Pour les minéraux serpentineux qui enserrent les noyaux d'olivine, leur altération est lente et progressive. Elle se traduit par l'amincissement des cloisons et par la présence des produits brunâtres au pourtour. Durant l'altération ces réseaux serpentineux abandonnent une faible quantité de produits amorphes très fortement colorés par les hydroxydes de fer qui s'organisent en goéthite (Trescases, 1975). Les goéthites, dans notre observation, s'individualisent au niveau supérieur de la saprolite grossière, alors que les serpentines disparaissent partiellement ou totalement.

A côté des silicates primaires, on observe la magnétite, l'ilménite. Ces minéraux s'évaluent respectivement en goéthite et en anatase, au cours de l'altération.

Toujours dans la zone « saprolite grossière », les diffractogrammes montrent la présence des minéraux néoformés, tels : talc, amphibole, illite (illite ouverte), chlorite (chlorite secondaire).

➤ *Sommet du profil « Saprolite fine », « cuirasse »*

Dans la zone « *Saprolite fine* », les transformations minéralogiques sont moins nombreuses. Les silicates primaires sont totalement disparus. Le talc et le quartz sont toujours présents. La goéthite qui était déjà apparue au sommet de la « saprolite grossière » a un caractère mal cristallisé marqué et comporte beaucoup d'impuretés. De nombreux auteurs (Zeissink, 1969 ; Trescases, 1975 ; Besset, 1978) suggèrent l'insertion d'Al, de Cr ou de Ni dans la goéthite.

L'horizon superficiel regroupant la « *latérite rouge* » et la « *cuirasse* » est caractérisé par la prédominance de goéthite avec un peu d'hématite. On soulignera aussi la présence du quartz, de l'anatase (qui est le produit de l'évolution de l'ilménite), de gibbsite et de l'absence de kaolinite.

Les mécanismes d'évolution des minéraux de roches ultrabasiques en milieu d'altération tropical ont été décrits par de nombreux auteurs : Zeissink (1969), Trescases (1975), Zeegers et Leprun (1979), Nahon et al. (1982), Pelletier (1983).

6.3- Sur la répartition chimique et minéralogique

En milieu latéritique, l'altération superficielle entraîne des destructions des minéraux et des néoformations successives qui se traduisent du point de vue géochimique par des libérations et de remobilisation d'éléments (Besset, 1978).

Sur le plan géochimique, les premiers stades d'altération des roches ultrabasiques, en l'occurrence la péridotite, se manifestent par une chute rapide de teneur en Mg, une diminution plus lente de teneur en Si et un enrichissement relatif en fer et en aluminium (Bibent, 1974). La diminution importante et brusque des teneurs en Mg entre la serpentine latéritisée et la latérite supérieure, ainsi que la teneur maximale en Ni dans ce dernier niveau, peuvent être expliquées par la présence des minéraux néoformés comme le talc et les oxydes de manganèse.

La répartition et la localisation des éléments au cours de l'altération, en particulier le nickel, sont regroupées sous forme d'un tableau.

Tableau 7- Répartition et localisation de quelques éléments dans le profil latéritique nickélicifère d'Ambatovy

Elements	Roche mère	Serpentine « saprolite grossière »	« latérite jaune » « saprolite fine »	« latérite rouge »
Fe	12,5	20,7	42,55	51,43
Al	1,91	2,49	5,06	6,67
Mg	22,52	18,26	5,31	0,52
Ni	0,39	0,69	1,02	0,34
Mn	0,22	0,23	0,68	0,3
Cr	0,13	1,03	1,99	0,3
Ti	0,14	0,10	0,36	3,52
Co	0,016	0,02	0,07	0,01
Cu	0,051	0,07	0,01	0,04
Zn	0,011	0,03	0,06	0,03
V	0,003	0,005	0,01	0,08
Composition minéralogique par ordre d'abondance	Olivine Serpentine Magnétite Amorphes Goethite Ilménite	Serpentine Olivine Talc nickelifère Amphibole Smectite Goethite Amorphes	Goethite Amphibole Talc Quartz Gibbsite Hématite Amorphes	Goethite Gibbsite Hématite Anatase Quartz Amorphes

De ce tableau 7, il ressort les observations suivantes :

- la teneur en Al augmentant vers le sommet du profil semble être concomitante de la néoformation de la gibbsite.

L'analyse par diffraction de Rayons X révèle la prédominance de la goethite dans la zone « limonitique » (latérite jaune et latérite rouge). Tandis que le log géochimique montre un enrichissement en Al. Peut-on dire, à partir de ces faits constatés, qu'au cours de l'altération, il y avait une substitution entre Fe et Al ;

- la forte diminution de teneur en Mg de la roche-mère jusqu'au sommet du profil s'explique par un lessivage intense en Mg qui par suite, va s'accumuler vers le bas du profil. Cet élément s'associe à l'olivine et aux serpentines, le talc aussi en est un minéral de néoformation ;

- la teneur en Fe augmente vers la partie supérieure du profil. A la base du profil, il est associé à la magnétite et dans la partie superficielle, il est surtout lié à la goethite qui est le produit d'évolution ultime des minéraux silicatés (olivine, serpentine) et oxydés (magnétite, hématite) ;

- la concentration relativement élevée en Ti dans la « latérite rouge » est liée à l'anatase ;

- la concentration relativement élevée en Mn, Cr, Co dans l'horizon « latérite jaune » est liée à la présence des « mouches noires manganésifères » ;

- la teneur en V augmente vers le sommet du profil, sa concentration maximale se trouve dans la partie supérieure du profil où la goethite prédomine ;

- pour le Ni sa teneur maximale se rencontre dans le niveau inférieur de l'horizon « latérite jaune » ou « saprolite fine » où la structure initiale de la roche-mère est encore conservée. Il est en association avec la goethite et les oxydes de manganèse. La goethite constitue le principal porteur du Ni dans l'horizon « limonitique ». Cette observation rejoint

l'analyse de Combes (1963) qui reconnaît pour la première fois la relation existante entre le nickel et la goethite.

Nos observations et analyses sont conformes à celles de Gordon et al. (1986). Le Ni est associé aux minéraux silicatés dans les fractions serpentineuses (*taille nickélifère*) (Trescases, 1975). Tous ces faits nous prouvent la complexité de répartition du Ni signalée par plusieurs auteurs et se rapportent plus ou moins à la classification de type « B » de Schellmann (1971) où le nickel est concentré à la base de l'horizon ferrugineux (base de la « saprolite fine »).

Pour le profil « S1 » d'Ambatovy, l'enrichissement en Ni commence dans l'horizon « latérite rouge » pour se concentrer encore plus à la base de la « saprolite fine » où l'on rencontre des « mouches noires manganésifères ». L'horizon silicaté (type « C » de Schellmann, 1971) est très peu développé dans ce profil « S1 ».

7. Conclusion

L'analyse minéralogique révèle l'abondance des amorphes dès la base du profil, l'olivine ainsi altéré, libère alors du Ni ce qui peut entraîner une redistribution de ce dernier. Du fait de la similitude des propriétés et surtout de la dimension de son rayon ionique avec le magnésium, le nickel peut être inclus dans de nombreux minéraux.

Mais pour le gisement d'Ambatovy, même si la teneur maximale en Ni se trouve dans la partie inférieure de la « Saprolite fine » ou « Latérite jaune » où se rencontrent des oxydes de manganèses, la goethite est la principale phase porteuse du nickel sur l'ensemble du profil. Cette observation est conforme à celle de Yougue Fouateux (2006). La zone silicatée est très peu développée. Avec les résultats des différentes analyses ne peut-on pas suggérer que les goethites d'Ambatovy sont alumineuses comme celles de Nouvelle-Calédonie décrites par Trescases (1975).

La composition chimique et la forme minéralogique sont primordiales pour le choix du traitement de latérite nickélifère. En se basant sur les travaux de Roorda (1977) la méthode hydrométallurgique s'applique mieux pour le traitement de ce gisement de Moramanga que celle pyrométallurgique. Mais n'est-il pas encore plus sain et moins destructif de l'environnement d'utiliser la méthode de biolixiviation ?

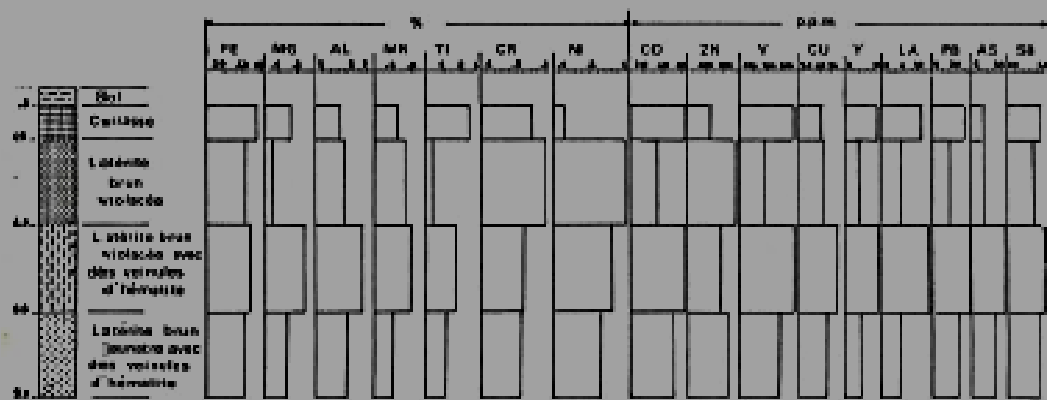
La présence des éléments de « terres rares » (La, Y, etc.) dans le profil latéritique nickélifère d'Ambatovy nous conduit à la question suivante : ces éléments plus ou moins valeureux que le nickel seront-ils déposés seulement dans les parcs à résidus ou seront-ils extraits ou valorisés ?

Références bibliographiques

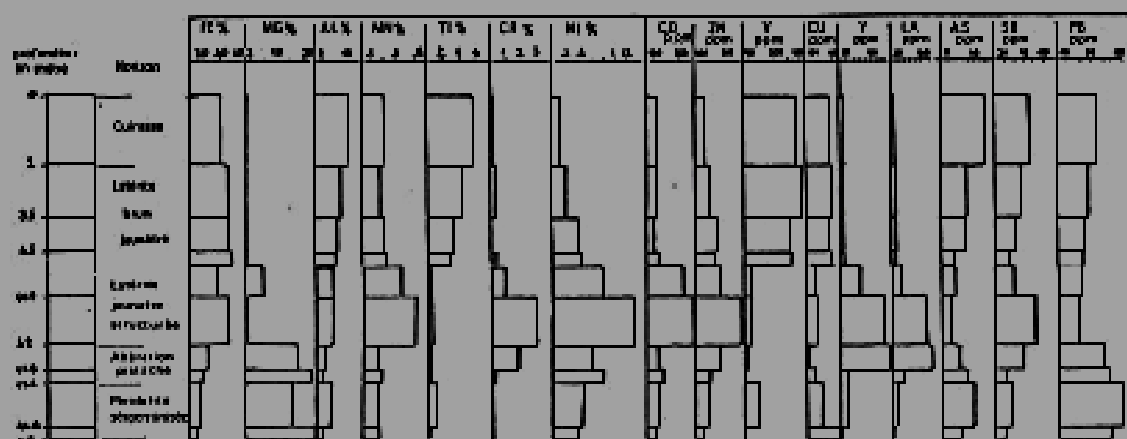
- Ammou Chokroum M., 1969 : Contribution à l'étude de la distribution du nickel dans les ferrites de Nouvelle Calédonie. *C.R. Acad. Sci., Fr.*, 268, n°12, pp1563-1566.
- Besset F., 1978 : Localisation et répartition successives du nickel au cours de l'altération latéritique des péridotites de Nouvelle Calédonie. *Mémoire C.E.R.G.H. Montpellier Tome XV*.
- Bibent B., 1974 : Essai de reproduction expérimentale de l'altération du type ferralitique de roches ultrabasiques et de quelques types de roches alumineuses. *Thèse de spécialité, CERGH Montpellier, 96p*.

- Boucqner G., Muller J. P., Boulange B., 1984, Les latérites : connaissances et perspectives actuelles sur les mécanismes de leur différenciation. *Ass. Franc., C.E. Sol.* 1984, p 123 – 138.
- Collins A., Windley B.F., 2003: The tectonic evolution of the central and northern Madagascar and its place in the final assembly of Gondwana. *Journal Geol.*, 110, 325-339
- Combes P.J., 1963 : A propos du nickel dans les latérites nickélifères de la Nouvelle Calédonie. *C.R. Acad. Sci., Fr.*, 256, 211-212.
- Delbos L., Rantoanina M., 1961: Les gisements fer-nickel des environs de Moramanga T.B.G. N° 106. *Service Géologique de Madagascar*
- Gordon R., Mahesh C., 1986: Developments in the AMAX-COFREMMI Acid Leach Process of Nickel laterites. *25ème Conférence annuelle des métallurgistes (C. J. M.) Août 17-20, 1986, Toronto.*
- Hottin, 1976 : Présentation et essai d'interprétation du Précambrien de Madagascar. *Bull. B.R.G.M., 2^{ème} série, Section V, N° 2, p 117-153.*
- Kuhnel R. A., Roorda H. J., Steensma J. J. S., 1978, Distribution and partitioning of elements in nickeliferous laterites. *Bull. B.R.G.M. Section II, N° 3, 1978, p 191-206.*
- Nahon D., 1979 : Cuirasses silicieuses ou silicrètes nickélifères dans les profils d'altération des roches ultrabasiques de Côte d'Ivoire Rôle des épigènes. *Sci. Géol. Bull.* 32, p 198-197.
- Nahon D., Paquet H., Delvigne J., 1982: Laterite weathering of ultramafic rock and the concentration of nickel in the western Ivory Coast. *Econ. Géol. Vol. 77, 1982, p 1159-1175.*
- Pelletier B., 1983 : Localisation du nickel dans les minerais « garniéritiques » de Nouvelle Calédonie. *Sciences Géol., Mém.* 73, 173-183.
- Rantoanina M., 1962 : Prospection et géologie au 1/100 000 de feuille Moramanga – Lakato (RS – 47). T.B.G. N° 111, *Service Géologique de Madagascar*
- Schellmann W., 1978: Behaviour of nickel, cobalt and chromium in ferruginous lateritic nickel ores. *Bull. Bur. Rech. Géol. Min., section II, 3, 9 275-282.*
- Segalen, 1964 : Le fer dans les sols. *Inst. Doc. Techn. O.R.S.T.O.M Paris*
- Tardy Y., Nahon D., 1985: Geochemistry of laterites, stability of Al-goethite, Al-hématite and Fe ± kaolinite in bauxites and ferrieretes : an approach to the mechanism of concretion formation. *American Journal of Sciences Vol. 283, Dec 1985, p 865-903.*
- Tardy Y., 1969 : Géochimie des altérations, étude des arènes et des eaux de quelques massifs cristallins d'Europe et d'Afrique. *Mémoire N° 31 Serv. Carte, Géol. de l'Als. Et Lor.*
- Trescases J. J., 1975 : L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formations des gisements nickélifères de Nouvelle Calédonie. *Mémoire O.R.S.T.O.M.* 78, (1975) 259p.
- Trescases J. J., 1986: Nickeliferous laterites. *Sci. Géol., Bull.* 32, 181-188.
- World Mining, Nov. 1970, Pacific basic nickel boom
- Yongue Fouateux R. et al, 2006: Nickel and cobalt distribution in the laterites of the Ionié region, south-east Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 45 (2006) 33-47.
- Zeegers et Leprun J. C., 1979 : Les cuirasses des pays cristallins de l'Afrique Occidentale sèche : genèse-transformations-dégradation. *Sci. Géol. Mémoire N° 58*
- Zeissink H. E., 1969: The mineralogy and geochemistry of a nickeliferous laterite profile (Greenvale, Queensland, Australia). *Mineral. Deposita (Bari.)* 4, 132-152.

Annexe 1- Log géochimique du profil C



Annexe 2- Log géochimique du profil S1



Annexe 3- Péetrographie microscopique

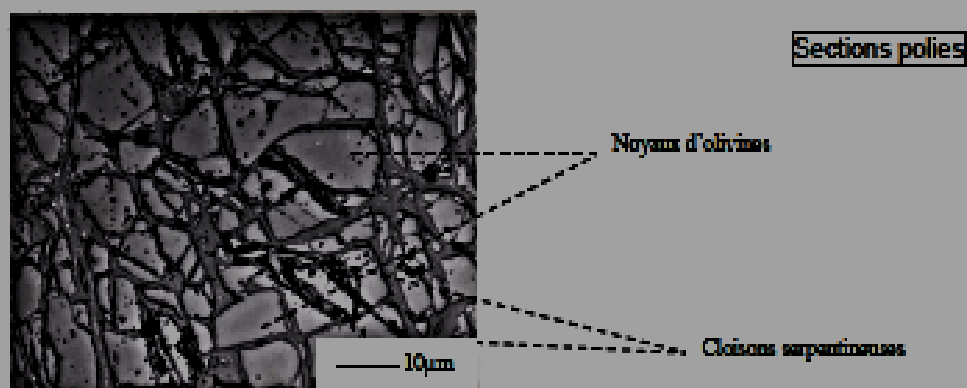


Figure A3.1- Début d'altération de la roche mère

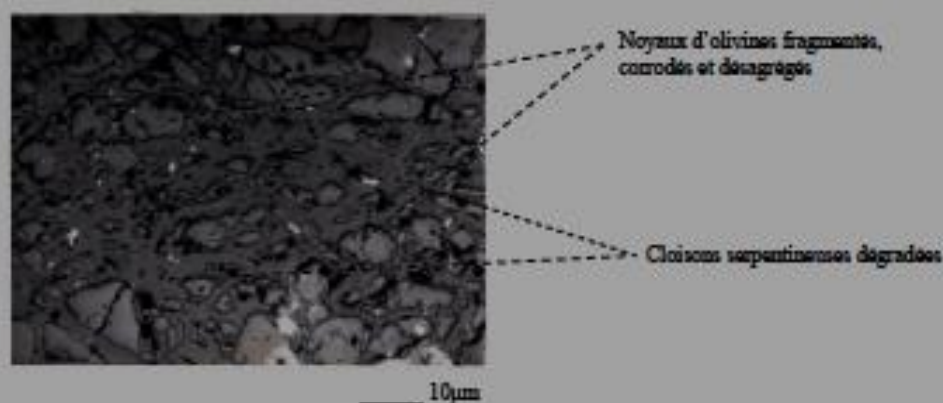


Figure A3.2- Stade plus avancé de l'altération

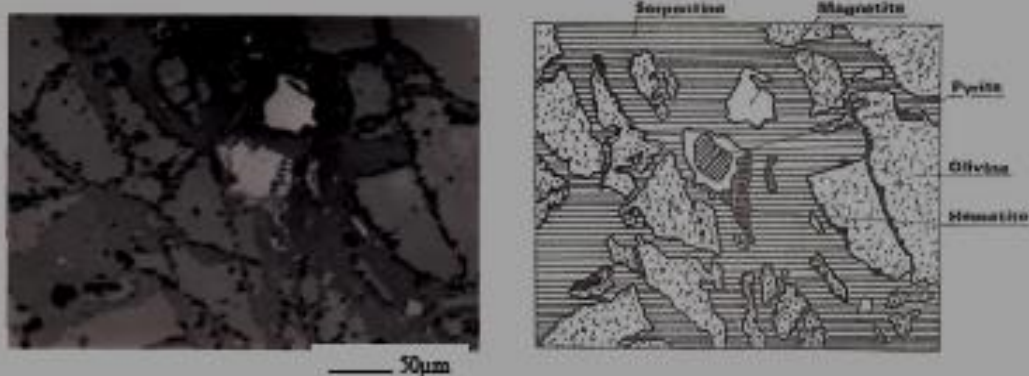
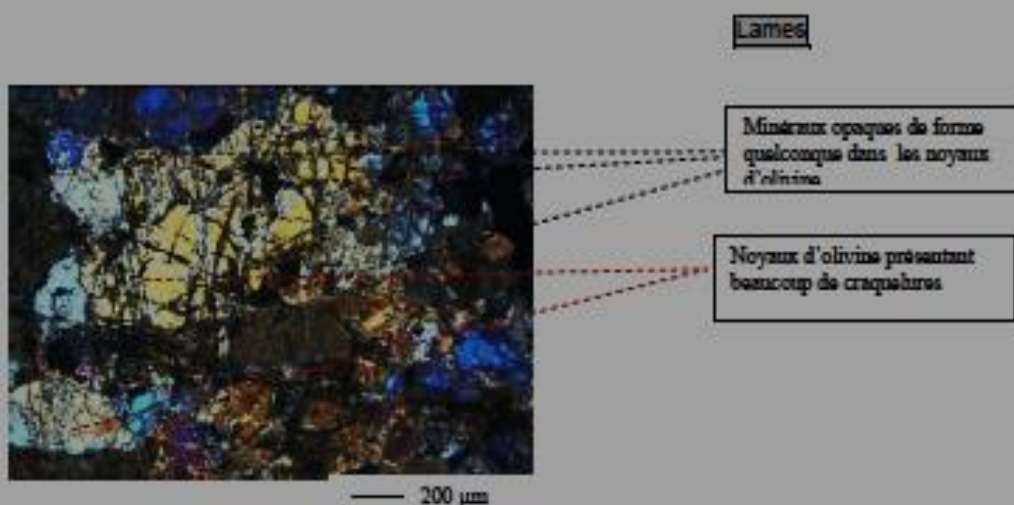


Figure A3.3- Association de magnétite-hématite-pyrite-serpentine-olivine
Les points noirs envahissant le plan de clivage des olivines sont des oxyhydroxydes de fer



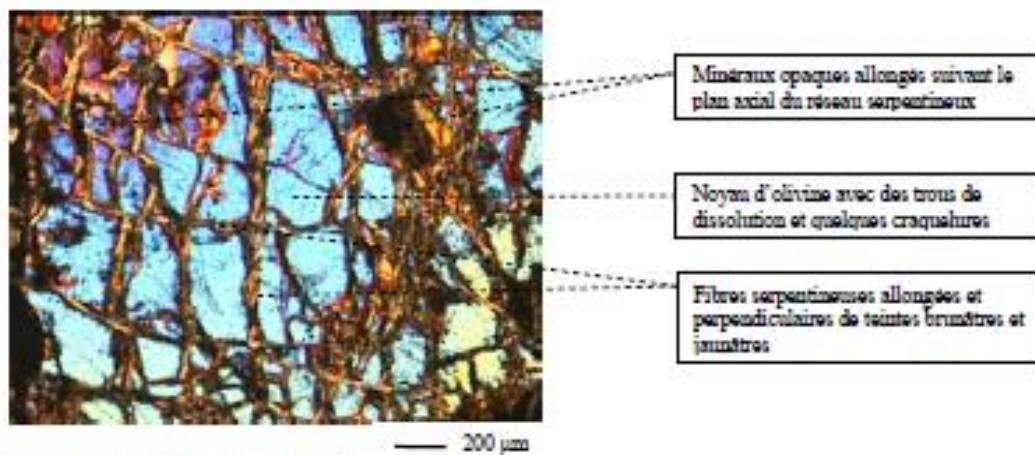


Figure A.3.5- Roche mère peridotite serpentinisée

PROBLEMATIQUE DE L'EROSION DU LITTORAL DE MORONDAVA

Razafimbelo M. R.J.⁽¹⁾, Mandimbiarison A. J.⁽²⁾, Rajaona R.D.⁽³⁾, Raselomanana F.H.⁽⁴⁾

⁽¹⁾Département des Sciences de la Terre, Faculté des Sciences, B.P.906, Université d'Antananarivo Madagascar

⁽²⁾Département de Géologie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, B.P. 1500 Université d'Antananarivo Madagascar

⁽³⁾CNRS UMR 6294, Laboratoire Ondes et Milieux Complexes, B.P.540, Université du Havre France

⁽⁴⁾Département Mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, B.P.1500, Université d'Antananarivo Madagascar

Abstract- The problem of erosion in Morondava has already raised in 1914, by the observation of a decrease of the coastline. The fight began in the years 1950-1960, with the construction of groynes along the waterfront of the city, the hardest part of the coast. The groynes have slowed down the process of erosion for a few years but not arrested him. A detailed analysis of the environment marine and continental, as well as a chronological study of the effects of human impacts in the region since 1924, helped to show the importance of two natural factors: the capture of one of the arms of the Morondava River associated with the effects of swell and coastal currents, and bringing in charge of groundwater. The deviation of the Hellot canal to Betaniapast, is also transformed into continuous erosive phenomenon.

In 2010, work has been made to protect the coastline and rehabilitation of port access road. This work involved a linear 170 m on the side of Morondava. Despite this, the city continues to see its coastline gradually eaten away by the sea. Currently, the city is faced with the choice of an appropriate method in the design of coastal areas.

Keywords- Morondava, erosion, coastline, protection, development plan.

Résumé- Le problème de l'érosion à Morondava a déjà été soulevé dès 1914, par l'observation d'un recul du trait de côte. La lutte a commencé dans les années 1950-1960, avec la construction d'épis tout le long du front de mer de la ville, partie la plus touchée du littoral. Les épis ont freiné le processus d'érosion pendant quelques années mais ne l'ont pas arrêté.

Une analyse détaillée du milieu marin et continental, ainsi qu'une étude chronologique des effets de l'anthropisation de la région depuis 1924, ont permis de montrer l'importance de deux facteurs naturels : la capture de l'un des bras de la rivière Morondava, associée aux effets de la houle et des courants littoraux, et la mise en charge de la nappe phréatique. La déviation du Canal Hellot vers la Passe de Betania, s'est également transformée en phénomène érosif continu.

En 2010, ont été réalisés des travaux de protection du littoral et de réhabilitation de la route d'accès au port. Cette œuvre a concerné un linéaire de 170m sur la côte de Morondava. Malgré cela, la ville ne cesse de voir son littoral rongé progressivement par la mer. Actuellement, la ville se trouve confrontée au choix d'une méthode appropriée dans la conception des aménagements littoraux.

Mots-clés- Morondava, érosion, littoral, protection, aménagement.

1. Introduction

Cet article s'inscrit dans le cadre d'une série de recherches sur le problème de l'aménagement et de la protection des littoraux de Madagascar. Dans cet article est proposée une synthèse des politiques d'aménagement et de gestion du littoral de Morondava depuis les années 1950. Elle permet de dégager quelques éléments de réflexion à prendre en compte pour les choix à venir. Dans un premier temps, l'état des lieux sur la situation actuelle en matière d'érosion, d'appropriation et d'usages du linéaire côtier par les différents acteurs du littoral, est présenté. Dans un deuxième temps, l'historique des politiques d'aménagement de la frange littorale permet d'en dresser un bilan exhaustif ; il montre l'hétérogénéité des choix en matière d'ingénierie côtière et des objectifs, dont la

plupart ne sont que partiellement atteints, au prix d'interventions parfois très coûteuses. Enfin, face aux phénomènes d'érosion du littoral, plusieurs options se présentent aux gestionnaires des espaces littoraux : une tentative de stabilisation du rivage par des enrochements et/ou des méthodes dites douces, accepter une zone de recul aussi appelée « repli stratégique », ou laisser faire [Klein et al. 2001].

2. Caractères généraux de la région étudiée

• Délimitation administrative

Le « *fiyondronana* » de Morondava comprend 5 sous-préfectures. Le Chef-lieu du *fiyondronana* se situe à 600 km d'Antananarivo. Il est relié à la capitale par la R.N 7 jusqu'à Antsirabe, et de là, par la R.N 34 jusqu'à Malainbady, et de Malainbady à Morondava, par la R.N 35 [Figure 1].



Figure 1- Localisation du District de Morondava
(Source : *Folbe Taonantant'ny Madagasikara*, 2005)

• Délimitation géographique

La ville de Morondava est située à l'Ouest de Madagascar, sur le delta de la rivière du même nom au bord du Canal de Mozambique. Elle se situe sur la Route Nationale N35 à environ 640 km d'Antananarivo, la Capitale de Madagascar.

La région naturelle du Menabe dont la Capitale est Morondava couvre une superficie de plus de 46.000km², soit 7,8 % de la superficie totale de l'île [Figure 1]. La plaine de Morondava, partie du Menabe central est délimitée au Nord, par la rivière Andranomena, par le bras Nord de la rivière Morondava et son bras Sud, la Kabatomena, à l'Ouest par le canal de Mozambique et, à l'Est par un massif central gréseux.

• Cadre géomorphologique et sédimentologique

La ville de Morondava est implantée sur un cordon lagunaire, frontière océanique d'un complexe deltaïque où les débouchés de deux bras principaux (bras Nord de la Morondava et Kabatomena au Sud) sont espacés d'une dizaine de kilomètres. Par la géométrie de ses dépôts, le delta de Morondava est classé dans la catégorie des deltas dominés par la houle [Galloway, 1975].

En dehors du bourrelet dunaire d'une altitude de 5 à 6m par rapport au niveau hydrographique, une topographie très plate, propice aux dépôts lagunaires et aux formations de mangrove, entoure la ville. La pente des estrans varie entre 3 et 4%, en moyenne entre 0m et 5m, mais elle s'accroît à près de 7% au-dessus de la côte +3m, au niveau des épis et défenses de la ville. Les avant-plages ont une pente qui évolue de 0,33 % entre -5 et -10m à 0,6% entre 0 et -5m. Les sables ont une médiane qui évolue entre 0,20 et 0,25mm.

Un «dôme» sableux bien individualisé est localisé au large de la plage sud de Morondava. Il renferme au moins 60% de particules supérieures à 0,04mm révélant l'indice d'un mauvais classement. Au-delà des profondeurs de 6 à 8 m, dans la zone pré littorale, se dépose une vase formée par une importante accumulation de particules fines [Neuvy G., 1982].

• Cadre géologique

La région du Menabe correspond à la partie moyenne du bassin sédimentaire de Morondava. La série sédimentaire s'étend du Karroo (Carbonifère supérieur) à l'Actuel. En surface, cette série présente une structure d'ensemble monoclinale vers l'ouest, avec des pentes moyennes à faibles pour les termes les plus récents (de l'ordre de cinq pour mille pour les calcaires marins tertiaires). [Razafimbelo E., 1986].

Des remontées du socle rendent les structures moins régulières. En surface, ces formations sont généralement recouvertes d'une couche alluvionnaire récente, sablo argileuse.

• Pédologie

L'étude de la carte pédologique de Madagascar éditée par l'ORSTOM Tananarive, montre une prédominance nette des sols ferrugineux tropicaux. Les caractères pédologiques de la plaine de Morondava à partir des réseaux hydroagricoles de Dabara se présentent comme suit [Rajaonarison J.D., 2000] :

- Zone amont : dans la zone de Mahabo-Ankilivalo, on peut distinguer du Sud au Nord : des alluvions riches à nappe phréatique peu profonde, des sols filtrants à dominance argileuse et des sols relativement filtrants, à dominance sableuse et des sols à dominance limoneuse ;
- Zone intermédiaire : les sols de cette zone sont composés de sable ;
- Zone delta : à part les buttes de carapace sableuse qui portent des sols ferrugineux tropicaux non lessivés, la totalité des sols du delta est formée par des sols d'apport (alluvions brutes ou peu évoluées formant les sols de « baiboho » et par des sols hydromorphes ;
- La bordure littorale du canal de Mozambique est formée des sols halomorphes : sols gris salés.

3. Etat des lieux : l'érosion du littoral de Morondava

La ville de Morondava a été édifée sur une zone deltaïque correspondant à un ancien exutoire de la rivière Morondava. Le littoral est constitué d'une double frange terrestre et marine, l'une correspondant au bassin versant de proximité, l'autre à la zone soumise à l'influence des apports telluriques et à la zone de productivité principale qu'est le plateau continental.

Les transports solides du fleuve Morondava sont relativement importants. Au niveau de Dabara, le transport de vases et de sables fins en suspension sont de 1,66 millions de m³ par an. En période de crues le transport par charriage est de 2,8 millions de m³. Annuellement, le volume total transporté par charriage et en suspension est supérieur à 5 millions de m³. En période de crue, la majeure partie se dépose dans la vaste plaine alluviale du fleuve. La part atteignant annuellement la mer est

estimée à 290.000m³ [Billon B., Mlatac N., 1969]. Les pertes totales (taux de dégradation spécifique) pour le Morondava est de 11 millions de tonnes/Km²/an [J.N. Salomon, 1987].

• Historique de l'érosion

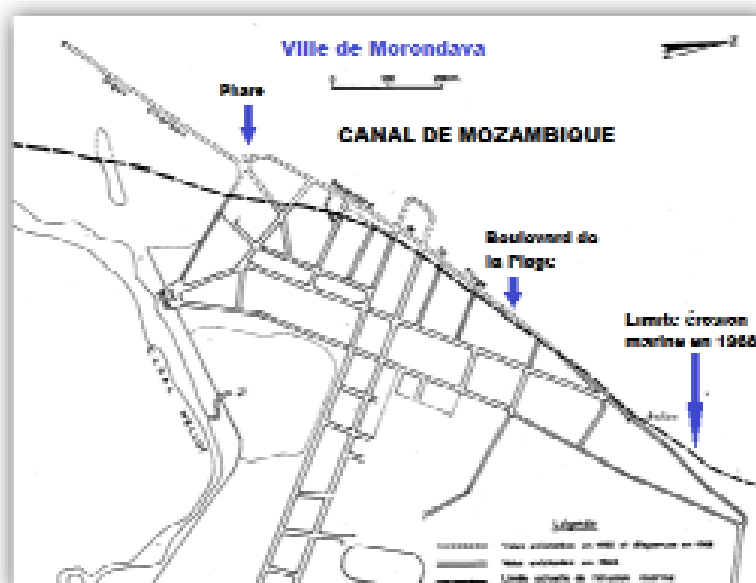
C'est depuis 1914 que l'érosion littorale de la ville de Morondava a été constatée dont trois périodes d'érosion significative : la première érosion concerne la période de 1914 à 1951, la seconde de 1951 à 1974, et la troisième se situe entre les années 1974 à 1997.

En 1952 puis en 1953 [Figure 2], de fortes marées submergèrent la ville de Morondava qui subit alors une érosion soudaine et si intense que certains envisagèrent d'abandonner la ville pour la reconstruire à l'intérieur des terres, loin de la mer. En 1987, année record, l'érosion fait reculer le rivage de 20 m.

La période de 1954 à 1997 est caractérisée par des périodes cycliques d'érosion et de sédimentation importantes :

- 1954, le cyclone Andevoranto emporta la plage (200 à 250 m) et la digue Charbon ne fut plus que ruines ;
- 1963 à 1964, retour en force des marées ;
- 1979, l'érosion a provoqué un recul de 100 mètres de la ligne de côte ;
- 1989, le cyclone Kalasanguy a provoqué l'érosion de plusieurs mètres de plage ;
- 1991, le cyclone Cynthia a provoqué le débordement de la Kabatomena, entraînant la formation d'importants apports sédimentaires.

Figure 2- Evolution de l'érosion marine de 1953 à 1968 (Newry, 1982, modifié)



Depuis 1951 la ville a reculé de 200 à 400 m. Les années qui suivirent furent surtout consacrée à la défense du littoral contre l'érosion marine.

• Origine du problème

Une analyse détaillée du milieu marin et continental, ainsi qu'une étude chronologique des effets de l'anthropisation de la région depuis 1924, ont permis de faire un bilan des forces érosives en présence et d'aboutir à une conclusion pour expliquer leur déséquilibre actuel. Il est entretenu par deux facteurs naturels : le premier, à caractère systématique, est la capture de l'une des deux rivières qui forment le delta de la Morondava, associée aux effets de la houle et des courants littoraux ; le second, aléatoire, est la mise en charge de la nappe phréatique, liée aux années de forte

pluviométrie. Ces deux facteurs ont engendré un phénomène alternatif d'érosion et de sédimentation sur le secteur côtier. En 1951, la déviation vers la Passe de Betania du Canal Hellot qui débouchait jadis près de l'extrémité sud de la ville Morondava [Photo et Figure 3], a suffi à le faire évoluer en phénomène érosif continu [Neuvy G., 1982].

Photo - Méfait de l'érosion marine sur le littoral (Razafimbeto M.R.)



Sur la côte ouest de Madagascar, les eaux côtières sont brassées par des courants littoraux dont les plus importants sont les courants de marée ainsi que les courants associés aux vagues et à la houle qui tirent leur énergie des vents modérés (NW) à forts (SW) quasi permanents sur les côtes. L'action de ces courants est à l'origine des phénomènes d'accrétion (flèches, cordons littoraux, plaines alluviales) mais également des phénomènes importants d'érosion comme c'est le cas dans la région de Morondava [Lebigre et al.1990]. Les grandes quantités de sédiments fluviaux qui se déposent sur le plateau continental sont déviées par un courant qui remonte vers le nord dans l'Est du canal de Mozambique [UNEP, 1999]. Ces effets combinés au détournement du bras Nord de la Morondava (canal de Hellot) et à la mise en service du barrage de Dabara ont fortement contribué au déséquilibre des forces aux embouchures des bras Nord et Sud de la Morondava d'une part [Figure 3], et d'autre part, un changement radical de la force et de la direction des courants à la sortie du canal de Hellot.



Figure 3- Trace du Canal Hellot dans le delta de la Morondava

Désormais sous-saturé aux embouchures, la dérive littorale a rongé rapidement les cordons sableux, menaçant la ville et son port. Devant l'ampleur prévisible des répercussions économiques et humaines de ce recul, des épis avaient été installés mais le problème n'est pas encore résolu puisque l'érosion perdure encore actuellement.

Des observations houlographiques journalières ont permis une approche théorique par calcul de la puissance annuelle du transport sédimentaire lié à un régime Ouest-sud-ouest sur une côte orientée Nord 20°. Théoriquement le maximum, par excès, est de 500.000m³/an. Les volumes réels se situent entre ce nombre et 250.000m³/an qui est la valeur maximale de l'érosion de l'estran. Dans ce même cadre de calcul, le transit inverse du régime Nord-Ouest ne représenterait que 12,5% du précédent. La forte obliquité des houles d'Ouest-sud-ouest donne plus d'intensité au transport qu'elles induisent sur la plage de Morondava. Aussi, sur un transit côtier maximal de 500.000m³/an, la moitié des apports proviendrait de l'abrasion des estrans et le reste des zones situées plus au Sud [Rapport Green-OI du 12/02/1998].

- **Bilan des politiques d'aménagement**

- a) *Le port de Morondava*

Comme pour la plupart des ports de la côte ouest malgaches, la faible profondeur du Canal de Mozambique au voisinage des côtes est le principal obstacle au développement des installations portuaires : les fonds de 10m se trouvent à plus de 2 km de la plage de Morondava et ceux de 5m en sont éloignés d'au moins 1km. Pourtant le développement économique de cette région ne parut jamais concevable sans la présence d'un port utilisable en toutes saisons.

A partir du moment où l'on veut faire des échanges commerciaux de façon constante et progressive, il devient indispensable de construire un quai, des magasins et des entrepôts, c'est-à-dire de faire le choix d'un emplacement définitif. Cela n'avait jamais été le cas à Morondava et le « port » dont parlent les récits des siècles passés se trouvait toujours probablement à l'embouchure principale du fleuve Morondava mais celui-ci changeait souvent de lit à cause de phénomènes de capture en amont. Cela ne constitua pas un grave inconvénient tant que le trafic commercial ne nécessita pas d'installations particulières. Il en fut tout autrement lorsque, au début du 20^e siècle, l'autorité coloniale décida d'édifier une véritable ville à proximité d'une vaste plaine où l'aménagement agricole restait à faire. Mais le choix d'un lieu fixe sur une côte instable et non abritée, près d'une mer peu profonde, créa des problèmes insolubles. Très vite, il n'y eut pas un port mais deux ports à Morondava : l'un, Port Bebe, relativement bien abrité des mouvements de la mer mais inaccessible par marée basse, l'autre, port Charbon, en bord de mer mais très vulnérable sur une côte en perpétuel mouvement.

Cela n'élimina pas toutes les difficultés et celles qui subsistèrent furent génératrices d'hésitations, d'indécisions et de contredires de la part des autorités coloniales. Lorsqu'on passe les dossiers des Travaux Publics de l'époque concernant l'aménagement du port de Morondava, on est surpris par le nombre de projets non exécutés ainsi que par les décisions non respectées : il s'en dégage une impression de désaccord continu entre utilisateurs et administrateurs. Le véritable point de départ du port moderne de Morondava fut donc, à partir de 1901, l'aménagement du Canal Hellot sur un bras mort de la Morondava. Cela permit la création de Port Bebe en eaux calmes. Mais l'impossibilité d'accéder à ce dernier en marées basses rendit nécessaire un nouvel aménagement.

En 1923 fut proposé la construction d'un entrepôt flottant, le projet Watson. Ce projet consistait à fabriquer un dock flottant représenté par un bateau d'acier de 2000 ou 3000T, amarré à environ un mille(1 852 m) au large afin que des remorqueurs puissent y accoster par temps calmes. Bien qu'il ait été accepté par le Ponts et Chaussées de l'époque, le projet n'a cependant pas abouti.

Déjà, des difficultés étaient apparues concernant le Canal Hellot. Celui-ci avait été créé dans un double but : permettre un accès direct des bateaux à Port Bebe et acheminer de l'eau douce dans les cultures proches de la ville à partir du bras nord du fleuve Morondava. Or si la plus grande partie du

débit de ce fleuve passait par le bras nord avant 1917, il n'en était plus de même en 1923 puisque le bras sud (la Kabatomena) avait capté les eaux du bras nord. Le résultat de cette capture en 1917, fut que le Canal Hellot se retrouva pratiquement à sec. Certes, il permettait toujours aux chalands d'accéder à Port Bebe par marées hautes, mais il n'amenait plus d'eau douce vers la mer. On cessa donc de l'entretenir et, par manque de curage et d'écoulement régulier, sa partie amont se combla peu à peu ne permettant plus le passage de l'eau vers la mer [Neuvy G. 1982].

C'est à partir de 1924 qu'est constaté les premiers phénomènes d'érosion au débouché du Canal Hellot (Passe de Betania) : lorsque le débit du bras nord de la rivière Morondava est faible, le canal s'ensable et s'envase, la mer s'attaque alors au rivage maritime depuis l'embouchure du Canal Hellot. Lorsque le débit est important, il se produit un ensablement important et la mer engraisse alors cette partie du rivage [Figure 5]. On constate alors la nécessité de construire un boulevard maritime pour protéger la ville contre les raz-de-marée dont la périodicité est estimée à cinq à huit ans.

La plage entre Betania et la ville faisant saillie dans la mer, c'est là que les sables s'accumulent. En 1926, le Canal Hellot est de nouveau alimenté par les eaux du bras nord de la Morondava.



Figure 4-Evolution de la morphologie de la Passe de Betania

En 1936, tout le débit de la Morondava est passé par le bras Sud (la Kabatomena) laissant le bras Nord, et donc le Canal Hellot complètement à sec. En 1950 est creusé un chenal de 1000m de long sur 20m de large, entre Betania et Port Bebe, il débouche à 700m de la mer dans la Passe de Betania.

En 1956, le chenal est refait suivant un nouvel axe sensiblement parallèle à la côte, il est plus large et débouche seulement à 400m de la mer dans la Passe de Betania[Figure 5]. En 1952, un cyclone violent s'abattit sur la ville détruisant tout particulièrement les installations portuaires de la digue Charbon.

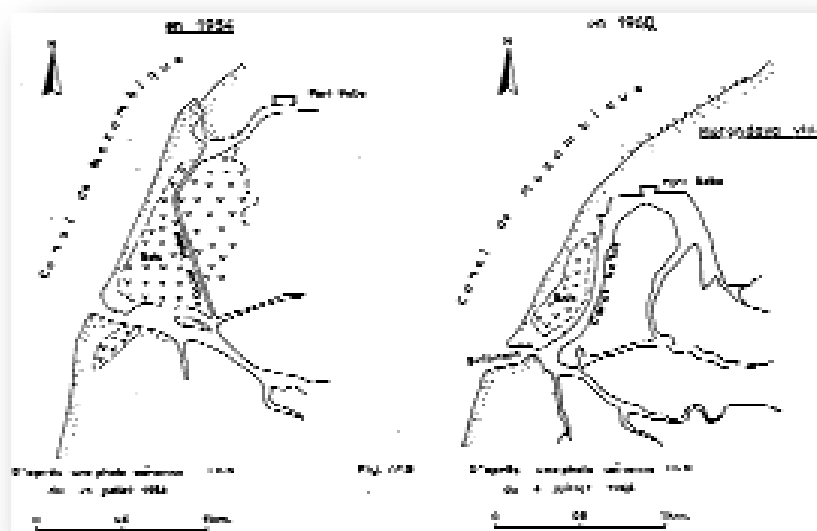


Figure 5- Evolution des aménagements du Canal Hallot et de son embouchure

b) Protection de la ville

L'année 1954 vit la construction de onze épis perpendiculaires [Figure 6] à la côte afin de la stabiliser. C'étaient des épis constitués de clayonnages remplis de tout venant de Dabara. Le retour en force de l'érosion en 1963 et 1964 décida les autorités de refaire les épis en béton. Il s'agit de caissons de palplanches remplis de sables et surmontés d'un couronnement massif en béton. Treize épis ont été ainsi constitués, plus trois en enrochement, répartis sur 1500 m de littoral. Devant la ville et à la tête des épis furent disposées plusieurs rangées de gabions superposés.

En 1966-1967 furent construits deux épis convergents à la sortie de la Passe de Betania, l'épi nord ayant une longueur de 188 m et l'épi sud 291 m. Ce dispositif permettait une accélération du courant du jusant, favorisant ainsi le creusement naturel de la Passe de Betania. Mais rapidement, deux ans plus tard, l'épi nord fut affouillé à sa base et déséquilibré, il finit par se rompre en plusieurs endroits. Devenant un danger pour la navigation, il fut arasé et détruit à grand frais en 1969.



Figure 6- Reste d'épis en béton et de gabions en 2012

En 2010, ont été réalisés des travaux de protection du littoral et de réhabilitation de la route d'accès au port [Figure 7] dont le financement a été assuré par l'Agence française pour le développement (AFD), ainsi que par l'Etat malgache. Cette œuvre a concerné un linéaire de 170m sur la côte de Morondava.



Figure 7- Ouvrages de protection du littoral réalisés en 2010 (Ranaivosoa M.R., 2012)

c) Aménagements de la plaine de Mahabo (Morondava)

- Construction du Canal Hellot en 1906
- Construction du barrage et du canal Dabara dans les années trente
- Projet SODEMO au début des années soixante-dix

4. Discussion

Une embouchure tidale permet les échanges d'eau et de sédiments entre le Canal de Mozambique et une lagune séparée de celui-ci par un cordon littoral. L'hydrodynamique de cette embouchure est

contrôlée par la propagation des vagues et de la marée qui, dans le cas de systèmes peu profonds, peut entraîner des évolutions morphologiques rapides. Une meilleure compréhension des forces hydrodynamiques est donc nécessaire pour pouvoir anticiper ces évolutions.

Une approche globale à partir d'images satellites (Source Google Earth) a mis en évidence la place importante de la dérive littorale dans le transport des sédiments sur la côte. La disposition des barres de sable devant la côte montre que les courants littoraux ont une résultante prédominante. Les durées et la force des courants étant inégales, les résultantes peuvent être appréhendées par le biais de l'embouchure de la Kabatomena. En définitive, c'est la dérive littorale qui apparaît comme étant le principal facteur de redistribution des sédiments littoraux.

Par suite de son tracé, cette dérive est parfois aussi appelée « cheminement en dents de scie » [Figure 7]. Lorsque la houle est oblique par rapport au littoral, le jet de rive se fera dans la direction de la propagation. Le retrait des eaux se fera par contre dans le sens de la pente de la plage entraînant ainsi une importante quantité de sédiments qui ne reviendront plus à leur point de départ. La houle initie également des courants tels que :

- le courant littoral, quand la houle a une incidence oblique, ou que le long du littoral, la hauteur de la houle varie ;
- le courant du large vers la côte initié par le déferlement et par l'asymétrie horizontale de la houle ;
- un courant de retour compensant le précédent. Les courants de retour de houle peuvent être localisés : ils forment alors des croissants de plages ou creusent des cuvettes allongées.

Le rouleau de déferlement et sa dissipation induisent une turbulence supplémentaire qui mobilise et maintient en suspension les sédiments. Il contribue alors au transport des sédiments sur de longues distances, dans le sens du courant littoral (Sud-Nord pour la zone de Morondava). Le transport dû à la houle est en général dirigé du large vers la côte avant le déferlement et, parallèle à la côte ou dirigé vers le large après le déferlement.

Par forte houle, la houle déferle loin de la côte, il y a érosion de la plage. Par faible houle, la houle déferle en haut de plage, il y a réalimentation de la partie médiane de la plage. Il y a parfois formation d'une ou plusieurs barres de sable dans la zone de déferlement.

Rappelons que le bassin de Morondava est situé sur le versant Ouest de Madagascar, entre les deux grands bassins versants du Mangoky et du Tsiribihina. La pente du lit est forte. Dans les 20 derniers kilomètres avant de se jeter dans le Canal de Mozambique, elle est encore de 1m/km. Dans la traversée des gorges jusqu'à l'aval de Dabara, elle est de 1,5m/km en moyenne. Les valeurs de la pente sont de l'ordre de 2m/km sur une trentaine de kilomètres en amont des gorges pour augmenter ensuite rapidement en remontant vers l'amont. Ces valeurs élevées ne peuvent que favoriser un écoulement rapide des crues [Billon, B., Mlatac, N., 1969]. Ainsi, la construction d'épis le long du littoral de Morondava aurait dû être efficace si la zone était alimentée convenablement en sédiments, mais après la mise en service du barrage de Dabara, les dépôts parvenus à l'embouchure se sont amenuisés petit à petit. Le déséquilibre s'est alors installé au niveau du littoral.

Mais cette érosion du littoral n'est pas le seul fait du courant littoral et du barrage de Dabara. Les principaux linéaments identifiés dans la zone, suggèrent que c'est une zone qui a subi d'importantes contraintes tectoniques. Le tracé suivi par le fleuve Morondava correspond à un couloir dépressionnaire accentué par l'application de contraintes convergentes qui pourrait influencer sur la pente d'écoulement du fleuve. Des études plus approfondies sur les phénomènes sismiques associés et sur la tectonique profonde dans le socle sous-jacent, pourront peut-être apporter une lumière sur la stabilité du bassin.

5. Conclusion

Cette approche générale a permis d'avoir une vision globale de la problématique de l'érosion dans la région de Morondava. Une approche plus détaillée et des travaux sur le terrain seront nécessaires pour quantifier ces paramètres.

En matière de lutte contre l'érosion des littoraux sableux, la construction d'ouvrages tels que les épis (barres perpendiculaires au trait de côte), les brise-lames (barres parallèles au trait de côte), les butées de pied (murs immergés), ainsi que le ré-ensablement massif ou localisé de la plage émergée sont les deux approches traditionnellement mises en œuvre. Par la suite, les zones protégées par des ouvrages en « dur » se sont très largement propagées le long du littoral par effet « domino » (la construction au fil des années d'épis séries dans le sens de la dérive littorale). Le ré-ensablement de la plage émergée ne se pratique que depuis peu. Toutefois, cette technique montre que la plage ré-ensablée n'est pas stable et qu'un retour à la situation initiale peut se produire en quelques semaines dans certains cas [Figure 7]. La construction d'ouvrages et le ré-ensablement induisent ainsi des coûts très importants pour les collectivités.

Une connaissance approfondie de l'hydrodynamique et de la dynamique sédimentaire de ces systèmes est nécessaire afin d'anticiper leurs évolutions morphologiques et mettre en place un système de gestion adéquat et durable.

Dans ce contexte, l'ambition de ce projet de recherche est de développer des méthodes d'optimisation de forme adaptées à des problèmes d'hydrodynamique littorale précis, et de mettre au point des outils d'optimisation couplés à des modèles hydrodynamique réalistes qui pourront servir d'outil d'aide dans la lutte contre l'érosion des plages et l'aménagement littoral. À ce jour, il n'existe à notre connaissance aucun travail académique ni aucune initiative en matière d'optimisation de forme en domaine littoral appliqué à cette région du Menabe. À partir de toutes ces données, il sera alors possible de choisir le type d'aménagement qui conviendra le mieux de façon à réduire la dégradation littorale. La protection du littoral de Morondava ne se résumera plus à une juxtaposition d'ouvrages implantés sous la pression des événements.

Références Bibliographiques

- Antona M., Delmas-Ferre M., Henocque Y. (1999) -Elaboration d'un plan de développement durable d'une zone côtière de la région COI : application à la zone côtière du Menabe - Rapport GREEN-OI: OP Menabe.
- Billon, B., Mlatac, N. (1969) – Études hydrologiques sur le bassin de la Morondava. Rapport ORSTOM, FAO, Juin 1969
- Carus F., Rabehasina A., Raharijaona N. (1998) -Mission pilote d'évaluation de l'érosion côtière et des risques sur les aménagements et la ville de Morondava, Madagascar - Rapport GREEN-OI: *Erosion Menabe*.
- Coque R. (1977-1998) – Géomorphologie - Editions Armand Colin, Paris. 6^{ème} édition.
- Coque Roger, 2000. Géomorphologie. Ed. Armand Colin, Paris, 6ème édition, 1977,1998. 503p.
- Galloway W.E. & Hobday D.K. (1983) - Terrigenous clastic depositional systems - Springer-Verlag, Berlin, 423p.
- Galloway, W.E. (1973) - Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic positional systems - B.Ed. (Editor), *Delta Houston Geological Society*. P. 87-98
- GREEN-OI, (1998) - Mission pilote d'évaluation de l'érosion côtière et des risques sur les aménagements et la ville de Morondava, Madagascar - Rapport GREEN-OI du 12/02/1998
- Klein R.J.T., Nicholls R.J., Ragoonadeu S., Capobianco M., Aston J. Buckley E.N. 2001 - Technological options for adaptation to climate in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 17, 3, p. 531-543.

- Lebigne J. M., C. Marins, L. Larque, (1990) - Les sols des marais maritimes du littoral occidental malgache, *Cahiers ORSTOM*, n°03 1989 - 1990, p. 277-286
- Neuvy, G. (1982) - Aménagement régional à Madagascar: Morondava un cas d'érosion marine - *Mad.Rev.de Géographie*, 40, p.13-40.
- Neuvy, G. (1982) - Eaux continentales et aménagement rural en domaine tropical malgache - *Mad.Rev. de Géographie*, 41, p.141-144.
- Neuvy, g. (1982) - Mise en valeur des terres à Madagascar. La plaine agricole de Mahabo, Morondava.*Mad.Rev. de Géographie*, 38 & 40, p.138-154.
- Rajaonarison J.D (2000) - Contribution à l'amélioration des rendements de 2^{ème} saison de la double riziculture par un sous expérimentations multifactorielles (cas des sols sableux de Morondava) - Mémoire d'Ingénieur, Ecole Supérieure des Sciences Agronomiques, Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Rakotonaiivo L.N. (2005) - Ouvrages en enrochements en protection du littoral à Madagascar - Mémoire d'ingénieur, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, Madagascar.
- Razafimbalo E. (1987) - Le bassin de Morondava (Madagascar) Synthèse géologique et structurale - Thèse de Docteur Ingénieur. - Université Louis, France.
- United Nations Environment Programme (1998) - Overview Of Land-Based Sources And Activities Affecting The Marine, Coastal And Associated Freshwater Environment - *The Eastern African Region*. UNEP Regional Seas Reports and Studies, N°167, 12p.

Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de pouzzolanes du District de Betafo-Antsirabe, Région Vakinankaratra

Mandimbiarison A. J.¹, Rasolemanana E.H.^{2,3}, Randrianja R.³

1 Département de Géologie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, B.P.1500 Université d'Antananarivo

2 Département Mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, B.P.1500 Université d'Antananarivo

3 Institut et l'Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, B.P.3843 Université d'Antananarivo

Résumé – Si Betafo est réputée par ses sols les plus fertiles à Madagascar, elle dispose aussi d'autres potentialités liées au volcanisme telles que la géothermie et les pouzzolanes. La connaissance des caractères physico-chimiques et mécaniques de ce dernier permet définir leur domaine d'utilisation. De l'analyse chimique, il ressort que les pouzzolanes de Betafo sont conformes à la Norme Française NFP18 310. Tandis que l'identification physique selon leur couleur permet de définir la teneur en eau, la capacité d'absorption, la densité apparente, le poids spécifique, la surface spécifique de Blaine et l'indice de pouzzolanité. Les essais mécaniques, en occurrence la résistance à la compression, sur des bétons confectionnés à partir des granulats de granite et de pouzzolane ne présentent pas beaucoup de différences.

Mots-clés- Pouzzolane, Betafo, Résistance à la compression, Indice de pouzzolanité, NFP18 310

Abstract – If Betafo is deemed by its most fertile soil in Madagascar, it also has other potential related to volcanism such as geothermal and pozzolan. Knowledge of physico-chemical and mechanical characteristics of the latter allows defining their area of application. Chemical analysis shows that the pozzolan of Betafo are conform to French standard NFP18 310. While the physical identification by color sets the water content, the absorption capacity, bulk density, specific gravity, specific surface Blaine and index Pozzolanicity. The mechanical tests, in case the compressive strength on concrete made from granite aggregates and pozzolan do not have much difference.

Keyword- Pozzolan, Betafo, compressive strength, index Pozzolanicity, NFP18 310

1.- Introduction

La Région de Vakinankaratra, faisant partie des Hautes Terres de Madagascar, se distingue :

- d'abord par sa morphologie très variée, caractérisée au Centre par le massif volcanique de l'Ankaratra culminant à 2644m à Tsiafajavona, au Sud par une série d'effondrements engendrant la formation des dépressions (fluvio-lacustre d'Antanifotsy, d'Antsirabe-Sambaina) terminée par la chaîne quartzitique d'Iboity et vers la partie occidentale dominée par la pénéplaine de Mandoto où l'altitude descend jusqu'à 1000 mètres ;

- ensuite par sa lithologie constituée du volcanisme Néogène à Quaternaire, de la série SQC et des formations granitiques, migmatitiques et gneissiques recoupées de pegmatites et ses potentiels miniers allant des pierres précieuses aux pierres industrielles ;
- puis par la qualité de ses sols et par son climat qui la rendent propice à l'agriculture ;
- enfin par l'abondance des usines industrielles de différents secteurs (textile : COTONA ; agro-alimentaire : SOCOLAIT, TIKO, STAR ; minière : Cimenterie Iboity HOLCIM).

Concernant cette dernière usine (HOLCIM) unique en son genre à Madagascar, presque toutes les matières premières utilisées pour la fabrication du ciment se trouvent à l'intérieur de la Région de Vakinankaratra (le cipolin à Iboity, l'argile à Bemololo (Andranomanelatra), les pouzzolanes à Tritriva) sauf le gypse à Ambondromamy (Région Boeny) à 600km environ d'Iboity.

Comme les ressources minières peuvent s'épuiser à mesure qu'on les exploite et qu'on les utilise, elles ne se régénèrent pas, il faut donc chercher d'autres gisements, ayant les caractéristiques physico-chimiques et mécaniques requises pour la fabrication d'un tel produit.

L'étude décrit alors les différentes caractéristiques des pouzzolanes dans les environs de Betafo, à Alakamisy Anativato, à Tritriva, répondant aux normes de fabrication de ciment.

2.- Caractères généraux des zones étudiées

2.1.- Délimitation administrative

Les zones étudiées se trouvent dans le District de Betafo, Région de Vakinankaratra, situé au Sud de l'ex-Province d'Antananarivo et est constituée par sept Districts : Antsirabe I, Antsirabe II, Antanifotsy, Ambatolampy, Faratsiho, Mandoto et Betafo. La figure 1 illustre la Région et la localisation des ces trois zones d'études.

Les trois zones d'études : Betafo, Alakamisy Anativato et Tritriva se trouvent dans la partie orientale du District de Betafo (Figure 1)

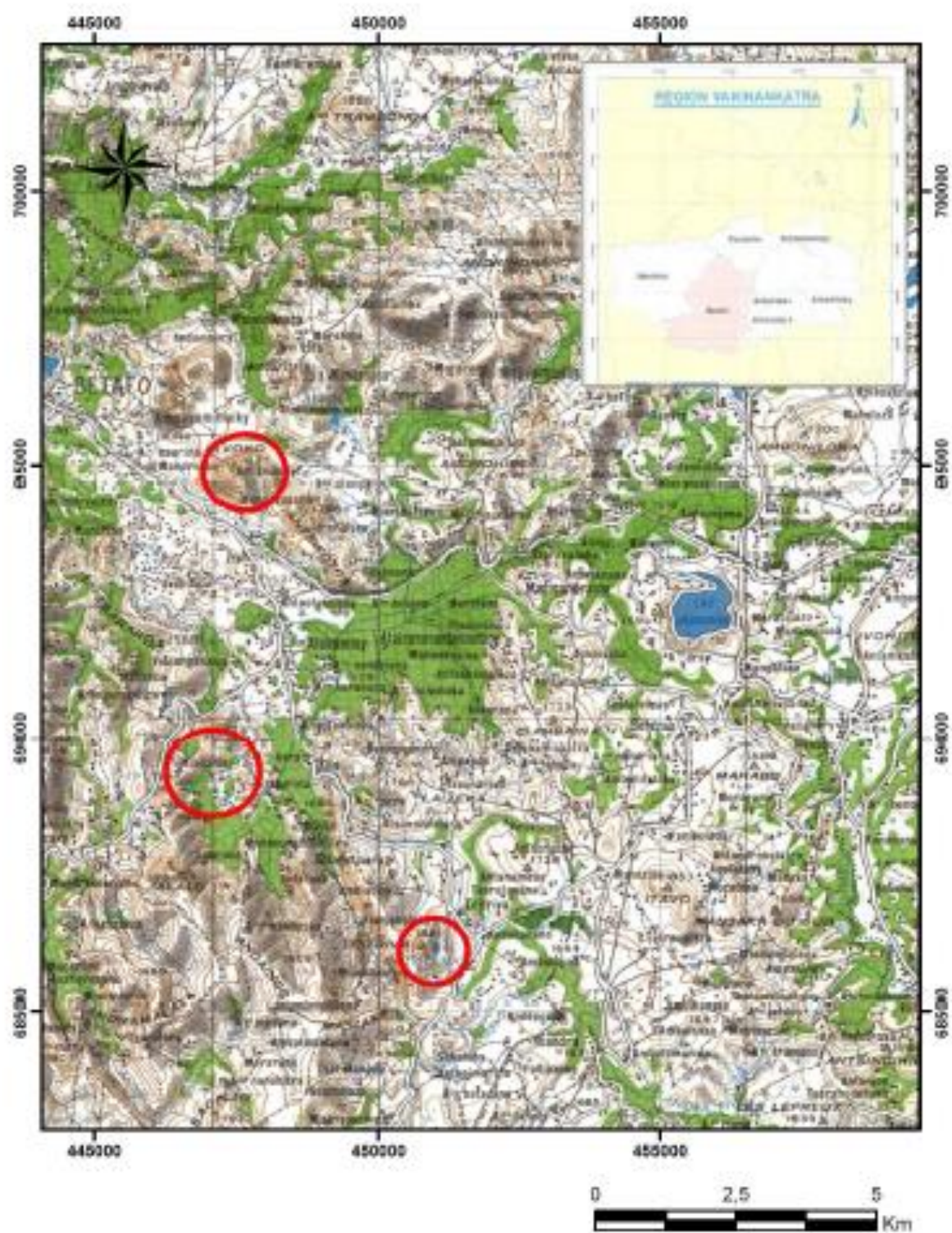


Figure 1 : Localisation de la Région de Vakinankaratra et des sites étudiés

2.2.- Contexte géographique

Betafo dans son ensemble connaît un climat de type tropical d'altitude avec deux saisons très contrastées : un hiver austral avec peu des pluies et un été pluvieux. Les températures moyennes mensuelles varient entre 11° et 24°C et la pluviométrie moyenne annuelle est de 1200mm.

Les sols dans les environs de Betafo (surtout dans les trois sites étudiés) sont considérés comme les plus fertiles à Madagascar. Ils proviennent des projections volcaniques (cendres, scories...) de nature basique.

La région est dominée par des collines entaillées par des « lavaka » et séparées par des vallées. Dans la partie Nord Est s'étend un bas fond alluvionnaire tandis qu'au Sud un ensemble montagneux formé des trois massifs se distingue : celui d'Itongafeno, d'Andaingo et d'Inanohazana. Mais la renommée de Betafo repose sur l'existence des trois collines de forme conique « LAVOKO » (Figure 2), d'altitude comprise entre 1400 à 1500 mètres.



Photo 1- Les trois monts historiques d'Iavoko Betafo

Du point de vue réseau hydrographique, le District de Betafo est traversé au centre par les fleuves Iandratsay et Ipongy.

2.3.- Cadre géologique

Dans l'ensemble, la géologie de la région (figure 3) est constituée par :

- des formations magmatiques et métamorphiques (granite, migmatite, gneiss, gabbro,...) ;
- la série Schisto-Quartz-Cipolin ou Dolomie (SQC ou SQD) ;
- des roches volcaniques (basaltes, basanites, basanitoides, trachytes...) et des coulées de laves datant du Néogène au Quaternaire ;

- des alluvions volcano-lacustres et des alluvions récentes.

Le socle est surtout dominé par le massif granitique de Vavavato, par quelques affleurements de gabbros et de migmatites. Tandis que les massifs volcaniques d'âge Quaternaire renferment des basanites et des basanitoides. Les formations volcaniques sont très bien conservées entre Betafo et Tritriva avec les cônes de scories et les coulées de basanites et de basanitoides.

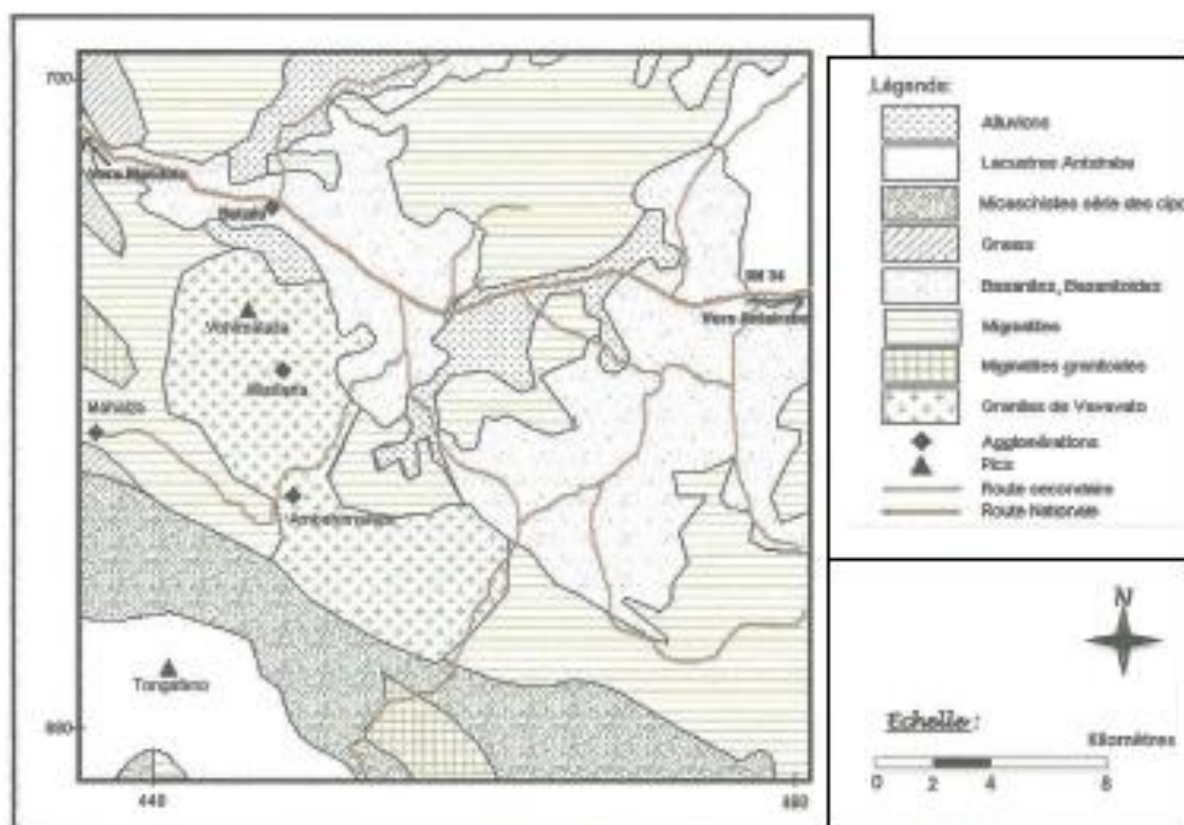


Figure 3 : Les différentes formations géologiques aux environs de Betafo par C Alsac en 1962

3.- Les moyens mis en oeuvre

A part l'analyse des références bibliographiques des travaux antérieurs effectués par le Service Géologique de Madagascar sur les Pouzzolanes de Betafo, des travaux de terrain sur trois sites ont été faits, suivis d'analyses des échantillons prélevés au Laboratoire de la Société HOLCIM à Iboity.

Des puits de reconnaissance de profondeur variable jusqu'au niveau de la roche mère altérée de couleur rougeâtre (figure 4b), des observations au niveau des coupes naturelles ou des rainurages au niveau des affleurements ou anciens fronts de taille (figure 4a) font partie des méthodes utilisées.



Figure 4a : Coupe naturelle montrant différentes couleurs de pouzzolane

Figure 4b : un affleurement montrant la roche mère

4.- Les résultats obtenus

Les pouzzolanes de la région de Betafo présentent des couleurs variées allant du noir au rouge en passant par les couleurs marron à gris et exceptionnellement au jaune. Cette variation de couleur est liée au rapport des pourcentages pondéraux des oxydes ferreux et ferriques $f = \text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$ (Bagarre, 1987). Les analyses chimiques effectuées par le Service Géologique aux alentours de Betafo sur l'axe RN34 sont représentés par le Tableau 1 suivant.

Tableau 1- Résultat des analyses effectuées par le Service Géologique

Sites	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Observations
Talus de la route au PK 16+700	38,00	30,70	12,60	9,80	5,40	Pouzzolane noire sans argile
PK 17	30,60	26,70	14,15	3,40	5,40	Pouzzolane un peu argileux
PK 18+900	34,60	24,00	13,70	5,70	4,80	Affleurement en tranchée sur 50m
PK 19+000	26,40	28,50	15,10	3,00	5,10	Pouzzolane noire
PK 19+200	28,60	23,30	15,25	3,65	6,20	Pouzzolane un peu argileux sur un talus d'érosion naturelle

(Source, TBG 156)

Le Tableau 2 suivant montre les résultats des analyses sur les échantillons prélevés dans l'un des monts Iavoko à Betafo.

Tableau 2- Résultat des analyses des échantillons prélevés à Ivoko

N° Echantillon	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO
01	46,7	15,5	12,8	8,1	6,8
02	41,7	18,7	15,7	4,1	6,1
03	41,9	18	15,1	5,8	7,5
04	45,6	15,2	13	8,8	7,6
05	36,1	18,8	16,5	5,9	8,4

(Source,Rasamoela.F. 2007)

Le Tableau 3 ci-dessous présente les résultats des analyses effectués sur les échantillons issus de 16 puits, prélevés dans la Commune Rurale d'Alakamisy Anativato.

Tableau 3- Résultat des analyses des échantillons prélevés à Alakamisy Anativato

Puits	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Indice de Pouzzolanicité
P1	43,61	17,25	16,59	4,73	3,34	80,81
P2	49,63	12,07	14,54	3,71	5,91	77,81
P3	37,21	15,93	16,82	5,84	5,76	76,16
P4	53,11	12,49	13,04	3,29	6,44	76,74
P5	57,07	10,77	12,77	2,97	7,73	85,08
P6	41,24	12,86	15,80	3,95	5,06	73,45
P7	39,95	14,07	16,71	2,37	7,16	78,68
P8	34,75	15,16	18,25	3,81	5,87	68,51
P9	50,11	10,18	16,67	3,48	6,15	65,5
P10	37,30	16,85	19,29	3,55	8,18	66,57
P11	40,70	16,28	23,94	1,69	6,94	76,65
P12	39,10	15,44	18,49	4,06	7,51	80,14
P13	63,50	10,22	8,30	4,20	7,28	81,59
P14	49,54	14,19	14,04	3,29	6,92	81,98
P15	40,79	17,86	17,78	2,45	7,84	80,33
P16	38,21	16,74	22,44	2,36	7,56	76,55

(Source : Rapport SECAM, 2012)

Le Tableau 4, ci-après, décrit les résultats des analyses chimiques des éléments majeurs, de l'Indice de pouzzolanicité (Ip) et de la Résistance à la compression (Rc) de 28 jours des échantillons prélevés dans les environs du Lac Tritriva sur 46 puits. Rc est la résistance mécanique de pouzzolane mélangée avec le ciment témoin (ciment Manda).

Tableau 4- Résultat des analyses des échantillons prélevés à Tritriva

Puits	Profondeur en mètre	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Rc 28jours(Mpa)	Indice de pouzzolanicité
P1	0,7 - 1,3	43,40	13,27	13,62	12,62	11,68	46,10	86,33
P1	1,3 - 1,8	43,94	14,08	12,39	12,73	10,6	43,63	83,49
P2	0,3 - 1,6	43,06	13,06	13,3	11,93	11,47	43,40	81,27
P5	0,5 - 3	45,91	13,73	11,84	12,01	10,15	40,70	76,22
P6	0,5 - 3,2	46,33	13,88	11,72	11,93	9,86	44,00	82,40
P7	0,5 - 3,1	43,85	14,03	12,22	11,84	10,24	42,70	79,96
P8	0,3 - 3,2	45,66	13,35	11,69	12,33	10,3	44,25	82,87
P9	0,8 - 3,6	46,49	13,47	11,68	12,16	10,33	40,90	76,59
P10	0,5 - 2,1	45,78	13,52	11,82	12,16	10,44	41,95	78,56
P11	0,6 - 2,5	46,26	13,45	11,71	12,36	10,59	41,20	77,15
P12	0,7 - 3	45,92	13,42	11,77	11,18	9,54	40,05	75,00
P13	0,7 - 3,1	43,89	14,13	12,28	11,71	10,41	43,55	81,55
P14	0,3 - 3,5	45,74	13,02	11,52	11,99	9,28	42,50	79,59
P15	1,20 - 3	43,50	13,78	11,67	13,27	10,57	40,45	75,75
P16	0,8 - 2,6	42,74	14,52	11,79	12,04	10,02	42,63	79,87
P17	0,4 - 1,9	42,77	14,45	11,38	10,93	10,17	48,05	89,98
P18	1,10 - 2,3	43,11	14,5	11,38	10,88	1,02	46,35	86,80
P19	0,7 - 2,2	41,05	14,8	11,93	10,36	10,4	42,75	80,06
P20	0,5 - 1,3	41,86	13,41	12,54	13,92	12,38	42,95	80,43
P21	0,2 - 3,1	44,13	14,4	12,16	11,5	9,98	43,00	80,52
P22	0,6 - 3,6	44,08	13,85	12,17	12,32	10,9	44,90	84,08
P23	0,8 - 4,9	45,96	13,38	11,75	12,38	10,38	40,05	75,00
P24	0,5 - 3,1	46,5	13,45	11,69	12,32	10,36	40,35	75,56
P25	0,6 - 3	46,7	13,58	11,44	11,7	10,07	40,60	76,03
P26	0,7 - 1,3	42,61	13,26	12,18	13,82	11,99	42,30	79,21
P26	1,3 - plus de 7	43,51	13,69	12,14	13,37	10,69	45,70	85,58
P27	0,2 - 1,5	41,73	13,78	12,6	12,78	11,72	42,45	79,49
P28	0,2 - 1,8	46,15	13,48	11,7	12,85	10,45	40,40	75,66
P29	0,1 - 1,2	42,06	14,17	12,78	12,38	11,35	41,60	77,90
P30	1,8 - 4,3	44,50	12,93	11,84	13,23	11,53	43,65	81,74
P31	1,7 - 3,6	43,48	14,18	12,35	11,81	10,58	44,85	83,99
P31	3,6 - 4	47,52	12,58	10,45	11,99	10,59	42,95	80,43
P32	0,4 - 2,7	44,74	13,26	11,89	12,99	11,29	42,75	80,06
P33	0,6 - 4	45,47	12,46	11,61	14,34	11,84	40,05	75,00
P34	0,5 - 1,3	42,02	13,54	12,37	13,81	12,33	41,50	77,72
P36	0,6 - 1,8	44,29	13,46	12,22	13,1	11,4	41,50	77,72
P37	0,6 - 4,7	45,21	13,67	11,82	12,15	10,34	46,30	86,70
P38	0,7 - 4,3	44,94	14,14	12,25	11,64	10,32	43,50	81,46
P39	0,2 - 0,5	42,45	13,48	12,6	12,56	11,35	40,95	76,69
P40	0,3 - 0,5	40,70	15,54	12,99	10,09	10,49	40,90	76,59

P41	0,3 - 1,2	41,49	15,02	12,72	10,84	10,38	43,95	82,30
P42	0,7 - 1,9	43,3	15,52	12,97	9,76	9,54	41,40	77,53
P43	1,3 - 1,7	40,92	14,78	13,14	11,15	11,43	42,55	79,68
P44	0,5 - 1,1	40,27	15,46	13,36	10,29	10,78	40,60	76,03
P45	0,6 - 2,5	46,68	13,94	11,58	11,51	10,07	40,85	76,50
P46	0,6 - 2	47,58	14,14	11,25	11,38	9,55	40,15	75,19

(Source : Laboratoire Holcim, Mémoire Andriamamonjirivo A.M, 2014 - Rapport SECAM, 2014)

A part les analyses chimiques et physiques effectuées au Laboratoire d'Holcim, des essais d'identification physique ont été faits au Laboratoire National des Travaux Publics et du Bâtiment (LNTPB) pour des échantillons prélevés aux alentours du Lac Tritriva.

La détermination de la couleur des pouzzolanes se fait par deux méthodes ; d'abord à l'œil nu puis à l'aide de l'utilisation du « verre de montre ». Ainsi pour les 46 échantillons analysés la couleur est répartie comme suit : 29 de couleur marron ; 11 de couleur noir ; 6 de couleur gris.

Les résultats de tous les essais selon la couleur des échantillons sont récapitulés dans le tableau 5 suivant.

Tableau 5- Identification physique des pouzzolanes de Tritriva selon leur couleur

Couleur	Teneur en eau (%)	Capacité d'absorption (%)	Densité apparente (g/cm ³)	Poids spécifique (g/cm ³)	Surface spécifique de Blaine (cm ² /g)	Moyenne Indice de pouzzolanité
Noire	5,36	2,35	1,061	2,675	3 873	78,44
Marron (Brun)	4,56	2,11	1,039	2,115	3 671	79,89
Gris-Jaunâtre	6,54	3,76	0,918	2,204	3 972	81,79

(Résultat LNTPB, 2015)

Les résultats des essais physique (densité du béton frais) et mécanique (résistance à la compression) des bétons confectionnés à partir des granulats de granite et de pouzzolane de granulométrie 0/7 (microbéton) sont donnés dans le Tableau 6 suivant.

Tableau 6- Densité du béton frais et résistance à la compression en 7jours/28jours

Type	Dosage	Poids (g)		Volume (cm ³)	Densité		Rc (Kg/cm ²)	
		7j	28 j		7j	28j	7j	28j
Pouzzolane	350	626	762,5	339,3	1,84	2,2	64,92	248,85
Granite		738	764,5	339,3	2,18	2,25	162,29	252,46
Pouzzolane	250	566	674	339,3	1,67	1,98	39,67	72,13
Granite		737	767	339,3	2,17	2,26	119,02	162,29
Pouzzolane	150	679	689	339,3	2	2,03	72,13	73,20
Granite		683	729	339,3	2,01	2,15	36,06	79,34

(Résultat LNTPB, 2015)

La résistance du béton augmente avec le temps et les bétons ont de très bonne valeur de résistance à la compression de l'ordre de 20 Mpa (203,94Kg/cm²) à 40Mpa (407,88Kg/cm²) donc le béton de pouzzolane dosé à 350kg/m³ présente une résistance presque similaire au béton de granite.

5.- Interprétation et discussions

Selon la norme française NFP18 310 la composition des pouzzolanes naturelles doit être conforme au Tableau 7 suivant :

Tableau 7- Norme française NFP18 310 sur la composition de pouzzolane (in Benkaddour M. 2009)

SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Ip
42 à 55%	12 à 24%	8 à 20%	4 à 11%	1 à 10%	≥ 75

Le Tableau 8 ci-après récapitule les moyennes des données d'analyse chimique sur les 4 sites permettant de mener une étude comparative avec le tableau 7.

Tableau 8 : Compilation de toutes les moyennes des résultats des analyses chimiques dans les 4 sites étudiés.

Localité	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Ip
Sur l'axe RN34 du PK16 au PK20	31,64	26,64	14,16	5,11	5,38	-
Sur l'un des monts Iavoko	42,4	17,24	14,62	6,54	7,28	-
Alakamisy Anativato	45,17	14,11	16,20	3,56	6,54	76,67
Tritriva	44,18	13,94	12,10	12,10	10,46	79,79

Se référant aux teneurs des éléments majeurs décrites dans le Tableau 7, dans l'ensemble la composition des pouzzolanes collectés dans les 3 sites (Tritriva, Alakamisy Anativato et Iavoko) sont conformes à la norme française NFP18 310.

Pour les pouzzolanes le long de l'axe RN34, la teneur en silice (SiO₂) est faible tandis que celle de l'alumine (Al₂O₃) est trop élevée. Il existe donc une corrélation inverse entre ces deux éléments, confirmée par le Tableau 9 relatif au coefficient de corrélation de Pearson des trois éléments majeurs.

Tableau 9- Matrice de corrélation entre les 3 éléments majeurs (Coef. de corrélation de Pearson)

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
SiO ₂	1,000		
Al ₂ O ₃	-0,747	1,000	
Fe ₂ O ₃	-0,478	0,308	1,000

A partir du Tableau 4, une matrice de corrélation (Tableau 10) a été dressée montrant une parfaite corrélation entre l'indice de pouzzolanité (I_p) et la résistance à la compression (R_c) à 28 jours.

Tableau 10 : Matrice de corrélation entre les éléments du tableau 4

Matrice (Coef. de corrélation de Pearson) :							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	R _c 28jours(Mpa)	Indice de pouzzolanité
SiO ₂	1,000	-0,595	-0,724	0,186	-0,140	-0,193	-0,193
Al ₂ O ₃	-0,595	1,000	0,688	-0,708	-0,173	0,214	0,214
Fe ₂ O ₃	-0,724	0,688	1,000	-0,160	0,304	0,113	0,113
CaO	0,186	-0,708	-0,160	1,000	0,430	-0,030	-0,030
MgO	-0,140	-0,173	0,304	0,430	1,000	-0,221	-0,221
R _c 28jours(Mpa)	-0,193	0,214	0,113	-0,030	-0,221	1,000	1,000
Indice de pouzzolanité	-0,193	0,214	0,113	-0,030	-0,221	1,000	1,000
<i>En gras, valeurs significatives (hors diagonale) au seuil alpha=0,050 (test bilatéral)</i>							

La Silice (SiO₂) et l'Alumine (Al₂O₃), ainsi que la Silice (SiO₂) et l'Oxyde ferrique (Fe₂O₃) ont une corrélation inverse c'est-à-dire que l'augmentation de SiO₂ entraîne une diminution d'Al₂O₃ et de Fe₂O₃. Ni la résistance à la compression, ni l'indice de pouzzolanité ne dépendent pas de la teneur en éléments chimiques dans l'échantillon.

Du Tableau 5, il ressort la matrice de corrélation représentée par le Tableau 11 ci-après.

Tableau 11: Matrice de corrélation entre les éléments du tableau 5.

	Teneur en eau	Capacité d'absorption	Densité apparente	Poids spécifique	Surface spécifique de Blaine	Indice de pouzzolanité
Teneur en eau	1,000	0,962	-0,849	0,038	0,954	0,653
Capacité d'absorption	0,962	1,000	-0,962	-0,238	0,834	0,836
Densité apparente	-0,849	-0,962	1,000	0,496	-0,651	-0,954
Poids spécifique	0,038	-0,238	0,496	1,000	0,337	-0,732
Surface spécifique de Blaine	0,954	0,834	-0,651	0,337	1,000	0,395
Indice de pouzzolanité	0,653	0,836	-0,954	-0,732	0,395	1,000

Il existe une *corrélation très forte* entre la capacité d'absorption et la teneur en eau et cette dernière avec la surface spécifique de Blaine. Une *très forte corrélation inverse* aussi existe entre la capacité d'absorption et la densité apparente ainsi qu'entre cette dernière et l'indice de pouzzolanité.

Du Tableau 5, il ressort aussi que plus les pouzzolanes sont foncées, plus leur densité apparente augmente et leur indice de pouzzolanité diminue.

6.- Conclusion

Tenant compte des analyses chimiques effectuées au Laboratoire d'Holcim, les pouzzolanes des trois sites (Tableau 7) répondent aux normes pour la fabrication du ciment du type CEMII B ou CPI.

Dans la région de Betafo, les pouzzolanes sont très abondantes et de couleurs très variées allant du brun au rouge et du gris jaunâtre au noir. Leurs caractères physico-chimiques et mécaniques leur permettent une large gamme d'utilisation : dans le bâtiment, dans la construction routière, dans l'agriculture et dans l'industrie.

Il faudra peut-être, pour faciliter l'exploitation et donc la récupération des pouzzolanes, essayer d'établir une bonne carte géologique à une échelle appropriée de ces roches et tenant compte, si possible, des différentes couleurs des formations citées dans l'étude. Cette étude permet, à moyen terme, d'assurer l'approvisionnement en matériaux alternatifs, présentant des caractéristiques physico-mécaniques, sensiblement analogues aux granites.

Références bibliographiques

Andriamamonjirivo A.M. (2014)- Caractéristiques physico-chimiques de Pouzzolanes dans la Région de Vakinankaratra, District Betafo, Commune Rurale de Tritriva- Mémoire Master2, ASJA, 83p.

Bagarre E. (1987)- Les matériaux volcaniques : utilisation en technique routière – Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement ISTED, Paris 84p.

Benkaddour M. (2009)- Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle- Département Génie Civil, Ecole normale Supérieure d'Enseignement Technique Algérie, 11pp.

Besairie H. (1962)- Géologie économique de la Préfecture d'Antsirabe-TBG N°156, p108-111. Service Géologique de Madagascar.

Rasamoela M.F. (2011)- Caractéristiques géochimiques et chimiques des pouzzolanes dans la Région de Betafo- Mémoire d'Ingénieur, ESPA, Université d'Antananarivo, 84p.

SECAM (2012)- Rapport des travaux géologiques des périmètres miniers d'Holcim à Alakamisy Anativato, inédit.

SECAM (2014)- Rapport des travaux géologiques des périmètres miniers d'Holcim à Tritriva, inédit.

Méthodes d'étude de la composante « sol » lors de la reconnaissance et l'exploration minière - Cas de l'exploration du calcaire dans la Commune de Mariarano, District Mahajanga II, Région Boeny.

Mandimbiharison A. J.¹, Razolomanana E.²

¹ Département de Géologie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, B.P.1500 Université d'Antananarivo

² Département Mines, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, B.P.1500 Université d'Antananarivo

Résumé - Pour le milieu récepteur qu'est le sol, la méthodologie d'approche pour l'étude d'impact lors de la phase d'exploration d'une substance minière doit suivre les étapes suivantes : avant la descente sur terrain, effectuer un recueil bibliographique ; pendant les travaux de terrain, commencer par des observations suivies de descriptions et d'échantillonnages ; après le terrain, procéder aux analyses des échantillons prélevés et aux interprétations des résultats obtenus qui permettent de connaître les aptitudes du sol et leur sensibilité à l'érosion et de décrire les mesures à prendre pour atténuer les impacts négatifs.

Pour le cas d'exploration du calcaire dans la Commune Rurale de Mariarano, les analyses et observations révèlent que les impacts négatifs sur le milieu récepteur « SOL » s'avèrent faibles si la remise en état et l'amélioration de la qualité des sols sont bien suivies et respectées.

Mots clés - Mariarano, Calcaire, Exploration, Sol, Impact environnemental

Abstract - For the environment recept that is the SOIL, the methodology of approach for the impact study during the phase of exploration of a mining substance must follow the order stages: before going to field, to carry out a bibliographic reference; during the field work, to start with observations followed by description and sampling; after the field, to make the analyses of the taken samples and interpretations of the results obtained who allow to know the aptitudes of the soil and their sensitivity to erosion and to describe the measures to be taken to attenuate the negative impacts.

In the case of exploration of limestone in the Rural Commune of Mariarano, the analyses and observations reveal that the negative impacts on the receiving medium " SOIL." prove to be weak if the repairing and the improvement of quality of the grounds are strictly followed and respected.

Key words - Mariarano, limestone, exploration, soil, environmental impact

1.- Introduction

L'obtention d'un permis environnemental passe par la présentation d'une étude d'impact environnemental (EIE) de plusieurs composantes (faune, flore, eau, sol,...). En effet, l'étude de la composante « sol » est obligatoire et incontournable pour une Etude d'Impact Environnemental d'un projet minier, car il est le premier récepteur des effets des engins mécaniques utilisés, des constructions (pistes ou routes) et des installations afférentes mais aussi des effets des facteurs naturels tels l'érosion pluviale et les effets des facteurs artificiels (érosion anthropique, les feux de brousse, le défrichement...) avant, pendant ou après l'exploration et l'exploitation minière. Aussi la présente étude a pour but de :

- déterminer les différents types de sols dans la zone du projet ;
- dresser et d'évaluer les impacts négatifs de l'exploration sur le facteur « sol » ;
- dégager les mesures d'atténuation ;
- élaborer une méthode de suivi des impacts des activités d'exploration sur le sol afin de pérenniser et préserver le milieu pédologique.

La présente ne concerne uniquement que les phases de reconnaissance et d'exploration minières.

2.- Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude située dans la localité d'Antanambao se trouve dans la partie Nord-Ouest de Madagascar, dans l'ex-Province de Mahajanga, District de Mahajanga II, Commune Rurale de Mariarano. Elle est délimitée par les quatre sommets représentés par le Tableau 1 ci-après :

Tableau 1 : Coordonnées Laborde des quatre sommets (A, B, C, D) du périmètre minier

$X_A = 435\ 000$	$X_B = 440\ 000$	$X_C = 435\ 000$	$X_D = 440\ 000$
$Y_A = 1\ 180\ 000$	$Y_B = 1\ 180\ 000$	$Y_C = 1\ 175\ 000$	$Y_D = 1\ 175\ 000$



Figure N°1 : Localisation de la zone d'étude (Extraite de la carte topographique Feuille LM38 à échelle 1/100 000)

3.-Méthodologie

Plusieurs auteurs ont mentionné la relation et l'interdépendance entre la morphologie, le climat, la topographie, la végétation, la nature du substratum géologique et le sol. Aussi la méthodologie utilisée sera basée :

- d'abord sur le recueil et la compilation bibliographique ;
- ensuite par la descente sur terrain pour observation, prospection pédologique et échantillonnage ;
- puis par l'analyse physico-chimique des échantillons prélevés au laboratoire FOFIFA Tsimbazaza;
- enfin par l'interprétation des résultats d'analyse.

Les documents consultés sont composés de rapports d'étude des ressources en sols, des revues scientifiques en rapport avec la pédologie, des différentes cartes (topographique, géologique et pédologique). Lors de la descente sur terrain, l'observation conduit à définir les formes du relief et les différents types de sol dans la zone d'étude tandis que la prospection pédologique consiste à ouvrir des fosses et à effectuer des descriptions. Et sur chaque type de sol on effectue un échantillonnage en vue d'analyser leurs propriétés physico-chimiques.

L'analyse des sols, de type classique, définit : la texture, la teneur en matière organique, le taux d'acidité et les teneurs en bases échangeables. Dans le cadre de cette étude, on a utilisé la classification française des sols

4.-Résultats et interprétations

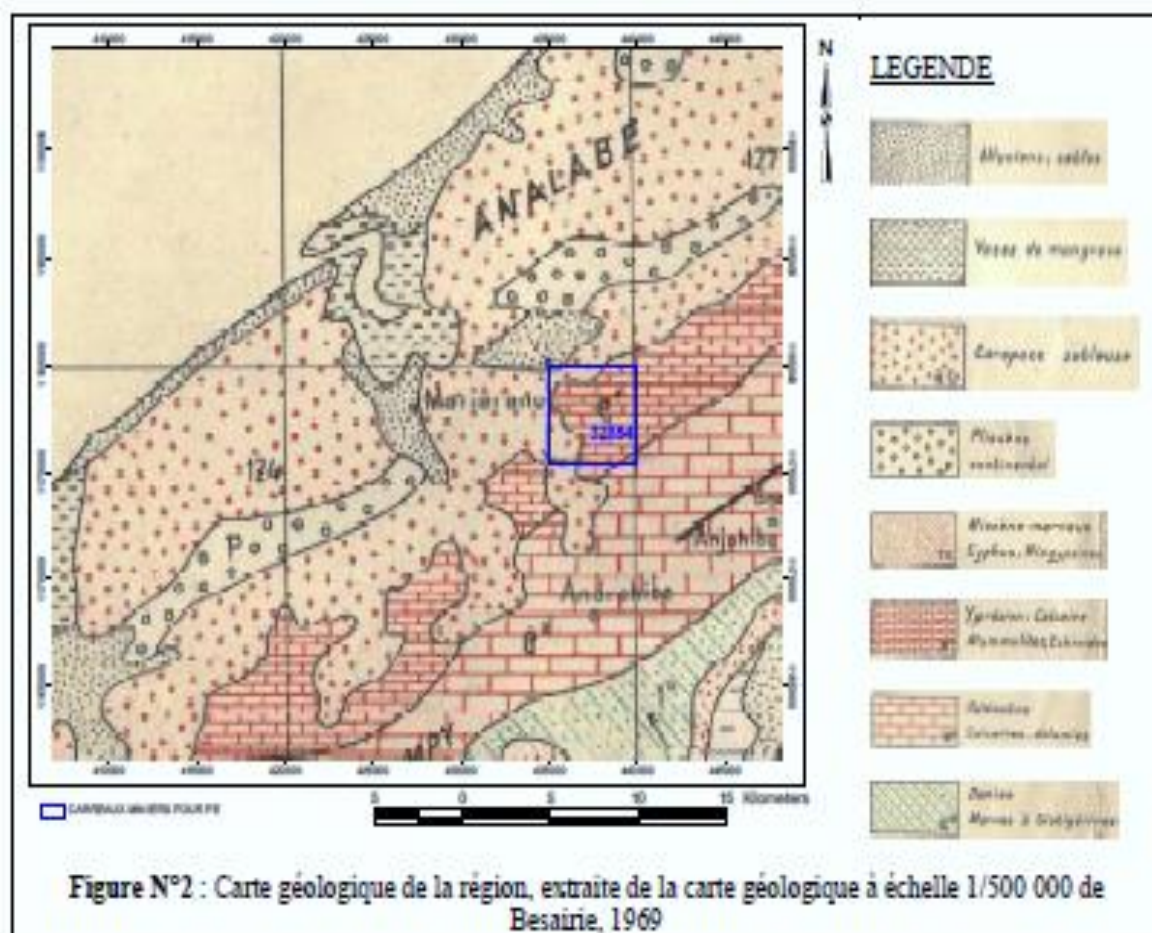
4.1. Etude bibliographique

- Géologie et géomorphologie

La zone du projet, située dans la Commune Rurale de Mariarano, se trouve dans le bassin sédimentaire de Mahajanga. Les formations géologiques (Figure N°2) rencontrées sont :

- les alluvions récentes ;
- les vases des mangroves ;
- les carapaces sableuses ;
- les calcaires éocènes ;
- les calcaires paléocènes ;

Les calcaires éocènes forment une série de plateaux délimités par des escarpements (cuesta ou faille), interrompus par l'érosion, par les recouvrements de sables roux. Sur le plan géomorphologique la région est caractérisée surtout par la présence du plateau (Photo N°1), des dépressions circulaires ou dolines aménagées en « Matsabory » (Photo N°2) et des buttes à sommets arrondis ou des coupoles surbaissées. Les calcaires éocènes montrent un relief caractéristique en lapiaz (turn-karst) surplombant de 15 mètres la pénéplaine environnante.



Le plateau de Mariarano couvre approximativement une superficie de 1000 km²



Photo N°1 : En arrière plan la butte à sommet arrondi et en avant le plateau



Photo N°2 : Depression circulaire « Matsabory » entourée de satrana et des danga

- Climat et végétation

La Commune Rurale de Mariarano, sous l'influence maritime est caractérisée par un climat chaud et humide et des végétations typiques des zones côtières (ex raphia ou satrana, sakoa, adabo, lombiro, madiro, mangarahara, tsimiranja, honko...).

La savane à palmiers avec la strate herbacée (Photo N°3) ont remplacé la forêt qui a été détruite.



Photo N°3 : montrant une partie des végétations de la région

Les pluies dans la région sont réglées par les centres d'action atmosphérique et la saison pluvieuse s'étale sur sept mois d'octobre à avril tandis que la pluviométrie moyenne annuelle varie entre 1000 à 1500mm. La température moyenne annuelle est de 26°8 C donc dans la région la chaleur est une constante

4.2. Description et typologie des sols de la région

La prospection pédologique a permis d'identifier les différents types de sol et leur position dans le paysage :

- au niveau du plateau calcaire peu érodé, le sol est ferralitique de couleur brun qui occupe plus de 60 % de la superficie du secteur d'étude ;
- au niveau des bas fonds ou dépressions, les sols sont hydromorphes organiques de couleur grisâtre à noirâtre avec engorgement permanent dans certains endroits et hydromorphes pseudogley à gley dans les autres ;
- au niveau du versant à pente faible du plateau, le sol est rouge ferralitique ;
- l'érosion en nappe décape les sols bruns calcaires ou bruns calciques et fait affleurer la croute fragmentée en blocailles et plaquettes qui forment un pavage jonchant la surface (Photo N°4).



Photo N°4 : affleurements de blocs et plaquettes de calcaire après érosion en nappe

Les fosses et les rainurages des talus permettent de décrire les différents horizons. Le positionnement des points d'échantillonnage est présenté sur la Figure N°3.

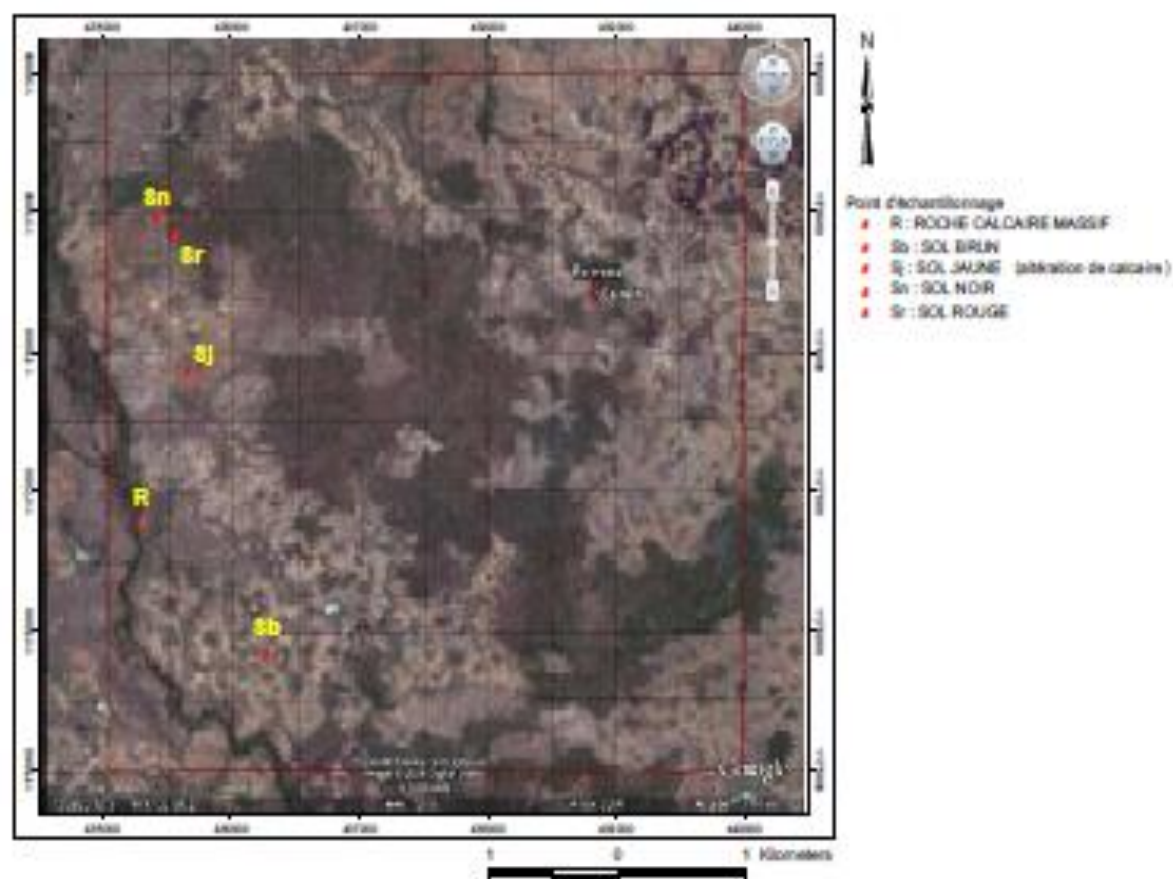


Figure N°3 : Positionnement des points d'échantillonnage

Les photos 4, 5, 6 et 7 présentent les différentes fosses avec leurs descriptions respectives.

Fosse N°1 (Sn) de coordonnées X= 435 417 m et Y= 1 178 956 m



Les caractéristiques observées sont décrites ci-après :

- situation : au Sud Est du marais d'Ambondro ;
- unité géomorphologique : bas fonds ;
- type du sol : sol hydromorphe ;
- couleur : 10 YR 5/2 ;
- description :
 - ⇒ 0 à 30 cm : horizon de couleur gris noir, plastique avec un bon enracinement ;
 - ⇒ 30 à 40 cm : horizon brun grisâtre rouillé, plastique ;
 - ⇒ en dessous de 40 cm : horizon noir bleuté très plastique

Photo N°4 : Fosse N°1 de sol hydromorphe

Fosse N°2 (Sb) de coordonnées X= 436 280 m et Y= 1 175 813m



- unité géomorphologique : surface du plateau
- type du sol : sol brun
- couleur : 5 YR 4/6
- description :
 - ⇒ 0 à 20 cm : horizon de couleur brun avec quelques enracinements, structure grumeleuse ;
 - ⇒ en dessous de 20 cm bloc de calcaire.

Photo N°5 : Fosse N°2 de sol brun avec un bloc de calcaire

Fosse N°3 (Sr) de coordonnées X = 435 550 m et Y= 1 178 840m



- unité géomorphologique : versant à pente faible
- type du sol : sol rouge
- couleur : 2,5 YR 4/6
- description
 - ⇒ 0 à 30 cm : horizon de couleur rouge à brun foncé, particulaire avec quelques débris de végétation, structure polyédrique ;
 - ⇒ 30 à 70 cm : horizon de couleur brun ;
 - ⇒ 70 à 80 cm : horizon d'altération de couleur blanchâtre plus ou moins tacheté en vert.

Photo N°6 : Fosse N°3 de sol rouge calcique

Fosse N°4 (Sj) de coordonnées X= 435 660 m et Y=1 177 858 m



- unité géomorphologique : surface du plateau
- type du sol : sol calcimorphe
- couleur : 10 YR 5/2
- description :
 - ⇒ 0 à 25 cm : horizon de couleur sombre à structure massive et cohérente, encroûtement calcaire ;
 - ⇒ 25 à 50 cm : strate de calcaire altéré de couleur jaunâtre ;
 - ⇒ 50 à 80 cm : strate de calcaire altéré de couleur blanchâtre.

Photo N°7 : Fosse N°4 de sol calcimorphe avec encroustement et altération du calcaire

Les caractéristiques physico-chimiques de chaque fosse sont décrites sous forme du tableau 2 ci-après.

Tableau 2 : Caractéristiques physico-chimiques des fosses

N° Fosse	Réaction	Granulométrie	Matières organiques	Complexe absorbant
Fosse N°1 (Sn)	pH =7,45 La réaction est faiblement alcaline	Le sol a une texture limono – sableux avec une fraction sableuse plus importante (57%), limoneuse (26%) et argileuse (17%).	La matière organique est abondante ou riche, l'azote est moyen et le rapport C/N est de 15,5 indiquant une activité biologique assez bonne ou satisfaisante.	Le complexe absorbant est caractérisé par une capacité d'échange moyenne. Les teneurs en chaux et en magnésie échangeables sont très élevées ou très riches. La teneur en potasse échangeable est élevée ou riche. L'acide phosphorique assimilable est très faible.
Fosse N°2 (Sb)	pH= 7,20 La réaction est neutre	La fraction sableuse est dominante suivie de l'argile alors le sol a une texture limono-argilo-sableuse.	La matière organique est présente mais moyennement abondante en surface et elle est presque inexistante en profondeur	Le complexe absorbant est caractérisé par une capacité d'échange moyenne. La teneur en chaux est moyennement élevée (5,85 méq/100). La teneur en potasse échangeable est très faible ou très pauvre. L'acide phosphorique assimilable est très faible.
Fosse N°3 (Sr)	pH= 6,89 La réaction est neutre	Le sol a une texture argilo-sableuse avec 39% d'argile, 53% de sable et 8% de limon.	La matière organique est pauvre tandis que la teneur en azote est élevée (riche).	Le complexe absorbant est caractérisé par une capacité d'échange moyenne. La teneur en chaux échangeable est très élevée ou très riche (23,50 méq/100g).

				La teneur en potasse échangeable est moyennement élevée tandis que l'acide phosphorique assimilable est très faible.
Fosse N°4 (Sj)	pH =7,34 La réaction est légèrement alcaline	Le sol a une texture limono-sableuse avec 15% d'argile, 28% de limon et 57% de sable.	Les matières organiques et l'azote sont très pauvres.	Le complexe absorbant est caractérisé par une faible capacité d'échange. La teneur en chaux échangeable est très élevée ou très riche (28,50 méq/100g). La teneur en potasse échangeable est très pauvre, il en est de même pour l'acide phosphorique assimilable.

En résumé :

- les sols de la région d'étude sont neutres à légèrement alcalins, le pH varie entre 6,89 à 7,45 ;
- seule la partie basse, occupée par des sols hydromorphes, est riche en matière organique ;
- les capacités d'échange cationiques (CEC) des sols dans la zone du projet sont faibles à moyennes (valeurs comprises entre 9,2 et 20,1 meq/100g) ;
- le complexe absorbant est bien fourni en bases, surtout en chaux et magnésie ;
- les sols sont pauvres voire très pauvres en phosphore assimilable (teneur inférieure à 2ppm).

4.3. Formation des sols

Les facteurs de la formation des sols sont le climat, la roche mère, le temps, le relief, la végétation et l'homme. Dans cette région Nord-Ouest de Madagascar, bassin sédimentaire de Mahajanga, les roches qui donnent naissance aux sols sont essentiellement des calcaires, des sables, des marnes, des grès et des basaltes.

Les calcaires éocène sont plus durs et constituent de vastes plateaux, parfois découpés par l'érosion. Une grande partie de ces calcaires est recouverte de sables. Les sols normalement formés à partir des calcaires, grès, basaltes appartiennent au sous ordre latéritique et surtout ferrugineux tropicaux.

La décalcification a conduit à la formation des sols rouges et des sols jaunes sur les calcaires. Les sols hydromorphes dans cette région se forment à partir de certains calcaires et d'alluvions. Pour les actions anthropiques, des défrichements auraient détruit la végétation primitive de certaines parties de la zone et entraînent sa dégradation, ce qui influence l'évolution des sols (amenuisement de la litière et diminution de l'horizon humifère par érosion, compacité des horizons comme les cas des sols sous savoka).

Le relief a une influence sur l'évolution des sols. Les topographies à pentes faibles à nulles favorisent le développement des sols anciens et concrétionnés. Les bas de pentes et les dépressions favorisent l'hydromorphie et l'accumulation de la matière organique.

Les couleurs du sol sont variées (noir grisâtre, rouge foncé, rouge jaunâtre, brun, blanc rosâtre) et relèvent d'une pédogenèse liée à la nature de la roche mère, de l'état du fer et de la quantité de matière organique présente.

4.4. Aptitude des sols

Les sols des bas-fonds ou sols hydromorphes à accumulation des matières organiques peuvent être voués à l'agriculture (cultures sèches et riziculture) moyennant des infrastructures d'aménagement (drainage, terrassement,...).

Les sols bruns qui occupent plus de la moitié de la zone du projet peuvent être utilisés en pâturage ou tout simplement pour planter des arbres. Dans certains endroits, ces sols sont érodés et le calcaire apparaît sur place. Ce type de sol est très sensible à l'érosion pourtant il présente de bonne teneur en éléments fertilisants.

5.- Etude d'impacts des activités d'exploration minière

5.1. Impacts des activités d'exploration minière sur les sols

Comme la plupart des calcaires affleurent en surface, la délimitation de leur contour est facile mais la connaissance de leur profondeur nécessitera des opérations de forage qui auront des impacts sur le sol.

Les mouvements de va-et-vient des engins lors de l'exploration, l'ouverture des pistes pour arriver aux sites peuvent, engendrer une dégradation du sol liée au compactage, une détérioration de leurs propriétés (porosité...) favorisant ainsi le ruissellement et l'érosion. Comme dans la plupart de la partie Ouest de Madagascar, les feux de brousse sont très fréquents et favorisent l'érosion hydrique surtout au niveau des versants à pente plus ou moins forte.

Concernant les impacts de la pollution, il y aura contamination du sol et des eaux surtout en aval par différents agents (boues, adjuvants, pertes de lubrifiants et carburants, déchets liés aux campements tels que ordures/ latrines).

5. 2. Mitigation des impacts

Les mesures prises pour atténuer les impacts négatifs lors de la reconnaissance et l'exploration minière concernent :

➤ la lutte contre l'érosion et réhabilitation

Pour diminuer l'érosion du sol, il faut :

- éviter les défrichements des végétations existantes ;
- lors de l'ouverture des pistes de desserte créées des ouvrages d'assainissement ;
- maîtriser et contrôler les eaux de ruissellement par la mise en place du système d'évacuation approprié ;
- stabiliser les surfaces par une bonne couverture des matériaux stockés permettant de limiter ou d'empêcher l'érosion du sol et l'exposition aux intempéries (en l'occurrence la pratique du mulching) ;
- réhabiliter immédiatement et progressivement les plates-formes de forage et des sentiers ouverts au fur et à mesure de l'avancement des travaux d'exploration par une revégétalisation du milieu avec des espèces natives.

➤ Lutte contre les pollutions du sol par la décontamination

La gestion des déchets liée au campement doit être rigoureuse : incinération des ordures, confection des latrines et l'emplacement des campements doit se faire en des lieux non sensibles au niveau des clairières et loin des nappes. Dans ces conditions la phase de reconnaissance et d'exploration ne cause que des impacts faibles sur le milieu physique en particulier le sol.

Conclusion

Au vu de la morphologie, de la végétation et de l'emplacement des gisements de calcaire, l'exploration minière aura des impacts négatifs sur l'environnement comme la modification du paysage, la disparition de l'habitat de certaines espèces de faune et flore suite aux défrichements, la détérioration et la pollution du sol, sa dénudation et par conséquent l'attaque de l'érosion.

Cependant, ces impacts négatifs ne produisent que de faibles influences s'il y a réhabilitation par la remise en état, la régénération voire l'amélioration de la qualité des sols.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Maignien R. (1969) - Manuel de prospection pédologique, O.R.S.T.O.M., Paris, 1969.
- Mandimbiharison A.J. (2009).- Rapport d'étude environnementale, volet « sol » des travaux d'exploration du calcaire de Mariarano de la société OSHO. Rapport inédit.
- ONE. (2003).- Tableau de bord environnemental, Province de Mahajanga Edition 2003.
- Randriamboavonjy J.C. (1996). - Les principaux pédopaysages à Madagascar. Série du Département des Eaux et forêt ESSA N°1.
- Raunet M. (1997).- Les ensembles morphopédologique de Madagascar. CIRAD mars 1997.
- Segalen P. (1956).- Notice sur la carte pédologique de reconnaissance pédologique de Marovoay - Mahajamba Feuille N°13 IRSM série D Tome VII- 1956 p161-259.
- Sourdat M. (1977).- Le Sud Ouest de Madagascar : morphogenèse et pédogenèse Travaux et Documents de l'ORSTOM N°70.
- Vieillefon J.(1961).- Notice sur la carte pédologique de reconnaissance d'Antonibe Feuille N°7 IRSM section Pédologique.
- Zebrowski Cl ; Ratsimbazafy Cl.(1979).- Carte pédologique de Madagascar au 1/100 000 cas de feuille d'Antsirabe, Cahier ORSTOM.N°81.

Pour une meilleure connaissance des nouveaux concepts relatifs à la « Terre » comme : la Géodiversité, la Géosite, la Géoconservation, le Géotourisme, le Géoparc et la Géoéducation à Madagascar.

Mandimbiharison A.J.⁽¹⁾, Raharijaona L.J.¹, Andriamifidisoa M.V. ⁽²⁾ & Andrianaivo L.⁽²⁾

(1) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Département de Géologie, BP1500
Antananarivo 101 Madagascar, raory@yahoo.fr

(2) Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique, Département Ingénierie Pétrolière, BP1500
Antananarivo 101 Madagascar

Résumé : De par sa position insulaire, Madagascar a pu conserver diverses faunes et flores (biodiversité) mais son histoire géologique mouvementée l'a aussi permis de posséder diverses formes de relief et des variétés de formations géologiques (géodiversité). Mais le grand public malagasy est-il au courant des nouveaux concepts qui s'articulent autour des mots « patrimoine et diversité géologique » et est-il conscient des enjeux et risques de la disparition de ces « témoins de l'histoire de la Terre et de la Vie ».

Compte tenu du triple objectif proposé par l'UNESCO pour la promotion de l'héritage géologique et pour faire connaître et partager au grand public les beaux paysages géologiques et géomorphologiques de la

Grande Ile afin qu'on puisse les conserver que cet article a été conçu.

Mots clés : *Géodiversité, Géosite, Géoconservation, Géotourisme, Géoéducation.*

Abstract: Due to its insular position, Madagascar has retained various flora and fauna (biodiversity) but its turbulent geological history has also allowed to possess various landforms and variety of geological formations (geodiversity). But is the public Malagasy aware of new concepts that revolve around the words "heritage and geological diversity" and is it aware of the challenges and risks of the disappearance of these "witnesses of the history of the Earth and of life".

Given the triple objective proposed by UNESCO for the promotion of geological heritage and to publicize and share the public the beautiful geological and geomorphological landscapes Malagasy so that we can keep this article has been designed.

Key words: *Geodiversity, Geosite, Geoconservation, Geotourism, Geoeducation.*

1. Introduction

Cette communication propose un aperçu des points saillants des résultats de recherche réalisés dans le domaine de la géodiversité dans le monde en général (Gray, 2004 ; Reynard, 2004) et à Madagascar en particulier (Andrianaivo & Ramasiarino, 2013).

Le triple objectif proposé par l'UNESCO pour la promotion du patrimoine géologique concerne :

- l'utilisation des géosites pour l'éducation du grand public et l'enseignement des sciences géologiques et des sujets environnementaux;
- leur intégration dans les outils ou les moyens d'assurer un développement durable;
- et la conservation de l'héritage géologique pour les générations futures.

L'analyse approfondie de tous les résultats et les objectifs fixés par l'UNESCO nous ont permis d'aboutir à un travail de réflexion à partir duquel nous allons :

- d'abord donner quelques notions sur les nouveaux concepts relatifs à la Terre [le radical Géo ici signifie « Terre » (Martini, 2010)] comme la « géodiversité », le « géosite », le « géoparc », le « géotourisme », la « géoconservation » et la « géoéducation »;
- puis de lancer un appel à la conscience de toute la communauté et aux autorités pour participer à la mise en place d'un inventaire du patrimoine géologique à Madagascar ;
- enfin de se poser la question n'est-il pas temps aussi de penser aux voies et moyens de conserver et de préserver ces beautés et diversités géomorphologiques et géologiques, faisant partie du patrimoine naturel de la Terre à Madagascar?

2. Rappels historiques

Depuis fort longtemps, la conception humaine de la nature est limitée aux éléments vivants (faune et flore), aux habitats et milieux naturels, développant ainsi la notion de « biodiversité ».

De nombreuses recherches ont été effectuées en matière de conservation et de préservation de la biodiversité. Les éléments inertes, non vivants comme les affleurements, les collines, les montagnes, les roches, les fossiles et les sols, dénommés par la suite « géodiversité » ne sont pas ou peu considérés. Il existe pourtant une relation évidente entre la diversité biotique (biodiversité) et la diversité abiotique (géodiversité) car la seconde étant le support essentiel de la première (Bétard et al, 2011).

L'histoire commence à partir de « *La Déclaration Internationale des Droits de la Mémoire de la Terre* », élaborée à Digne-Les-Bains (en France), le 13 Juin 1991, à l'occasion du premier Symposium International pour la protection du Patrimoine géologique.

Mais l'apparition de ces nombreux concepts afférant au mot « Terre » intervient peu de temps après l'adoption de la Convention sur la Biodiversité, lors du Sommet de la Terre de Rio en 1992.

En 1994, l'Union internationale pour la conservation de la nature et de ses ressources (UICN) a redéfini les six catégories d'aires protégées qui pourront répondre aux objectifs généraux de protection de l'environnement de notre système planétaire, tout en assurant le développement recherché par les peuples. On peut noter que les catégories Ia, Ib, III et V, principalement, font explicitement références aux éléments naturels de la Terre: "Paysage ou formations rocheuses" (Ia); "Eléments géologiques, physiographiques..." (Ib); "Eléments naturels tels que... gisements de fossiles" (III), "Paysage terrestre ou marin protégé" (V) (Prichonnet, 2001).

L'initiative prise par l'Union Internationale des Sciences Géologiques (UISG) favorisant l'identification des sites d'importance Internationale a permis de lancer en 1996 le projet *Géosites* pour aider à compenser le déséquilibre entre la conservation biologique et la conservation géologique.

L'UNESCO, suite à la conférence générale, tenue à Paris, du 24 octobre au 12 novembre 1997, a institué le concept national et mondial des Geosites/Geoparcs, et ce en vue de sauvegarder et de valoriser le patrimoine géologique, scientifique, historico-culturel et environnemental.

En 1998, grâce à un programme européen INTERREG, quatre territoires européens, avec un fort potentiel géologique, se sont regroupés pour conceptualiser et expérimenter la notion de

Géoparc. Ces territoires pionniers travaillent ainsi deux ans en partenariat avec l'UNESCO pour fonder en 2000, sous l'égide de l'UNESCO, le Réseau Européen des Géoparcs (European Geoparks Network). (Martini, 2010).

En 2004 différents partenaires (UNESCO, IUGS, EGN...) se réunissent à Paris afin de définir un concept unique et mondial pour les géoparcs (*Global Network of Geoparks*), formalisé par la rédaction d'un guide opérationnel.

La conservation de la géodiversité et du patrimoine géologique au niveau international, national et local participe aux objectifs de la Décennie des Nations Unies de l'éducation en vue du développement durable (2005-2014).

L'Assemblée Générale des Nations Unies a proclamé l'année 2008 Année internationale de la Planète Terre, à l'initiative conjointe de l'Union internationale des sciences géologiques (IUGS) et de l'Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture (UNESCO), afin de mieux faire prendre conscience de l'importance des sciences de la terre pour le développement durable et promouvoir des actions aux niveaux local, national, régional et international.

Les notions de *géodiversité*, de *géoéducation*, de *géoconservation*, de *géosite* ou de *géoparc* se sont lentement imposées qu'un vaste programme de recherches a été entrepris dans le cadre de nombreux projets pour faire connaître et mieux expliquer ces nouveaux concepts.

3. Notions concernant ces nouveaux concepts

3.1- Géodiversité

La géodiversité appelée diversité du monde abiotique terrestre est un concept introduit plus récemment et moins connu pour l'heure du grand public. Elle intègre la diversité géologique (roches, minéraux, fossiles), géomorphologique (formes du relief) et pédologique (sols). Ainsi au niveau mondial, elle est mise en valeur par les formations morphologiques et géologiques extraordinaires. Cependant, elle est sous-évaluée par rapport à la biodiversité à Madagascar.

La géodiversité a deux origines :




- Origine interne liée à l'activité interne du globe terrestre (volcanisme, tectonique des plaques et séisme ainsi que l'ensemble des processus qui les génèrent [Gray, 2004].
- Origine externe relative à trois types d'érosion (érosion hydrique, érosion éolienne et érosion anthropique) et à la sédimentation.




3.2- Géosite

La notion de « géosite » a été introduite par l'UNESCO à la suite de la mise en place du « Programme Géoparcs » en 1999. Elle l'a défini en 2000 comme étant « *Un site ponctuel ou une aire de quelques m² à quelques km² qui peut s'étendre au niveau du paysage et qui possède une importance d'un point de vue géologique (minéral, structural,...) géomorphologique, physiographique, etc qui répond à un ou plusieurs critères d'exception, soit précieux, rare, vulnérable ou menacé* ».


En 2004, Rohling et Thomes ont défini le géosite comme un site géologique qui a fourni de l'information sur l'évolution, les propriétés structurales de la croûte terrestre et que chaque site géologique ayant un intérêt géologique spécial peut être reconnu comme géosite. Le tableau 1 montre un exemple de typologie des géosites rencontrés à Madagascar.

Tableau 1 : Exemple de typologie de géosites à Madagascar

Types de géosites	Brèves descriptions	Illustrations
Structuraux	Objets géologiques de grande taille tels que plis, anticlinaux, synclinaux, chevauchements, failles.	<p>Escarpement de faille à Manandona</p> 
Paléontologiques	Affleurements rocheux contenant des fossiles et gisements de grande importance pour la reconstitution de l'histoire de la vie et de la terre.	<p>Empreinte de restes de dinosaure dans une formation argileuse à Berivotra</p> 
Sédimentologiques	Sites dans lesquels sont visibles les conditions typiques d'un milieu de sédimentation (glaciaire, fluviale, lacustre, éolien, etc.). Géotopes actifs qui permettent d'observer les processus en action (zone alluviale, sandurs, etc.), ou passifs.	<p>Structures entrecroisées</p> 
	Unité, formation ou affleurement d'origine	Un affleurement de granite fracturé ayant une forme de tête de lézard à Ibity

Magmatiques	magmatique témoignant d'événements géologiques majeurs, rares ou uniques et d'intérêts pédagogique et/ou scientifique	
Métamorphiques	Formation ou affleurement rocheux d'origine métamorphique avec des minéraux indicateurs des conditions de pression et de température, témoignant d'intérêts pédagogique et/ou scientifique.	<p>Formation gneissique recoupée par un filon de pegmatite</p> 
Sédimentaires	Facès, figures sédimentaires, formations et affleurement rocheux, témoins d'événements géologiques, des propriétés de l'agent de transport et de la nature de dépôts.	<p>Massif ruiniforme de l'Isalo (couronne de la Reine)</p> 

Stratigraphiques	Affleurements présentant un profil type pour un âge géologique (stratotype), un faciès, une formation, ou transition paléoenvironnementale.	Un banc repère de calcaire (Post Karroo) 
Géomorphologique	A la fois processus d'érosion et de sédimentation et les formes du relief résultant de cette activité. Formations superficielles meubles du Quaternaire et formes d'érosion dans la roche	Lavaka digité bien conservé à Ampangabe 
Hydrologiques et hydrogéologiques	Sites dus à l'écoulement particulier des eaux de surface ou souterraines. Sont inclus dans cette catégorie les sites où l'eau est vraiment l'élément dominant (sources thermales, minérales, karstiques, etc.)	Chute de la Lylie à Itasy 
Spéléologiques	Cavité (grottes ou gouffres) et réseaux souterrains présentant une valeur scientifique, écologique ou historique particulière.	Une de 7 grottes de Belobaka 

Géoculturels	Site ayant joué un rôle particulier pour l'Homme au cours de son histoire.	<p>Doany à Mandrosohasina</p> 

Source: Reynard 2004 cité dans Poirier B.2008 et modifié par l'auteur

3.3- Géoparc

Les Géoparcs, créés à l'initiative de l'UNESCO, sont les nouveaux territoires du XXI^e siècle (Martini G.2010) et elle a défini ainsi un géoparc comme étant :

« Une zone nationale protégée comprenant un certain nombre de sites du patrimoine géologique (géosites) d'une importance particulière, de par leur rareté ou leur aspect esthétique. Ces sites du patrimoine de la Terre font partie d'un concept intégré de protection, d'éducation et de développement durable ».

Une autre définition dans la revue Natural History Museum of the Lesvos, Petrified Forest, 2005 : *« Un géoparc est un territoire bien délimité, de taille suffisante pour contribuer au développement économique local, comprenant un certain nombre de sites d'importance géologique et géomorphologique de tailles diverses qui peuvent être complétés par des sites de valeur écologique, archéologique, historique, etc ».*

Pour obtenir le label « Géoparc », les sites doivent présenter un patrimoine géologique et/ou géomorphologique d'une exceptionnelle richesse, être dotés d'un solide structure de gestion et d'une stratégie affichée de développement économique durable. Autrement dit pour un territoire soit qualifié de Géoparc, il doit satisfaire à quelques critères dont :

- la sensibilisation et la formation du public aux Sciences de la Terre et aux questions environnementales (*géoéducation*);
- la stimulation de la recherche ;
- la participation au développement durable du territoire, socio-économique et culturel (*géotourisme*);
- l'assurance et l'amélioration de la conservation et de la gestion des géosites (*géoconservation*).

Pour être qualifié de géoparc, il est nécessaire de satisfaire 3 objectifs (Patzak, 2000) :

- sensibiliser le public, former aux sciences de la Terre et aux questions environnementales (géodiversité) ;
- participer au développement durable du territoire (géotourisme) ;
- assurer, améliorer la conservation et la gestion des géosites (géoconservation).

A partir de ces critères que l'UNESCO en 2006 a défini le triple objectif d'un Géoparc :

- protéger et valoriser des sites au patrimoine naturel menacé par les activités humaines ;
- promouvoir l'éducation à l'environnement et sensibiliser le public aux géosciences ;
- stimuler l'activité économique et promouvoir le géotourisme dans une perspective de développement durable.

Un Géoparc mondial est *« un espace territorial présentant un héritage géologique d'importance internationale dont le patrimoine est utilisé pour promouvoir le développement durable des communautés locales qui y vivent »*.

Le *géoparc* est une zone spéciale renfermant un ou plusieurs sites d'une rareté ou d'une beauté et d'un intérêt géologique particuliers. Les éléments du *géoparc* sont représentatifs de l'histoire géologique d'une région ainsi que des événements et des processus qui l'ont formée.

3.4- Géoconservation

Il s'agit tout simplement de la conservation du patrimoine géologique qui est un sous-ensemble du patrimoine naturel qu'on peut définir comme le bien commun de la nature dans toutes ses composantes vivantes et inertes et dont les valeurs scientifiques, culturelles, esthétiques, paysagères, économiques et/ou intrinsèques doivent être préservées et transmises aux générations futures. Ce patrimoine géologique regroupe l'ensemble des sites naturels d'intérêts géologiques, mais également les collections et autres objets dits de « curiosités géologiques ». Mais il peut être aussi défini comme toutes les traces géologiques de l'histoire de la terre permettant de retracer et de connaître les bouleversements physiques et biologiques qui ont marqué notre planète. Le patrimoine géologique représente le passé de notre environnement, c'est à dire que ce n'est plus simplement le passé de l'Homme que nous revendiquons et voulons protéger, mais aussi, le passé de Terre (Martini, 2010). Conserver le patrimoine géologique, c'est protéger la Mémoire de la Terre, donc la mémoire de nos origines.

3.5- Géotourisme

Il semblerait que le terme de géotourisme a été défini par la National geographic Society « *as tourism that sustains or enhances the geographical character of a place – its environment, culture, aesthetics, heritage, and the well-being of its residents* ». C'est le tourisme qui soutient et renforce les caractéristiques environnementales, culturelles, esthétiques et patrimoniales d'un espace et le bien être de ses habitants. Donc le géotourisme ne se limite pas au tourisme géologique, il englobe les principes du développement durable en souhaitant impliquer communauté locale et visiteurs (Venzal, 2010).

3.6- Géoéducation

C'est l'ensemble des méthodes de conduite de formation et d'éducation en sciences de la Terre pour permettre de développer chez l'apprenant des qualités physique, intellectuelle et morale.

De nombreux défis environnementaux dans notre monde en évolution ne peuvent être résolus que si les jeunes générations ont les connaissances nécessaires pour y faire face. Cet apprentissage commence dès le plus jeune âge par l'éducation.

Malheureusement, il est communément établi qu'aux niveaux primaire et secondaire, l'enseignement de la géologie n'est pas au même niveau que la géographie, l'histoire, les mathématiques ou la physique. Dans de nombreux pays africains, l'enseignement des sciences de la terre n'apparaît qu'à la fin du secondaire, voire au niveau universitaire. A Madagascar dans la matière SVT (Sciences de la Vie et de la Terre) enseignée en secondaire, les sciences de la vie occupent beaucoup plus de volume horaire et des points aux examens officiels que les sciences de la terre.

A partir de ces constats que l'UNESCO a initié un projet sur la géoéducation tout en souhaitant informer et convaincre les gouvernements pour qu'ils adaptent les programmes de sciences naturelles et donnent ainsi aux sciences de la Terre un réel statut. Ce statut devant

refléter le rôle important de cette discipline dans la vie quotidienne de la population. L'objectif étant de commencer avec un pays ce qui permettra ensuite d'étendre ce projet à tous les autres.

Dans le même temps, ce projet devra mettre l'accent sur la formation des enseignants afin de faire connaître les sciences de la Terre aux plus jeunes. Ce projet de géoéducation est le fruit d'un partenariat entre l'UNESCO, l'Union européenne des géosciences (EGU) et la Commission de l'Union internationale des sciences géologique (UISG). Les autres partenaires sont les bienvenus.

À la demande des comités nationaux africains de l'Année internationale de la planète Terre, le Directeur Général de l'UNESCO a annoncé une nouvelle Initiative pour l'éducation en sciences de la Terre lors du lancement régional de l'Année internationale de la Planète Terre à Arusha, en Tanzanie, le 8 mai 2008.

L'objectif principal de cette initiative est de soutenir le développement de la prochaine génération de scientifiques en géosciences dans le continent africain, en les dotant des outils nécessaires, des réseaux et des perspectives qui leur permettront d'appliquer les sciences de la Terre à la résolution des défis du développement durable. Les opportunités dans le domaine des sciences de la Terre sont multiples, de l'extraction minière traditionnelle jusqu'à la gestion de l'environnement, comme par exemple l'adaptation au changement climatique, la prévention des risques naturels, et l'accès à l'eau potable pour tous.

De tous ces faits, nous sommes tentés de poser la question suivante « est ce que nous (enseignants, éducateurs, responsables pédagogiques, ministères etc...) sont au courant de ces opportunités ?

4. Méthodologie pour la mise en place d'un inventaire du patrimoine géologique à Madagascar

Un inventaire (ou référence des connaissances) a donc d'abord une vocation informative. En outre, sur la base des informations recueillies, il permettra aussi de définir et de mettre en place une ou des politique(s) adaptée(s), en faveur de la gestion et de la valorisation du patrimoine. De ce fait, cet inventaire est surtout l'occasion d'évaluer aussi rigoureusement que possible chaque site, en tenant particulièrement compte de son état de conservation et des éventuels besoins et moyens à mettre en œuvre pour le protéger. (De Wever P et al 2006).

Le patrimoine géologique doit faire l'objet d'une *attention particulière de l'ensemble de la collectivité et des autorités*. Mais pour que ces deux entités en prennent conscience, la communauté géologique a le devoir de les informer. Disposant de la connaissance, la responsabilité et la conscience de ce spécialiste doivent l'inciter à intervenir en cas de risque de destruction d'un site d'intérêt géologique. Cette forme de protection trouve donc son ancrage dans nos capacités à sensibiliser les citoyens, décideurs et aménageurs.

Le principe de l'inventaire du patrimoine géologique consiste à :

- Identifier l'ensemble des sites et objets d'intérêt géologique, *in situ* et *ex situ* ;
- Collecter et saisir leurs caractéristiques sur des fiches appropriées ;

- Hiérarchiser et valider les sites à vocation patrimoniale ;
- Evaluer leur vulnérabilité et les besoins en matière de protection.

Le recueil des travaux de recherche et la publication afférant à la géodiversité, aux géosites et aux patrimoines géologiques déjà réalisés pour Madagascar doit permettre d'éveiller la conscience collective, la communauté scientifique, l'association culturelle et les autorités politiques de l'importance du patrimoine géologique et ses liens avec l'environnement ainsi que sa sauvegarde pour les générations futures .

L'Etat doit être le Maître d'Ouvrage pour l'inventaire du patrimoine géologique national. Il est représenté au niveau national par une commission mixte composée par :

- Un coordinateur scientifique (Universitaire spécialisé en géosciences) ;
- Un représentant du ministère de l'Environnement ;
- Un représentant du ministère du Tourisme et de la Culture ;
- Un représentant du ministère des Mines ;
- Un représentant du ministère de l'Education Nationale ;
- Un représentant du ministère de l'Intérieur.
- Un représentant de la société civile.

Au niveau régional la commission doit comprendre :

- Un coordinateur scientifique régional (Universitaire spécialisé en géosciences) ;
- Un représentant de chaque service déconcentré des ministères concernés ;
- Un représentant de la Région ;
- Des géologues natifs ou ayant déjà travaillé longtemps dans la région.

La création d'un site web ou facebook accessible au grand public facilitera les échanges d'information permettant ainsi de proposer des géosites.

5. Pourquoi et comment préserver et valoriser les patrimoines géologiques ainsi inventoriés ?

Certains patrimoines géologiques permettent de mieux comprendre l'Histoire de la Vie et de la Terre mais les activités humaines les menacent et les dommages causés à ces sites peuvent se traduire par une perte définitive, par leur disparition totale (phénomène irréversible). Il faut donc les protéger mais une telle protection n'est efficace qu'avec l'adhésion de la population locale, ce qui justifie que ces sites soient ouverts, au moins partiellement, au maintien d'une utilisation raisonnée et durable des ressources. Ils doivent également être valorisés dans le cadre d'actions de promotion de la recherche et d'information ou d'éducation des différents types de publics, touristes, étudiants, etc.

Mais avant de prendre des mesures de protection, il faut, pour chaque site concerné, prendre en compte de nombreux paramètres tels que son accessibilité, les caractéristiques physiques du sol ou encore son état de conservation et ses menaces éventuelles. En fonction de ces données, il est alors possible d'envisager une protection physique appropriée. Un exemple de fiche montrant les caractéristiques d'un géosite est donné en annexe.

Préserver en mettant en place une stratégie de sauvegarde et de promotion des sites ayant une importance géologique particulière (géosites) ainsi qu'une valeur scientifique, éducative, panoramique, culturelle ou touristique afin de protéger le patrimoine géologique pour les générations futures.

La richesse en géodiversité d'une région, témoins d'événements géologiques nombreux et variés dans d'excellentes conditions d'affleurements et d'accès, permet de valoriser de nombreux itinéraires pour des circuits géotouristiques spécialisés, de vulgarisation et d'illustrations pédagogiques. (Tahiri et al, 2010).

La préservation d'échantillons et de coupes géologiques naturelles est indispensable pour l'enseignement et la sensibilisation de tous les publics aux sciences de la Terre. Le *terrain* reste encore l'outil pédagogique le plus concret dans cette discipline. La représentation dans l'espace d'un élément géologique (ex : plis, faille) et sa relation avec le temps (ex : discordance, strates) sont des concepts difficiles à appréhender. La pratique sur le terrain (le visuel, le toucher, le contact direct avec les éléments) est, et doit rester, partie intégrante de l'enseignement des sciences de la Terre. S'il est inconcevable pour un botaniste d'étudier la flore en dehors des habitats, il n'est pas non plus envisageable d'étudier les sciences de la Terre sans contacts avec le milieu naturel. Aussi, pour les enseignants qui souhaitent réaliser des sorties de terrain avec leurs élèves, il est souhaitable de leur proposer des sites d'intérêt pédagogique en bon état de conservation.

Pour mieux préserver et valoriser le patrimoine géologique, l'éducation à l'environnement et la sensibilisation du grand public de son importance et de ses liens avec l'environnement sont nécessaires. Eduquer sert aussi à appuyer la recherche scientifique et sa diffusion en encourageant le dialogue entre les géo- scientifiques et la population locale.

En outre on doit créer de centres d'information et de musées, aménager de sentiers d'excursion ponctués de panneaux d'information sur le milieu (tables d'orientation, schémas interprétatifs) ou encore éditer de livres, des cartes et des dépliants pédagogiques destinés à vulgariser les travaux et les connaissances scientifiques acquises sur la région .

6. Conclusion et perspectives

- Si les trois mamelons d'Iavoko (a) qui font la renommée et la fierté de Betafo ne sont plus là;
- Si le lac volcanique de Tritriva (b) est comblé;
- Si les tsingy (lapiez) de Bemaraha (c) sont disparus;
- Si les massifs ruiniformes au niveau des grès de l'Isalo (d), y compris la couronne de la reine ne sont plus visibles ;
- Si le plateau tabulaire d'Andatabo (e) à l'entrée de Toliary disparaît;
- Si les sept grottes à Belobaka dans le District de Mahajanga II se sont écroulées.
- Et s'il y a encore de nombreux « si » se rapportant à la disparition des diverses formes du relief et d'affleurements géologiques due à des activités humaines qu'allons-nous laisser à nos générations futures, aux élèves et étudiants ?

Pour préserver et conserver les beaux paysages géologiques et géomorphologiques (Figure 1) il faut les partager au grand public c'est-à-dire les faire connaître et aimer en donnant plus d'explications et de détails accompagnés d'illustrations.

Au terme de cette réflexion, l'inventaire du patrimoine géologique ainsi que leur conservation s'avèrent indispensables et urgents, vu les enjeux et les risques engendrés par les activités anthropiques. On doit d'abord mettre sur place une commission mixte pour identifier le patrimoine géologique et sensibiliser le public à son importance et delà créer des Réserves Naturelles à caractères géologiques.



Figure 1 : Quelques illustrations des beaux paysages géomorphologiques et géologiques de Madagascar

Références bibliographiques

- Andrianalvo L. and Ramasiarinoro V.J. (2013) - Geoconservation in Madagascar: Challenges and strategies. *Mada-Hary*, Vol.1, 2013, p 44-51.
- Bétard F., Peulvast J.-P. & A. de Oliveira Magalhães, (2011) - Biodiversité, géodiversité et enjeux de leur conservation dans les montagnes humides du Nordeste brésilien. *BAGF - Géographies* - 2011-1
- De Wever P., Le Nechet Y. & Cornée A. (2006). - Vade-mecum pour l'inventaire du patrimoine géologique national. – *Mém. H.S. Soc. géol. Fr.*, **12** - 162 p.
- Gray M., (2004) - Geodiversity: valuing and conserving abiotic nature. Wiley, Chichester
- Martini G., (2010) - Les Géoparc pour une évolution du concept du territoire. *Géologie de la France*, n° 1, 2010, p. 35-40,
- Natural History Museum Of The Lesvos Petrified Forest, (2005) - What is a European Geopark?, *European Geoparks Network Magazine*, N° 2, pp 4-6.
- Poirier B. (2008) - Identification, évaluation et sélection de géosites potentiels le long du sentier national du Québec dans la MRC des Laurentides: une contribution à l'offre écotouristique régionale des municipalités de Labelle et de la conception, *Mémoire de Maîtrise en Géographie Université du Québec à Montréal*, 148p
- Prichonnet G., (2010) - La Notion de Géosites et Géoparc et son application à la Stratégie québécoise sur les Aires protégées. *Apggq_2001_patrimoinegeo.pdf*

- Reynard E., (2004) - Géotope, géo(morpho)sites et paysages géomorphologiques, In Reynard E., Pralong J.P. (Eds.). Paysages géomorphologiques, Compte-rendu du séminaire de 3^{ème} cycle CUSO 2003Lausanne, Institut de Géographie, Travaux de Recherches p 123-136
- Rohling H.G., Thomes M.S., (2004) - Geosciences for the public: geotopes and national geoparks in Germany. Episodes 27(4): p 279–283
- Tahiri A., El Hassani A., El Hadi H. (2010) - Le patrimoine géologique du Maroc : l'exemple de la géodiversité paléozoïque de la région de Rabat Salé Zemmours Zaers . Géologie de la France, n° 1, 2010, p. 79-88,
- UNESCO, (2000) - Rapport du directeur général sur l'étude de faisabilité sur la mise en place d'un programme Géosites/Géoparks de l'UNESCO. O.N.U., 160ième session, 8 p.
- UNESCO, (2006) - Guidelines and criteria for national geoparks seeking UNESCO's assistance to join the Global Geoparks Network
- UNESCO, (2008) - «Principes directeurs et critères à l'intention des Géoparks nationaux sollicitant l'aide de l'UNESCO pour devenir membres du Réseau mondial des Géoparks », UNESCO, http://www.unesco.org/science/earth/doc/geopark/f_2008guidelinesjuneendorsed.pdf
- Venzal C., (2010) - Les partenariats au cœur de la stratégie d'introduction du géotourisme en France. Analyse de l'expérience de la réserve naturelle géologique de Haute-Provence. TÉOROS, vol. 29, no 2, p. 67-76

ANNEXES

Annexe 1 : Article 2 de la Convention pour la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel (Unesco, 1972)

Art. 2 - Aux fins de la présente convention sont considérés comme patrimoine naturel :

- les monuments naturels constitués par des formations physiques et biologiques ou par des groupes de telles formations qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue esthétique ou scientifique ;
- les formations géologiques et physiographiques et les zones strictement délimitées constituant l'habitat d'espèces animales et végétales menacées, qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de la science ou de la conservation ;
- les sites naturels ou les zones naturelles strictement délimitées, qui ont une valeur universelle exceptionnelle du point de vue de la science, de la conservation ou de la beauté naturelle.

Annexe2 : Déclaration Internationale des Droits de la Mémoire de la Terre. (1991)

Les objets des Sciences de la Terre: roches, fossiles, minéraux, mais aussi affleurements, paysages, ou tout type de document associé à l'étude de ces objets naturels, ont une valeur patrimoniale.

C'est en 1991, au cours d'un symposium international sur la protection du patrimoine géologique à Digne, qu'émerge un consensus sur la nécessité de prendre en compte ce type de patrimoine. A cette occasion, une Déclaration internationale des droits de la mémoire de la Terre est rédigée. Un document intégrant un ensemble de recommandations incitant les autorités nationales et internationales à prendre en considération le patrimoine géologique et à le protéger:

1. Chaque Homme est reconnu unique, n'est-il pas temps d'affirmer la présence et l'unicité de la Terre?;
 2. La Terre nous porte. Nous sommes liés à la Terre et la Terre est lien entre chacun de nous ;
 3. La Terre vieille de quatre milliards et demi d'années est le berceau de la Vie, du renouvellement et des métamorphoses du vivant ;
 4. Notre histoire et l'histoire de la Terre sont intimement liées. Ses origines sont nos origines. Son histoire est notre histoire et son futur sera notre futur ;
 5. Le visage de la Terre, sa forme, sont environnement de l'Homme. Cet environnement est différent de celui d'hier et différent de celui de demain. L'Homme est l'un des moments de la Terre; il n'est pas finalité, il est passage ;
 6. Comme un vieil arbre garde la mémoire de sa croissance et de sa vie dans son tronc, la Terre conserve la mémoire du passé... une mémoire inscrite dans les profondeurs et sur la surface, dans les roches, les fossiles et les paysages, une mémoire qui peut être lue et traduite ;
 7. Aujourd'hui les Hommes savent protéger leur mémoire: leur patrimoine culturel. A peine commence-t-on à protéger l'environnement immédiat, notre patrimoine naturel. Le passé de la Terre n'est pas moins important que le passé de l'Homme. Il est temps que l'Homme apprenne à protéger et, en protégeant, apprenne à connaître le passé de la Terre, cette mémoire d'avant la mémoire de l'Homme qui est un nouveau patrimoine: le patrimoine géologique ;
 8. Le patrimoine géologique est le bien commun de l'Homme et de la Terre. Chaque Homme, chaque gouvernement n'est que le dépositaire de ce patrimoine. Chacun doit comprendre que la moindre déprédation est une mutilation, une destruction, une perte irréversible. Tout travail d'aménagement doit tenir compte de la valeur et de la singularité de ce patrimoine ;
 9. Les participants du 1er Symposium International, sur la protection du patrimoine géologique, composés de plus d'une centaine de spécialistes issus de trente nations différentes, demandent instamment à toutes les autorités nationales et internationales de prendre en considération et de protéger le patrimoine géologique au moyen de toutes mesures juridiques, financières et organisationnelles.
- Fait le 13 juin 1991, à Digne-Les-Bains (France)

Annexe 3 : Un exemple de fiche montrant les caractéristiques d'un géosite

Nom du géosite (Exemple Lac Tritriva)

Identification :

Localisation géographique (Coordonnées Laborde ou Lat/long)

Région/District/Commune/Fokontany

Référence cartographique (Feuille topographique N49 à échelle 1/100 000)

Description géométrique (forme allongée, direction Nord-Sud)

Accessibilité (toute l'année)

Point de vue panoramique (à son sommet on voit les villes d'Antsirabe et de Betafo)

Description :

Géologique (formation volcanique d'âge quaternaire renfermant de basanites et basanitoides)

Géomorphologique (relief en forme conique surmonté d'un cratère allongé à paroi verticale)

Classification génétique

Typologie principale (volcanique) ; typologie génétique secondaire (cratère)

Conservation et utilisation actuelle :

Utilisation actuelle (Intérêt touristique)

Etat de conservation (bon)

Annexe 4 : Typologie de géosite selon l'IUCN et le BRGM (France)

A global strategy for geological world heritage <i>IUCN - 2004</i>	Inventaire du patrimoine géologique <i>France - 2005</i>
1 - Tectonique et éléments structuraux 2 - Volcans et éléments volcaniques 3 - Systèmes montagneux 4 - Sites stratégiques 5 - Sites fossilifères 6 - Paysages et systèmes lacustres, fluviaux 7 - Grottes et karsts 8 - Développement côtier 9 - Récifs, atolls et îles océaniques 10 - Glaciers 11 - Périodes glaciaires 12 - Paysages et formes de relief arides et semi arides 13 - Impacts de météorites	Paléontologie Géomorphologie Géochronologie Hydrogéologie Hydrothermalisme Minéralogie Métamorphisme Plutonisme Ressources Naturelles Sédimentologie Stratigraphie Tectonique Volcanisme

Apport de la méthode cartographique dans l'étude de l'évolution du trait de côte de la ville de Mahajanga de 1952 à 2015

Mandimbiharison A.^{1*}, Randriatshina H.², Rasolomanana E. H.^{3,2}

1 : Département Géologie, ESPA, Université d'Antananarivo

2 : Département Mines, ESPA, Univ. d'Antananarivo

3 : Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, Univ. Antananarivo

*Auteur correspondant : Mandimbiharison Aurélien, Tel. +261320402451, E-mail : mandimbiharison.aurelien@gmail.com, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Université d'Antananarivo, Madagascar

Résumé- Madagascar est une île qui dispose de plus de 3600 km de côtes dont le recul a été estimé entre 3,71m et 6,34 m en 1997. Il est aussi exposé annuellement aux cyclones tropicaux. Entre 1990 et 2004, 30 cyclones de catégorie 4-5 ont été enregistrés contre 18 pour la période allant de 1973 à 1989. Ces cyclones ont des effets tant sur les activités socio-économiques de la population que sur les diverses infrastructures mais aussi et surtout sur le trait des côtes.

Le cas de la ville de Mahajanga et de ses environs est étudié dans l'article. Mahajanga est la deuxième ville portuaire de Madagascar et reste très prisée par les vacanciers car elle offre 3 km de plages de sables fins alternés par de rares endroits d'escarpement rocheux et par quelques zones de mangroves. Une partie de cette plage appelée « Village touristique » a été maintes fois modifiée naturellement non seulement par son instabilité géologique mais aussi et surtout par les effets des courants marins et des cyclones.

Des scènes d'images Google Earth, des photosériennes, d'ortho photo et des cartes topographiques intégrées dans un Système d'Information Géographique (SIG) ont permis de tracer différents traits de côtes. L'étude conclut que ce sont les nombreux cyclones et particulièrement Hellen en 2014, qui ont fortement affecté les activités socio-économiques, les zones inondables et les traits des côtes de la ville de Mahajanga et de ses environs.

Mots clés- Mahajanga, Plage, Trait de Côte, Cyclone, Image Google Earth, Photosérienne, SIG

Abstract- Madagascar is an island which has more than 3600 km coasts whose their retreat was estimated between 3,71m and 6,34 m in 1997. It is also exposed annually with the tropical cyclones. Between 1990 and 2004, 30 cyclones of category 4-5 were recorded against 18 for the period going from 1973 to 1989. These cyclones have effects as well on the socio-economic activities of the population as on the various infrastructures but more especially the coastlines.

In this communication, we will take the case of the town of Mahajanga and its surroundings. It is the second port city of Madagascar and very appraisal also by the holiday makers because it offers 3 km of fine sand beach alternated by rare places of rock escarpment and some zones of mangroves. But part of this beach called « Village touristique » was modified many times not only by its geological instability but especially by the effects of the marine currents and the cyclones.

Separately the use of the images " Google Earth ", aerial photography and topographic map and their integration in a Geographical Information System (GIS) making it possible to draw different coastline features. The impacts of the Hellen cyclone into 2014 on the socio-economic activities as well as the cartography of the easily flooded zones and the coastal features of the city of Mahajanga and its surroundings will be described.

Key words- Mahajanga, Beach, Coastline, Cyclone, Google Earth Image, Aerial photography, GIS

Introduction

Madagascar est une île disposant 3600 km de côte. Il est un des pays le plus exposé aux chocs climatiques en Afrique car il est régulièrement affecté par des cyclones, des inondations et une

sécheresse endémique dans le Sud de l'île. Les cyclones constituent des menaces pour les populations côtières, causent des dommages sur les infrastructures et modifient les traits de côtes. Trois zones sont les plus menacées à Madagascar :

- la zone littorale de Mahajanga (Nord-Ouest) dont la vitesse de recul est de 3 à 4m par an ;
- la zone littorale de Morondava (Sud-Ouest) de 5 à 6 m par an ;
- la côte Est de Madagascar surtout Toamasina de 12.5m à 15m par an et de Manakara.

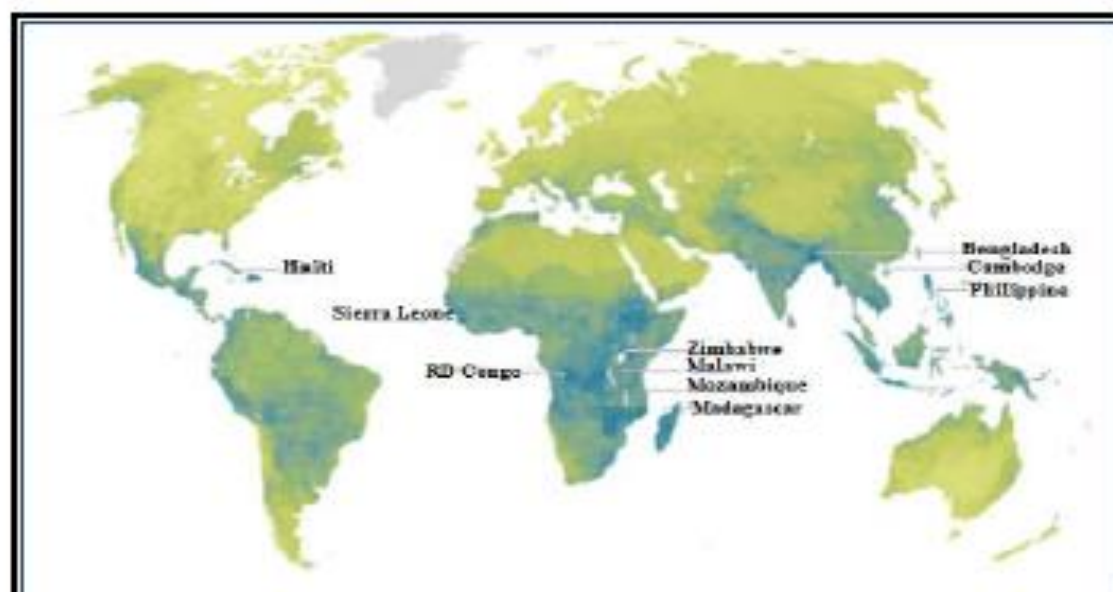
Si la côte orientale présente une allure plutôt rectiligne celle de l'Ouest est beaucoup plus sinueuse et présente de nombreuses baies surtout dans sa partie septentrionale. La Figure 1 illustre ces différences au niveau de l'allure des côtes et les zones littorales les plus menacées.



Figure 1 : Un aperçu de l'allure des côtes de Madagascar et des zones les plus menacées

Le changement climatique est une réalité dans le monde et à Madagascar. Le pays se trouve parmi les plus vulnérables au changement climatique au niveau mondial dans la carte publiée par Maplecroft 13 en 2012 (Figure 2). Selon les données et les projections de la Direction de la Météorologie, le climat de la Grande Ile a commencé à se réchauffer au début des années 1970 et cette tendance se confirmera dans le futur, à raison d'une augmentation de température de 1°C tous les ans (Andriambolotiana S et al, 2013). Madagascar a connu plusieurs événements extrêmes liés aux variabilités climatiques actuelles et passées durant ces dernières décennies. Les plus importants sont les cyclones, les

inondations et les sécheresses. Les cyclones représentent une menace constante pour les populations vivant sur les côtes.



Situation		Rang	Pays	Classe	Rang	Pays	Classe
Risque extrême		1	Haiti	Extrême	6	Cambodge	Extrême
Haut risque		2	Bengladesh	Extrême	7	Mozambique	Extrême
Risque moyen		3	Zimbabwe	Extrême	8	RD Congo	Extrême
Faible risque		4	Sierra Leone	Extrême	9	Malawi	Extrême
Pas de données		5	Madagascar	Extrême	10	Philippines	Extrême

Figure 2 : Les pays les plus vulnérables au changement climatique dans le monde

La zone d'étude

La zone se trouve, dans la partie Nord-Ouest de Madagascar, à 600 km d'Antananarivo en suivant la Route Nationale 4 (RN4). Elle fait partie de la Région de Boeny et du District de Mahajanga I. La Figure 3 représente la localisation et la zone d'hypersédimentation au sein de la baie de Bombetoka. La zone d'étude a subi à la fois une forte accrétion due à une hypersédimentation transportée par le fleuve Betsiboka et une érosion littorale non négligeable le long de la côte sableuse (Solomon J.N., 2009). Ainsi donc l'érosion dans la ville de Mahajanga se classe en deux catégories :

- l'érosion continentale ;
- l'érosion marine.

Ces deux formes d'érosion jouent chacun un rôle important dans l'évolution du trait de côte. L'image satellite ci-dessous montre l'importance des sédiments transportés par Betsiboka dans la Baie de Bombetoka.

Les trois formes de côte sont observées à Mahajanga : une petite côte rocheuse, une longue côte sableuse et quelques zones de mangroves (côte marécageuse). A l'intérieur, la morphologie est dominée par un plateau entaillé par des vallons, en particulier le vallon de Metzinger, et de plaines côtières.

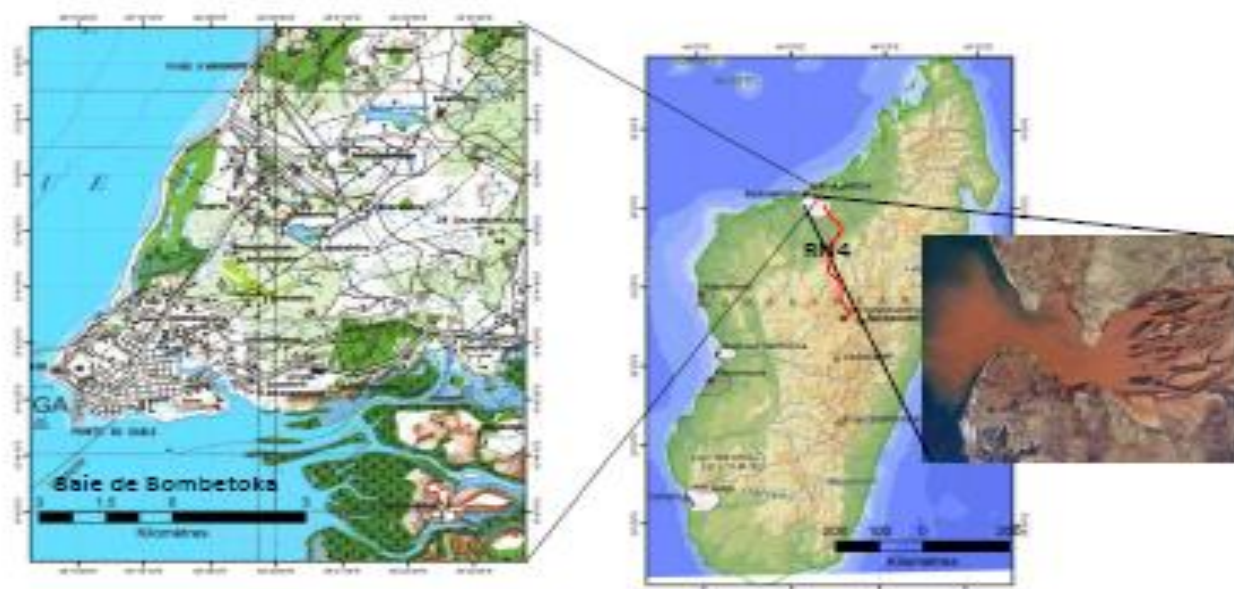


Figure 3 : Localisation de la zone d'étude et de la zone d'hypersédimentation

La ville de Mahajanga est largement sous une influence maritime et se caractérise par 7 mois de climat chaud et 5 mois de climat humide avec des végétations typiques de zones côtières. La température moyenne annuelle est de 29°C tandis que la pluviométrie moyenne annuelle est de 1.566 mm. La plupart des cyclones qui arrivent à Madagascar viennent de l'Océan Indien et ceux qui atteignent Mahajanga sont souvent affaiblis mais avec de fortes précipitations accompagnées de vents violents dévastateurs. Cependant, des destructions considérables peuvent être occasionnées par les cyclones qui se forment dans le Canal de Mozambique, tel le cas de Cynthia en 1991, ou qui reprennent de la force pour ceux qui viennent de la côte Est au contact de la mer, cas de Kamisy en 1984.

Dans ses travaux, Zafindravita I.G. (2003) décrit les formations géologiques rencontrées de bas en haut dans le District de Mahajanga :

- argiles et calcaires de Marohogo : alternance d'argile brune et de bancs calcaires de quelques mètres d'épaisseurs, l'ensemble paraît avoir une quarantaine de mètres d'épaisseur et se rattacherait au Paléocène ;
- grès de Marohogo : formation argilo-gréseuse lenticulaire, d'une trentaine de mètres d'épaisseur au maximum, se rattachant au Paléocène ;
- gros ensemble de calcaires éocènes avec un niveau de base le plus développé (calcaire de Mahabibo) d'épaisseur 120m et un niveau supérieur aminci par l'érosion constitué de calcaire avec quelques niveaux argileux de faibles épaisseurs ne dépassant pas 40m.
- grès et argiles pliocènes constituant un vaste plateau surélevé au Nord Amborovy d'une centaine de mètres d'épaisseur au maximum ;
- enfin, des formations de recouvrement sablo-argileuses de quelques mètres d'épaisseur.

La Figure 4 illustre les différentes formations géologiques rencontrées dans le District de Mahajanga :

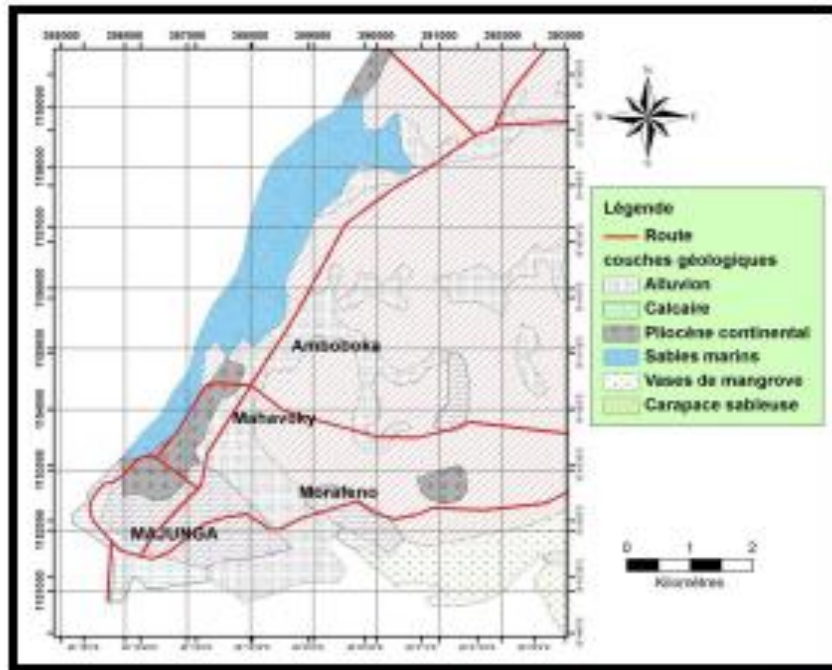


Figure 4 : Extrait de la carte géologique de Mahajanga I (Feuille L39, échelle 1/100.000)

Matériels et méthodes

Les documents cartographiques utilisés sont présentés par les Figures 5 et 6, ci-après :

- extrait de deux cartes topographiques datées de 1952 et 1962 ;
- une photographie aérienne de 1973 ;
- Ortho photo 1996 ;
- une image Google Earth de 2005 ;
- une image Google Earth de 2013 ;
- un extrait de la carte géologique feuille L39 de 1960.



Figure 5 : Cartes topographiques 1952 et 1962 et photo aérienne 1973



Figure 6 : Orthophoto 1996, Images Google 2003 et 2013.

Les traits de côte des différentes cartes topographiques, photosérienne et image Google Earth sont numérisés après géoréférencement dans un Système d'Information Géographique (SIG). Le trait de côte à partir de la carte topographique 1952 a été pris comme référence. La superposition des deux traits de côte à différentes dates permet de voir le changement ou l'état du rivage (engraissement, démaigrissement ou recul et stable).

Présentation des résultats

La Figure 7 montre l'état de la côte entre 1952 et 1962. La valeur maximale du recul de plage est de 40 mètres si la partie minimale est de 7 mètres. L'engraissement varie de 30 mètres (max) à 5 mètres (min).

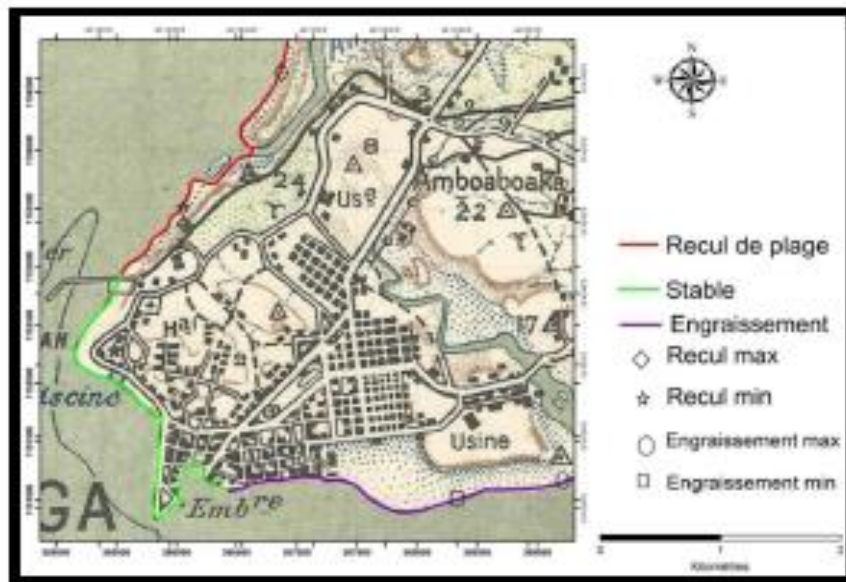


Figure 7 : Etat de côtes entre 1952 et 1962

La Figure 8, sur fond de photographie aérienne, présente l'état de côtes entre 1962 à 1973. La plage au niveau du village touristique s'est engraisée.



Figure 8 : Etat de côtes entre 1962- 1973

La Figure 9, sur fond orthophoto, illustre l'état de côtes entre 1973 à 1996 où un recul maximal a été observé au niveau de la plage du village touristique.



Figure 9 : Etat de côtes entre 1973- 1996

La figure 10, sur fond Google 2005, caractérise un recul au niveau de plage du village touristique et un engraissement minimal au Nord d'Antsahabingo.

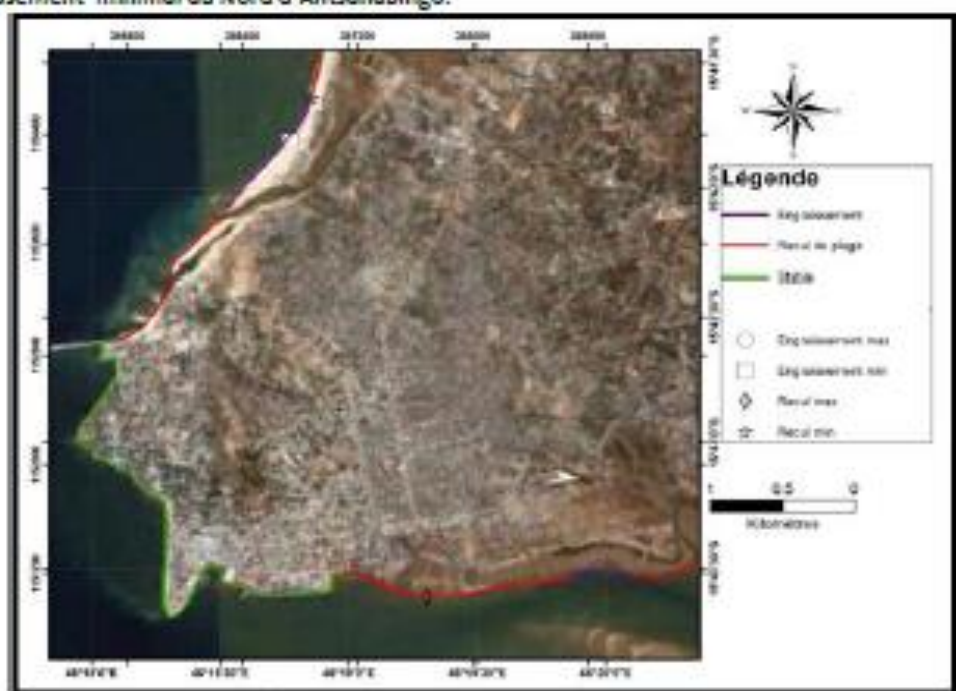


Figure 10 : Etat de côtes entre 1996- 2005

La figure 11, sur fond Google 2013, montre un engraissement maximal au niveau de plage du village touristique et un recul maximal au nord d'Antsahabingo.

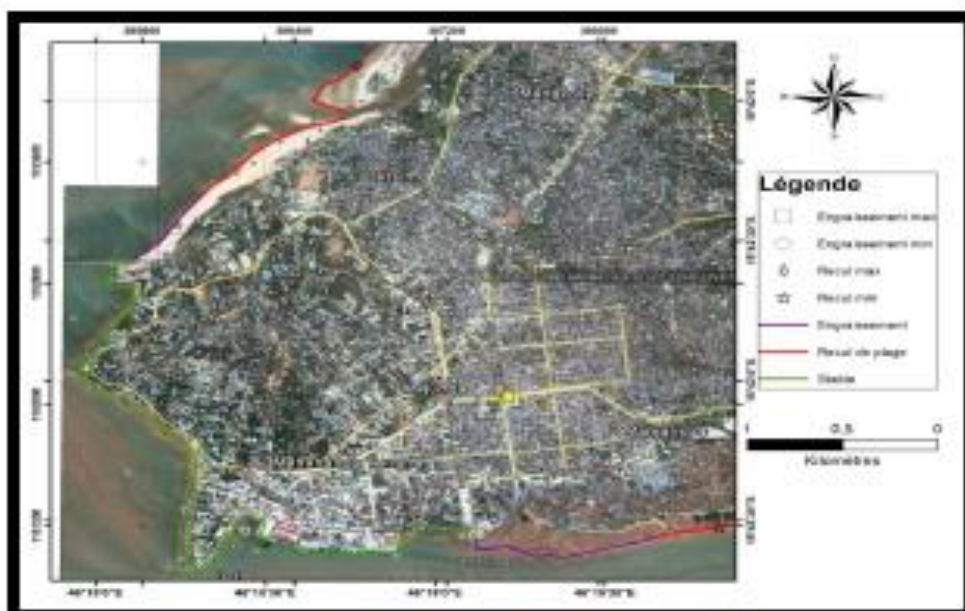


Figure 11 : Etat de côtes entre 2005-2013

Les caractéristiques des états de côtes entre 1952 à 2015 sont récapitulées dans le tableau 1 ci-après.
Tableau 1 : Caractéristiques géométriques des divers états de côte de 1952 à 2015

Etat de côte	Valeur	1952-1962	1962-1973	1973-1996	1996-2005	2005-2015
Recul	Coordonnées du recul maximal avec sa valeur	X= 386 879m Y= 1134662m $\alpha l_{max}=36,63m$	X= 388 915m Y= 1131 277m $\alpha l_{max}=208,9m$	X= 386 301m Y= 1153981m $\alpha l_{max}=124,21m$	X= 385 809m Y= 1153186m $\alpha l_{max}=84,12m$	X= 386 991m Y= 115074m $\alpha l_{max}=117,28m$
	Coordonnées du recul minimal avec sa valeur	X= 386 109m Y= 1 133 600m $\alpha l_{min}=2,68m$	X= 386 989m Y= 1 134 743m $\alpha l_{min}=69,09m$	X= 386 089m Y= 1 133 674m $\alpha l_{min}=12,1m$	X= 388 173m Y= 1 131 094m $\alpha l_{min}=20,93m$	X= 385 953m Y= 1 133 444m $\alpha l_{min}=50,48m$
	Taux de recul	2m/an	12,6m/an	2,86/an	3,25m/an	8,3m/an
	Longueur totale du recul	3186m	3738m	3906m	4263m	4014m
Engraissement	Coordonnées de l'engrassissement maximal avec sa valeur	X= 389 256m Y= 1 131 129m $\alpha l_{max}=39,88m$	X= 386 313m Y= 1 133 811m $\alpha l_{max}=96,94m$	X= 388 855m Y= 1 131 450m $\alpha l_{max}=41,12m$	X= 388 892m Y= 1 131 243m $\alpha l_{max}=17,13m$	X= 385 788m Y= 1 133 133m $\alpha l_{max}=91,29m$
	Coordonnées de l'engrassissement minimal avec sa valeur	X= 388 222m Y= 1 130 968m $\alpha l_{min}=1,24m$	X= 386 159m Y= 1 133 333m $\alpha l_{min}=14,78m$	X= 388 340m Y= 1 131 325m $\alpha l_{min}=8,91m$	X= 386 620m Y= 1 134 243m $\alpha l_{min}=7,31m$	X= 388 061m Y= 1 131 058m $\alpha l_{min}=10,40m$
	Taux d'engrassissement	2m/an	3m/an	1m/an	1,2m/an	5,08m/an
	Longueur totale de l'engrassissement	3168m	2374m	2525m	1316m	1461m
Stable	Longueur totale de la zone stable	4084m	4748m	4728m	4667m	4456m

L'évolution des traits de côte entre 1952 à 2015, sur fond Google Earth, est représentée par la Figure 12 ci-dessus.



Figure 12 : Les états de côtes selon les années

Les deux Figures 13 et 14 sont les endroits les plus visités à Mahajanga.



Figure 13 : La plage du « Village touristique »

Figure 14 : Le Bord

Le boulevard Poincaré appelé communément « le Bord » fait partie de la zone la plus stable et très fréquentée autant par les locaux que les visiteurs.

Conséquences du passage du cyclone Hellen

Le cyclone "HELLEN" a été classé parmi l'évènement cyclonique le plus puissant pour l'année 2014 car il a provoqué des pluies abondantes et des rafales de vents pouvant atteindre jusqu'à 290 km/h près de son centre (BNGRC, 2014). Le bilan qu'il a engendré est lourd car il a été recensé généralement dans huit Districts touchés

:

- 3 décédés, 9 disparus, 2 141 sinistrés, 1 736 sans-abris déplacés dans les sites d'hébergement ;
- 437 cases détruites, 14 cases endommagées, 160 cases inondées ;
- 1 EPP détruite, 5 EPP décoiffées, 2 EPP endommagées ;
- 2 CSB endommagés ;
- 2 bâtiments administratifs endommagés, 6 bâtiments administratifs décoiffés ;
- 2 barrages endommagés, 1 digue endommagé, 4 puits d'eau inondés ;
- 7 795 ha de rizières inondées, 114 ha de champs de cultures inondés et 23 bovidés tués.

Mais au niveau de la ville de Mahajanga de nombreux quartiers sont inondés, surtout les zones basses et même les quartiers les plus aisés comme Mahajanga Be, avec ses équipements des réseaux d'assainissement et ses grands avenues et boulevards ainsi que le « bord » sont touchés par le débordement de la mer. La Figure 14 illustre l'état du « bord » en temps normal et pendant le passage du cyclone Hellen en 2014



Figure 15 : Etat du « bord » en temps normal et lors du cyclone Hellen en 2014

Les bâtiments administratifs longeant le « bord » et les activités socio-économiques s'y trouvant ont subi l'effet du passage du cyclone Hellen comme le montre les deux Figures 15 et 16 suivantes.



Figure 16: Inondation devant la Banque Centrale de Mahajanga



Figure 17 : Pieds des tables des gargotiers dans l'eau

Discussions

A partir des volumes d'eau (m^3) drainés par l'ensemble des cours d'eau de la région et des surfaces inondées (Ha) en conséquence, le degré d'inondation a été déterminé. Le tableau 2 suivant présente ces différentes caractéristiques.

Tableau 2 : Les différents degrés d'inondation selon la superficie inondée et les volumes d'eau drainés

Degré d'inondation	Superficie inondée en Ha	Volume d'eau apportée en m ³
Très faible	194,9913	1004180,87
Faible	324,0647	3162718,3
Moyenne	323,0432	6338823,7
Elevée	797,8233	11462720,17
Très élevée	1239,931	17937510,36

Les quartiers qui longent le vallon Metzinger sont les plus touchés par l'inondation : Fiofia, Tsararano Ambany, Ambalavola, Ambovoalanana et dans la partie Nord, longeant la rivière Antsahabingo, figure le quartier de Mahavoky Avaratra. La Figure 17 illustre les zones inondées avec le degré d'inondation correspondant et les zones non inondées.

Le régime du littoral de Mahajanga est très fortement lié aux évolutions du débouché de la rivière d'Antsahabingo (Rakotonaivo L.N., 2003). L'activité de l'érosion marine était assez forte, car le déversement des sédiments continentaux n'arrive plus à faire l'équilibre à cause de l'activité humaine et du phénomène naturel, c'est-à-dire le décapage des mangroves et l'existence des cyclones qui ont enlevé les cordons d'enrichissement de la plage (village touristique).

Pour protéger le « Bord » contre ce genre de débordement de la mer, il est nécessaire de rehausser le muret en maçonnerie de moellons de 50 centimètres et d'ajouter des enrochements. L'hypersédimentation de Betsiboka, au niveau de la baie de Bombetoka, a apporté plus de 45 milliards de tonnes de sédiments depuis 1891 selon Salomon J.N. en 2009. Ce phénomène engendre un important engraissement dans la partie Sud de la ville, surtout entre 1932-1962 et de 1973-2013, laissant le port inutilisable actuellement.



Figure 18 : Répartition des zones inondées et non inondées à Mahajanga ville lors du passage du cyclone Hellen en 2014

Conclusion et perspectives

Le recul de plage du côté du « village touristique » a été constaté avant 1952 mais c'est surtout entre 1973 à 1996 qu'il atteint une valeur maximale de 124,21m.

La référence utilisée dans cette étude est la carte topographique de 1952 mais l'utilisation des documents cartographiques antérieurs à cette date et aussi des images satellitaires, permettra encore de mieux cerner l'état et l'évolution historique du littoral de Mahajanga.

Comme l'étude est basée seulement sur la méthode cartographique, un levé topographique sur terrain, une classification du littoral en segments homogènes et des enquêtes auprès des diverses entités complèteront et amélioreront les données obtenues.

Références bibliographiques

- Andriambolaitiana S., Randriamampianina M., 2013- Changement climatique, politique et perspective à Madagascar, Publication Friedrich Ebert Stiftung Madagascar, 24p
- Bureau National de Gestion des Risques et des Catastrophes (BNGRC), 2014 -Evaluation des dégâts et des actions de secours suite au passage du cyclone tropical intense Hellen, rapport inédit
- Galloway W.E., 1975- Process framework for describing the morphologic and stratigraphic evolution of deltaic positional systems - B.Ed. (Editor), Delta.Houston Geological Society. P. 87-98
- GREEN-OI, 1998- Mission pilote d'évaluation de l'érosion côtière et des risques sur les aménagements et la ville de Morondava, Madagascar - Rapport GREEN-OI du 12/02/1998
- Klein R.J.T., Nicholls R.J., Ragoonadeu S., Capobianco M., Aston J. Buckley E.N., 2001- Technological options for adaptation to climate in coastal zones. *Journal of Coastal Research*, 17, 3, p. 331-343
- Lebigre J. M., C. Marius, L. Larque, 1990- Les sols des marais maritimes du littoral occidental malgache, *Cahiers ORSTOM*, n°03 1989 – 1990, p. 277–286
- Rakotonaiivo L.N., 2003-Ouvrages en enrochement en protection du littoral à Madagascar, mémoire d'Ingénieur à l'ESPA, 135p
- Salomon J.N., 2009- L'accrétion littorale de la côte Ouest de Madagascar, *Revue Physio-Géo* Vol3, p35-59
- Zafindravita I.G., 2003- Géologie urbaine et érosion côtière de la ville de Mahajanga par télédétection et SIG, Mémoire d'ingénieur à l'ESPA, 84p

Gestion intégrée des ressources en eau du Bassin versant de Soavina par télédétection et SIG, Région Amoron'i Mania Fianarantsoa

Rakotoniraza D.^{1,2*}, Rasolomanana J.³, Rakaimaro J.³, Andrimanarason N.^{3,4}, Rakoto H.³, Mandimbihantso A.⁴

1 Institut Supérieur de Technologie, Ambositra, Région Amoron'i mania, B.P. 306

2 ED Ingénierie et Géosciences, ESPA, Université d'Antananarivo, B.P. 1500

3 Institut et Observatoire de Géophysique d'Antananarivo, B.P. 3040

4 Mention Géologie, ESPA, Université d'Antananarivo, B.P. 1500

*Auteur correspondant : Rakotoniraza D., Tel. +261343140361, E-mail: rakotoniraza_daniel@yahoo.fr

Résumé- En matière de gestion intégrée des ressources en eau, la prise en compte de toutes les composantes du cycle hydrologique (précipitation, infiltration, ruissellement, évapotranspiration, ...) et leur interaction avec les milieux naturel et humain dans un Bassin versant sont parmi les clés majeures. Il s'agit d'essayer de modéliser l'écoulement des eaux dans le bassin en délimitant les zones d'infiltration potentielles. La détermination des paramètres favorisant l'infiltration et l'influence du sens de l'écoulement s'appuie sur l'apport de deux outils, ENVI pour le traitement des images satellitaires et ArcGIS pour la modélisation. L'exploitation des images satellitaires a permis de dégager les traits structuraux majeurs tout comme les données radar SRTM ont permis de déterminer l'accumulation et les écoulements des eaux dans le bassin. Finalement, le traitement des différentes données couvrant la zone d'étude a conduit à une meilleure connaissance du Bassin versant de Soavina, connaissance très importante en matière de prise de décision et d'aide à la gestion coordonnée et intégrée des eaux de surface et souterraine ainsi que des ressources connexes exploitées par la population.

Mots clés- Amoron'i Mania, Soavina, Bassin versant, Cycle de l'eau, Infiltration, Gestion intégrée des ressources en eaux, Télédétection, SIG ArcGIS.

Abstract- In terms of an integrated water resource management, the account of all the elements of hydrologic cycle and its correlation within the natural system as well as the human pressure in a watershed is one of the major keys for analyses (runoff, runoff, infiltration, evapotranspiration, ...). The main objective is to model the flow of water within the catchment area in delineating the potential infiltration effects. The determination of the parameters that promote infiltration and bring influence into the flow direction is done with the help of two tools ENVI for the treatment of the satellite images and ArcGIS for water modelling. Satellite images help to produce schematic ideas of flow direction and accumulation. The topographic map processing and other local database has led multidisciplinary and scientific knowledge about watershed in question. Also all acquired information are very important with respect to decision making and will help the management system for coordination, integrated surface water and groundwater as well as related resources exploited by the population.

Key words- Amoron'i Mania, Soavina, Watershed, Water cycle, Infiltration, Water resources integrated management, Remote sensing, GIS ArcGIS

Introduction

La gestion intégrée de l'eau par Bassin versant est un processus qui favorise la gestion coordonnée de l'eau et des ressources connexes à l'intérieur des limites de ce bassin (Georges G. et al. 2004). Elle aura pour conséquences d'orienter graduellement les ressources humaines et financières vers la recherche de résultats palpables quant aux usages judicieux des ressources en eau selon les besoins de la population concernée. A Madagascar, l'eau ne manque pas, elle est tout simplement mal gérée du fait d'utilisations anarchiques. Le problème réside principalement dans l'absence d'une structure responsable et d'une juridiction adéquate. Ce cas est si souvent remarqué dans la Région Amoron'i Mania, surtout

dans l'unité hydrologique de Soavina. La mise en œuvre de la gestion intégrée de l'eau par Bassin versant dans cette localité sera bénéfique à l'ensemble de ses usagers.

Par ses diverses fonctions (hydrologique, écologique, socio-économique, ...), le Bassin versant constitue l'unité naturelle par excellence de la gestion intégrée des ressources en eau. Elle peut concerner plusieurs domaines de préoccupation, tels le contrôle de la qualité, la gestion des risques associés à son aspect quantitatif (Georges G. et al., 2004). Elle peut, par ailleurs, se comprendre en termes de protection de la quantité (débit d'étiage, rabattement maximum, etc.) et de conservation des eaux et des sols (Nguetoro M., 1995). La délimitation et la caractérisation de cette unité de gestion constitue un élément clef pour la gestion hydrologique (Fossey M., 2008) car la connaissance des divers paramètres qui la caractérise facilite et aide à la prise de décision. En plus, la connaissance de la zone d'infiltration potentielle permet aux décideurs de délimiter les zones d'intervention prioritaires en matière de protection, d'amélioration et de conservation qualitative des ressources en eau. Pour mieux appréhender les différents problèmes liés à la quantité et à la qualité de l'eau, il est nécessaire de tenir compte tout ce qui se passe dans le Bassin versant. Il convient également d'inclure autant les activités socio-économiques que les études multidisciplinaires intégrant la géologie, la géomorphologie, l'hydrologie et l'hydrogéologie.

Grâce aux outils mis en œuvre, le SIG ArcGIS, les Images LANDSAT 7 ETM+ et radar SRTM 30, des études multidisciplinaires (extraction des réseaux de fracturation, détermination de zones d'accumulation de l'écoulement, détermination de paramètres caractéristiques des réseaux hydrographiques, délimitation des zones d'infiltration potentielles) ont pu être menées dans le Bassin versant de Soavina.

1- Localisation de la zone d'étude

Du point de vue administratif, elle se trouve dans la Région Amoron'i Mania, District d'Ambatofinandrahana, délimitée par les Communes Rurales: Ambodromisotra au Nord, Andakatany et Ihadilana à l'Est, Ambatomarina au Sud et Ambatofinandrahana à l'Ouest (Figure 1).

Le climat est de type humide et subhumide avec une pluviométrie annuelle variant de 1.000mm à 1.400mm. Du point de vue géologique, la formation métamorphique prédomine si sur le plan pédologique, la région est essentiellement constituée de latérite ferrallitique rouge. L'activité principale de la population reste l'agriculture notamment la culture du riz et du maïs. En général, l'alimentation en eau potable de la population se fait par captage de sources.

Compte tenu de la nouvelle délimitation des Agences des Bassins par réseau hydrographique à Madagascar (Rosolofontina J.D., 2012), le Bassin versant de Soavina se situe dans l'Agence du Bassin du Centre-Ouest. Il couvre une superficie de 305,48 km² en zone des Hautes Terres Centrales avec des altitudes variant de 1.057m et de 1.800m. Le réseau hydrographique principal est la rivière Itsindra. Il fait partie du Bassin versant de Tsinibihina.



Figure 1 - Localisation de la zone d'étude

3- Matériels et méthodes

Pour avoir de bons résultats, les travaux ont commencé par la collecte de données de base auprès de divers organismes, sur internet, Des descentes sur terrain ont aussi été effectuées. ArcGIS a permis de produire différentes cartes thématiques suivant la disponibilité des données. Des images satellitaires (Landsat 7 ETM+) et un Modèle Numérique de Terrain extrait de SRTM 30 ont été utilisés pour l'extraction de linéaments en utilisant l'ENVI. Deux cartes topographiques 1/100.000^{ème} Manandona et Ambatofinandrahana, respectivement les Feuilles N50 et N51 ont aussi été utilisées.

Afin d'atteindre l'objectif, tous les paramètres disponibles pouvant influencer l'écoulement des eaux et favoriser la recharge de la nappe souterraine (densité de fracturation, densité de drainage ou densité du réseau hydrographique, pente du terrain, ...) ont été exploités. La démarche méthodologique est la suivante :

- détermination de la direction et de l'accumulation de l'écoulement

Sur les MNTs, on peut observer plusieurs zones de dépressions. Elles sont formées de cellules isolées autour desquelles se trouvent des cellules qui ont des altitudes plus élevées et des zones relativement plates. Il s'agit de disposer d'un MNT hydrologiquement fiable, extrait de la zone d'étude puis de procéder aux divers traitements. On commence par la correction des valeurs aberrantes qui peuvent influencer le sens de l'écoulement, puis de la détermination de la direction de l'écoulement (flow direction) et de l'accumulation de l'écoulement (flow accumulation).

Le sens de l'écoulement de l'eau part de la cellule centrale vers les cellules voisines. La sortie de la commande lors de la détermination de la direction de l'écoulement est un fichier raster entier, codifié dont les valeurs varient de 1, 2, 4, ..., 128 (Figure 2).

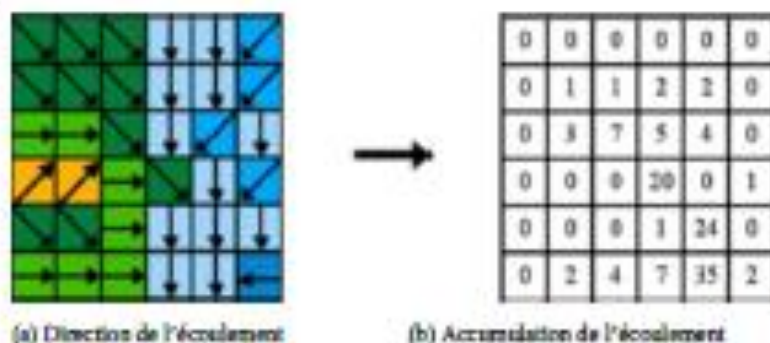


Source: Arlio P. (2015)

Figure 2- Code de la direction de l'écoulement

Pour l'accumulation de l'écoulement, quand aucune cellule ne s'écoule vers une cellule considérée, on prendra la valeur 0. Par contre, si plusieurs cellules s'écoulent vers une cellule donnée, la valeur sera égale à la somme des valeurs d'écoulement de ces cellules (Figure 3a et 3b). Ainsi, la valeur la plus grande correspond à l'exutoire principal du cours d'eau qui se trouve sur la cellule ayant la valeur 35 (Figure 3b), cellule qui reçoit le maximum d'écoulement.

Les cellules ayant les valeurs d'accumulation d'écoulement zéro (0) correspondent à une zone topographique élevée utilisée au tracé de la ligne de crête ou de la ligne de partage des eaux de surface.



Source: Arlio P. (2015)

Figure 3- Matrice de direction et d'accumulation de l'écoulement

- conception des différentes cartes thématiques

Cette étape consiste à délimiter les zones d'infiltration potentielle (zones de recharge ou de réalimentation favorables de la nappe souterraine). La démarche méthodologique adoptée dans cette conception des cartes commence par l'identification des critères de décision, les cartographier en mettant en évidence les différentes classes respectives, et procéder à la pondération suivant la démarche multicritère en superposant les différentes cartes obtenues. A la fin de cette étape, une carte de synthèse illustrant les zones potentielles d'infiltration est établie.

> Identification de critères de décision

Les densités de drainage et de fracturation devraient être prises en compte comme critères de décision (Rambert B., 1973; Bensakhici N., 2006 ; Kanohin F., O. et al, 2012). Après leurs superpositions pondérées, on vérifie le résultat obtenu par les valeurs numériques de la fréquence de cours d'eau, le coefficient de torrentialité et l'indice de compacité de Gravelius.

> Cartographie de la pente

La pente est un élément essentiel. Elle détermine le temps de séjour des eaux dans la formation lithologique ou aquifère du territoire et la vitesse de l'écoulement sous l'influence de la force de gravité. Plus la pente est faible, plus le temps de séjour de l'écoulement est

long. La pente conditionne l'importance de l'infiltration des eaux. La détermination de sa valeur à partir du MNT se fait sous ArcGIS.

➤ Détermination de sens d'écoulement des eaux et délimitation du Bassin versant

L'obtention de la valeur des paramètres morphométriques (densité de drainage, densité hydrographique, indice de compacité de Gravellus, ...) à partir de l'exploitation des réseaux hydrographiques, constitue un élément capital à la délimitation de la zone d'infiltration potentielle. Elle permet de connaître la relation entre le caractère physique de la formation géologique et l'infiltration. L'extraction des réseaux hydrographiques se fait à partir de la direction et de l'accumulation de l'écoulement. Grâce à ArcGIS, cette extraction se fait de manière pratiquement automatique et utilise une méthode classique mettant en œuvre le traitement de l'algorithme D8. Cet algorithme considère la direction de l'écoulement suivant le flux unidirectionnel à huit connexités. Le processus de traitement se résume comme suit:

- illustration de tous les cours d'eau suivi de son extraction;
- délimitation de Bassin versant.

La zone d'étude a été subdivisée en cinq sous bassins versants pour faciliter l'interprétation de chaque paramètre caractéristique du réseau hydrographique et pour que le résultat obtenu soit plus précis.

➤ Cartographie des linéaments

Les linéaments sont des lignes significatives du paysage, ayant un tracé rectiligne ou curviligne, causés par des joints ou des failles (Yao K. Th. et al., 2014). Ils contribuent à l'écoulement des eaux. Différentes techniques de rehaussement des images LANDSAT (composition colorée, ACP, filtre directionnel, ...), des images satellitaires permettant de détecter le plus grand nombre de fractures ont été utilisées. Le processus de traitement de ces images comprend (Randrianasolo B, 2009; Kolko M., 2010; Kanohin F. et al, 2012; Kouff S. et al, 2013) l'analyse ACP, la composition colorée et les filtres directionnels Sobel. Ce dernier de type de dimension 7x7 a été utilisé pour la direction N-S, E-W, NW-SE, NE-SW dont les matrices correspondantes sont présentées dans le Tableau suivant :

Tableau 1- Filtres directionnels de Sobel (matrice 7x7)

N-S							E-W						
1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-2	0	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1
NE-SW							NW-SE						
0	1	1	1	1	1	2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	0
-1	0	2	2	2	3	1	-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-1	-2	0	3	4	2	1	-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1	-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1	-1	0	2	2	2	3	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	1	1	2

- standardisation des données

Toutes les images traitées avec ENVI ont été exportées dans le logiciel ArcGIS10.3 pour la digitalisation de toutes structures linéaires et leur extraction. Pour que la carte finale ne comporte que des linéaments géologiques, tous les tracés rectilignes relatifs aux activités humaines (route, piste) sont alors vectorisés à partir de la carte topographique géoréférencée et superposée aux différentes images traitées avant l'extraction pour les supprimer.

Pour faciliter la combinaison, la pente de forme raster a été convertie en Grid. La densité de drainage et celle de la fracturation ont été transformées en multipoint pour l'interpolation. A la suite de cette opération, les surfaces obtenues sont distribuées en 10 classes pour faciliter l'attribution de note.

- délimitation des zones d'infiltration potentielle

La superposition des cartes de différents critères de décision obtenues précédemment (cartes de pente du terrain, de densité de drainage et de fracturation, ...) se fait avec ArcGIS 10.3 où les cartes de chaque cellule raster de la zone comportent une note pour chaque critère en entrée. En effet, l'addition de ces rasters entraîne une association mathématique des notes des pixels qui s'empilent. Une nouvelle valeur apparaît donc à chaque cellule de raster en sortie.

4. Résultats

4.1- Modélisation de l'écoulement des eaux

Après la correction des valeurs aberrantes dans la carte MNT de la zone d'étude, on a pu modéliser la direction et l'accumulation de l'écoulement.

4.1.1- Direction et accumulation de l'écoulement

Les cellules correspondant à la valeur 64 prédominent dans le bassin étudié (Figure 4). Plusieurs cellules s'y écoulent. La direction de l'écoulement suit en effet ce sens. Ainsi, ces cellules prennent l'ensemble des eaux générées par les autres dans le Bassin versant. La valeur des cellules correspondant à 64 est égale à la somme des valeurs de toutes les cellules qui s'écoulent vers elle.

L'accumulation de l'écoulement dans ces cellules engendre une saturation en eau des formations géologiques sous-jacentes, d'où l'apparition du réseau hydrographique (Figure 5).

Figure 4 - Carte de la direction de l'écoulement Figure 5 - Carte de l'accumulation de l'écoulement

4.1.2- Propagation de l'écoulement des eaux à la surface du sol

Le Bassin versant reçoit l'eau de pluie, une partie de l'eau non restituée à l'atmosphère se propage sous forme d'écoulement de surface dans diverses directions. Si l'écoulement se concentre dans une même direction, les sols sur ces zones sont très sensibles à l'érosion. Afin de visualiser le relief naturel, l'ombrage dans la zone d'étude sur laquelle la modélisation de la propagation des écoulements de l'eau à la surface du sol doit réaliser, est calculé (Figure 6). Sur la zone à forte déclivité (sous Bassin versant d'Amborompoty), les rivières sont plus ou moins rectilignes, une augmentation progressive de vitesse de l'écoulement de l'amont vers l'aval peut favoriser l'érosion du sol dans ces secteurs. Le risque de débordement de cours d'eau et une augmentation d'érosion peuvent se produire. Ainsi, la formation pédologique s'amincit graduellement dans cette zone. Ces phénomènes réduisent l'infiltration des eaux. Ils favorisent le transport solide et l'ensablement du bas-fond en aval du bassin qui sont parmi les facteurs de contamination des ressources en eau superficielle, voire souterraine. La prise en compte de l'organisation des réseaux hydrographiques est alors indispensable pour une bonne compréhension de la propagation de l'écoulement.

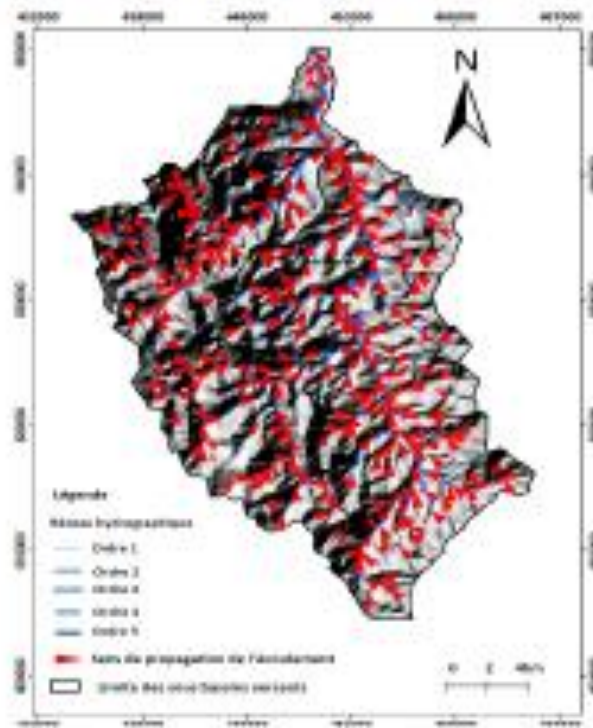


Figure 6- Modélisation de la propagation de l'écoulement des eaux à la surface du sol

Dans la zone montagneuse (Marofarafara, Marosahona), une fréquence des réseaux hydrographiques d'ordre inférieur par rapport au secteur plan (Voanona, Ambaknva) est observée. Cette observation signifie une faible alimentation de la nappe souterraine (formation lithologique peu perméable) dans cette zone.

4.2- Délimitation de la zone d'infiltration potentielle

La zone d'infiltration potentielle est délimitée par la superposition pondérée des trois cartes: celles de la densité de drainage, de densité de fracturation et de la pente du terrain

4.2.1- Densité de drainage et densité hydrographique

La densité de drainage et la densité hydrographique sont définies respectivement par :

$$D_d = \frac{L}{A} \quad (\text{Equation 1})$$

avec D_d : densité de drainage (km/km^2); L : longueur cumulée de cours d'eau (km); A : surface total du bassin versant (km^2).

$$F = \frac{N}{A} \quad (\text{Equation 2})$$

avec F : densité hydrographique; N : nombre de cours d'eau

Les valeurs de la densité de drainage obtenues sont comprises entre 0,97 et 1,11 km/km^2 (Tableau 2). Des études ont montré qu'une zone à densité de drainage élevée est défavorable à l'alimentation de la nappe souterraine (Kanohtu F. et al, 2012), qu'une faible densité de drainage et densité hydrographique présente une région à substratum perméable (Bentekhtel N., 2006), et que le terrain le plus perméable correspond à la faible valeur de densité de drainage (Rambert B., 1973).

Plus la perméabilité est élevée, plus l'infiltration est forte. Dans la zone d'étude, on observe que les cinq sous-bassins versants ont des valeurs de densité de drainage plus ou moins faibles ($D_d < 1,5 \text{ km}/\text{km}^2$). Donc, le Bassin versant de Soavina présente dans l'ensemble une formation lithologique perméable. D'après les valeurs de la densité de drainage de chaque sous-bassin versant (Tableau 2), une forte infiltration se situe dans le sous-bassin versant d'Andrarezona ($D_d = 0,97 \text{ km}/\text{km}^2$) tandis qu'une faible infiltration se localise dans le sous-bassin versant Voanana.

Tableau 2- Valeur de la densité de drainage et de la densité hydrographique

Sous-bassin versant	Densité de drainage (km/km^2)	Densité de réseau hydrographique (km/km^2)
Voanana	1,11	1,97
Amborompoty	1,06	1,41
Andrarezona	0,97	1,17
Marerano	1,07	1,40
Ambalavao	1,09	1,31

Après Interpolation, chaque carte dérivée est reclassée sur une échelle de mesure commune en donnant à chaque classe une valeur discrète de 1 à 10. Les plus hautes valeurs sont données aux attributs appropriés à l'infiltration. La valeur la plus élevée indique la zone favorable à l'infiltration (Figure 7).

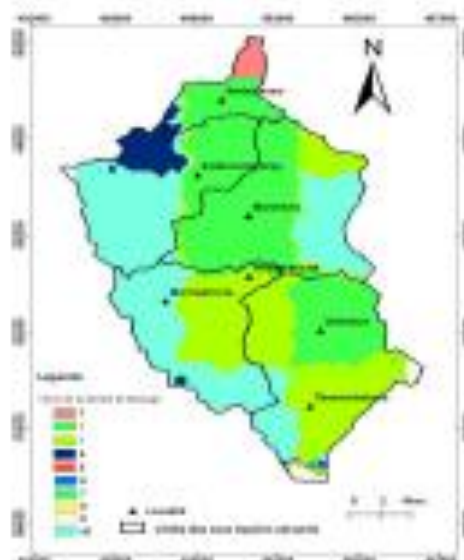


Figure 7- Carte de la densité de drainage interpolée

La densité de drainage (Dd) correspondant au nombre 10 est située sur la zone où la pente est faible (infiltration favorable) et le chiffre 1 sur la zone à pente la plus élevée (défavorable à l'infiltration).

4.2.2- Pente du Bassin versant

La carte de la pente a été dérivée du MNT de la zone. La pente est l'un des paramètres indispensables à la détermination du sens de l'écoulement des eaux de surface et à la détection du point d'infiltration potentielle. Plus la pente est forte, plus la vitesse de l'écoulement augmente et l'intensité de l'érosion s'accroît. Ce qui signifie qu'aux zones à forte pente, le temps de séjour des eaux de ruissellement diminue. L'alimentation de la nappe souterraine dans cette zone est donc faible.

Une pente dont la valeur dépasse 25% provoque un écoulement superficiel très fort (Boulghobra et al, 2006). La classe de pente très forte (supérieure à 25%) prédomine dans les sous-bassins versants d'Amborompotsy et d'Andrazozona (Figure 8a). Elle s'adoucit entre 0 à 5% dans les sous-bassins de Mavirano et d'Ambalavao (zone à basse altitude). En termes d'érodabilité du sol, des études (PNUE/PAM, 2000) ont montré que dans le secteur où une pente est supérieure à 3%, l'érosion devient active. En effet, dans la zone à forte pente, la couche pédologique est peu épaisse. En référence à ces études, en période de crue, 45% de la superficie du bassin versant de Soavina sont dominées par l'érosion hydrique très active. La vitesse de l'écoulement diminue dans le secteur à faible déclivité, le temps de séjour des eaux dans les formations superficielles dans cette zone est alors augmenté, ce qui favorise une infiltration efficace.

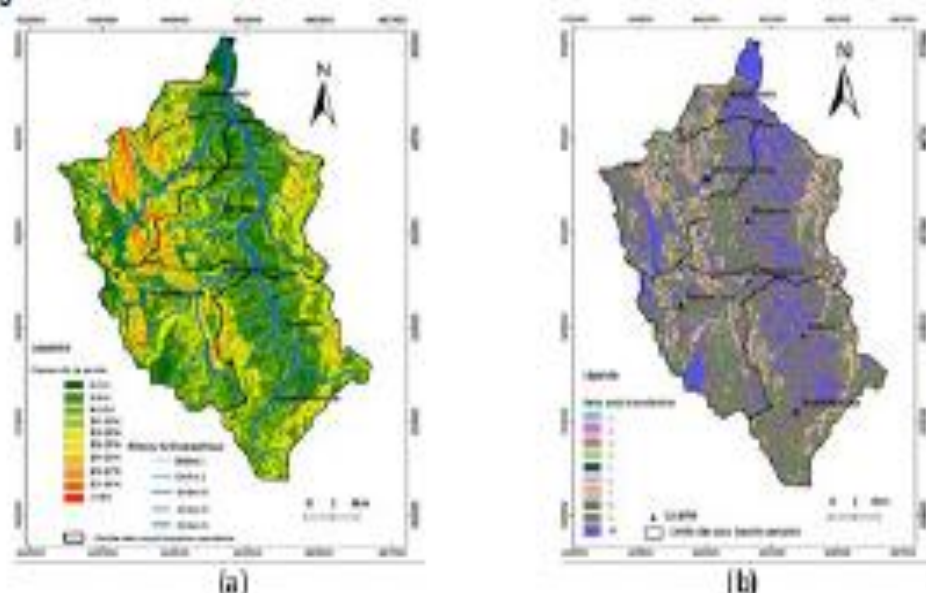


Figure 8- Cartes de pente: (a) classes avec réseau hydrographiques - (b) différentes classes de pentes pondérées

Ainsi, la répartition spatiale des zones d'infiltration est connue en considérant la pente du terrain (Figure 8b) et la densité de drainage. La valeur élevée indique des zones favorables à la recharge de la nappe. Elles se localisent dans les régions relativement planes (pente faible). La valeur devient très faible en zone de relief escarpé (massifs d'Amborompotsy et de Marosahono). La recharge de la nappe souterraine augmente progressivement de l'amont vers l'aval du bassin étudié.

4.2.3- Cartographie des Linéaments

L'exploitation des images satellitaires Landsat 7 ETM+ à l'aide de ENVI et de ArcGIS a permis d'aboutir à l'extraction des réseaux de fractures dans la zone d'étude (Figure 9a). La rosace directionnelle (Figure 9b) résultats de l'analyse statistique des fractures montre 7 principales familles de linéaments : N00-15, N20-35, N45-55, N60-70, N75-90, N120-140, N150-175 avec dominance de N150-175 qui représente 25% des linéaments.

Le filtre directionnel de type Sobel permet de mettre en évidence les grandes fractures dans les différentes directions. Les fractures ouvertes, drainantes participent à la recharge de la nappe souterraine (Gulliot et al, 1993; Kanohin F. O. et al, 2012). Plus la densité de fracturation est élevée, plus la recharge est importante. Cette recharge est donc très favorable dans les secteurs d'Andrazozona, de Mavranano et d'Amborompotsy (Figure 9a).

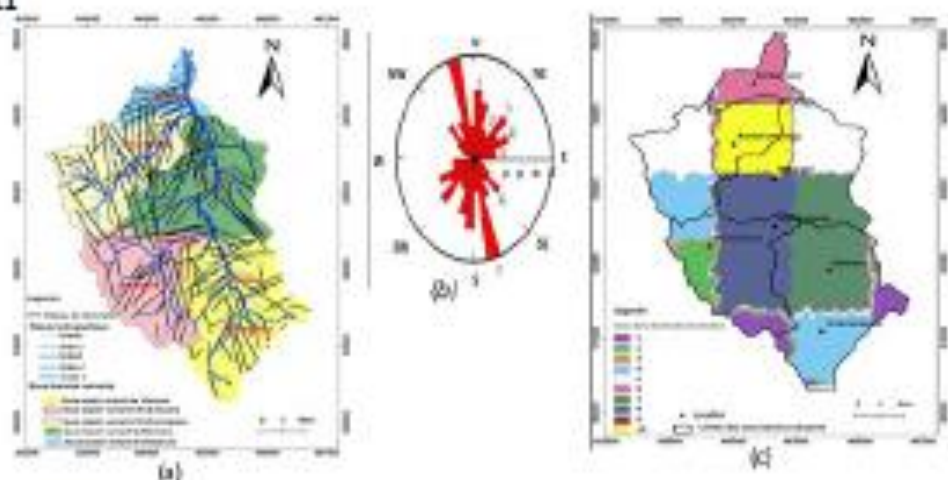


Figure 9- Cartes des linéaments: (a) réseau de fracture de filtres directionnels de direction N00 ; N45, N90; N135 et réseaux hydrographique; (b) réseaux directionnels de fracture issue des images satellitaires; (c) densité de fracture interpolée

Quant à la disponibilité des ressources en eau souterraine, des chercheurs (Issiako S. et al., 2003) ont montré qu'aux niveaux de l'intersection de deux ou plusieurs fractures, l'implantation de forage est conseillée pour avoir un grand débit en zone fracturée. Dans la zone d'étude, une telle zone se situe dans le secteur d'Amborompotsy. En considérant le réseau de fractures, la disponibilité et la recharge de la nappe souterraine se localisent dans les sous-bassins versants d'Amborompotsy et de Marerano.

La superposition de la carte des linéaments ou de fracturation avec celle du réseau hydrographique (Figure 9a) illustre que, dans le secteur de Tanamahalana et Ambalavao, des cours d'eau empruntent certaines directions de fracturation. Donc, les fractures influent aussi sur l'écoulement des eaux à la surface du sol (Koffi Agy S. et al., 2014). Elles jouent un rôle de drains et favorisent l'infiltration et le cheminement des eaux.

La carte issue de l'interpolation de réseau de fractures permet d'intégrer le rôle des linéaments dans la délimitation de la zone d'infiltration potentielle dans le bassin versant de Soavina. La valeur 10 correspond à la zone favorable à l'alimentation de la nappe souterraine. Sur la carte de spatialisation de densité de fracturation (Figure 9c), l'infiltration des eaux augmente de l'amont vers l'aval du bassin. Une légère diminution de l'infiltration marquée par la baisse de cette valeur est observée dans le sous-bassin versant d'Ambalavao où se trouve l'exutoire principal du bassin d'étude. La valeur la plus élevée est localisée dans les sous-bassins versants d'Amborompotsy et de Marerano et la plus faible se situe en grande partie en amont des sous-bassins versants de Voanana et d'Andrarazona.

4.2.4- Pondération et combinaison des critères

Afin de pouvoir créer une carte permettant de délimiter les zones potentiellement favorables à l'infiltration, les différentes cartes relatives à chaque critère sont combinées. Ainsi, tous les rasters d'entrée doivent être pondérés, en affectant un pourcentage d'influence à chacune d'eux. Les pourcentages les plus élevés sont donnés aux critères ayant des influences plus importantes (favorisant l'infiltration). Si les critères sont d'importances égales, un même pourcentage les sont attribués (Tableau 3).

Tableau 3- Attribution de pourcentage d'influence aux différents critères selon la nature de la carte

Critères	Influence (%)
Pente	50
Densité de drainage	25
Densité de fracturation	25

Dans le Bassin versant étudié, la superposition pondérée de différentes cartes thématiques a permis d'obtenir un raster en sortie indiquant la localisation de la zone potentiellement favorable à l'infiltration (Figure 10).

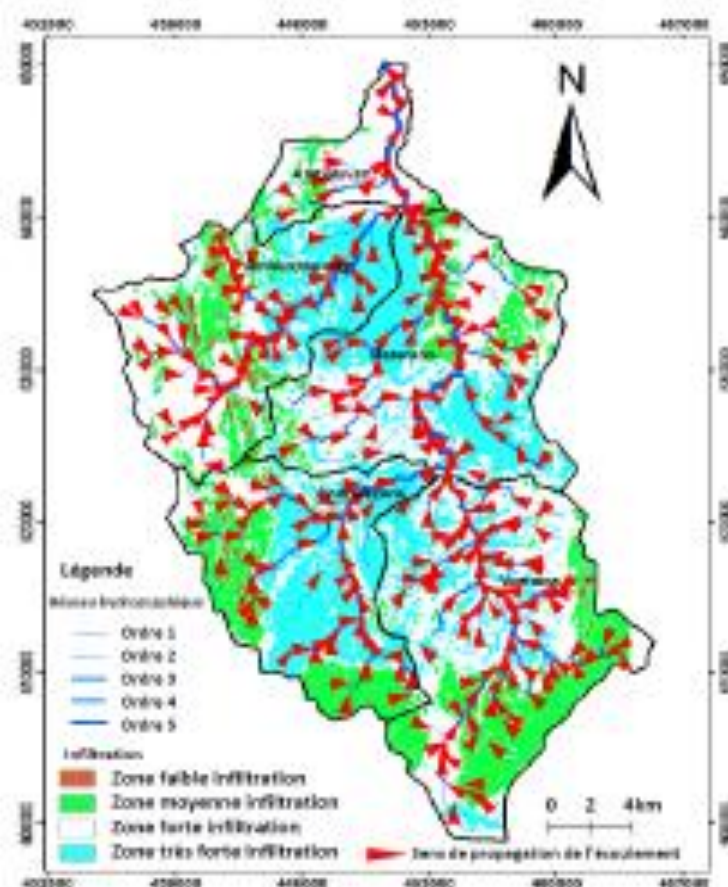


Figure 10- Carte de la délimitation de la zone d'infiltration potentielle

Cette carte montre que 3,67 % ($0,71 \text{ km}^2$) de la surface du sous-bassin versant d'Ambalavao sont occupés par les zones d'infiltration potentielle. Quant au sous-bassin de Voanana, cette zone occupe 20,45% ($17,33 \text{ km}^2$) de sa superficie, elle représente 27,81% ($17,93 \text{ km}^2$) de la superficie du sous-bassin d'Amborompotsy. Pour les sous-bassins versants de Maremano et d'Andranazona, ces valeurs augmentent et occupent respectivement 34,85% ($26,58 \text{ km}^2$) et 45,61% ($27,78 \text{ km}^2$) de leur surface. D'après cette statistique, la majorité des zones potentiellement favorables à l'infiltration se localise dans le sous-bassin versant d'Andranazona. Par rapport à la surface totale du bassin versant de Soavina ($305,48 \text{ km}^2$), la zone d'infiltration potentielle s'étale sur une superficie de 29, 57% (soit $90,32 \text{ km}^2$).

Pour assurer la protection, la conservation, ainsi que l'amélioration de la qualité des ressources en eau (souterraine ou superficielle) dans le bassin versant de Soavina, il suffit de dresser une autre carte de localisation de la source de contamination pour délimiter la zone d'intervention prioritaire.

4.2.5- Indice de compacité de Gravelius

Il est défini par :

$$K_G = \frac{P}{2 \cdot \sqrt{\pi} \cdot A} \approx 0,28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (\text{Equation 3})$$

K_G est proche de 1 pour un bassin versant de forme circulaire, et $K_G \geq 1$ pour un bassin de forme allongée. Un bassin versant circulaire possède un potentiel d'infiltration plus important que celui de forme allongée (Alexandre P., 2008). Dans la zone d'étude, les valeurs de K_G montrent que les cinq sous-bassins versants présentent dans l'ensemble une forme plus ou moins allongée ($1,42 < K_G < 1,69$) malgré la différence de leur taille (Tableau 4). Les deux sous-bassins Andarrezona et Marerano ont les valeurs de K_G plus proches de 1. Ils sont alors de potentiel d'infiltration élevé, ce qui confirme le résultat dans la Figure 10.

4.2.6- Fréquence de cours d'eau et coefficient de torrentialité

La fréquence de cours d'eau représente le nombre de cours d'eau d'ordre 1 par unité de surface. Le réseau hydrographique dans la zone d'étude présente une hiérarchisation moyenne (fréquence de cours d'eau faible). Pour le coefficient de torrentialité, il est défini par le rapport entre la fréquence de cours d'eau d'ordre 1 avec la densité de drainage (Tableau 4). La faible valeur de coefficient de torrentialité est liée à la forte perméabilité de la formation lithologique (Bouzonni A., 2012). Les sous-bassins versants d'Andarrezona et de Marerano présentent des zones d'infiltration potentielle, vis-à-vis des autres sous-bassins versants, ce qui confirme le résultat obtenu sur la Figure 10.

Tableau 4: Valeurs des différentes caractéristiques

Sous-bassin versant	Fréquence des réseaux hydrographiques	Coefficient de torrentialité Km/km²	Indice de compacité de Gravelius
Voenana	0,98	1,09	1,46
Amberumpotry	0,70	0,74	1,42
Andarrezona	0,62	0,61	1,33
Marerano	0,67	0,72	1,40
Ambalavao	0,78	0,85	1,69

5. Discussion

L'application du SIG et de la télédétection a permis d'aboutir à la production de diverses cartes thématiques qui conduisent à une meilleure connaissance du bassin versant étudié sur le plan multi-dimensionnel. L'analyse de la carte des linéaments permet de mettre en évidence l'orientation dominante des réseaux de fractures, dont la superposition avec une autre carte illustre certains réseaux de fracturation gouvernant le sens de l'écoulement des eaux. L'exploitation de cette carte conduit à l'élaboration de la densité de fracturation (Figure 9c). L'étude de la densité spatiale du réseau hydrographique et l'analyse de la déclivité du terrain permettent de discerner des zones ayant une potentielle certaine d'infiltration ainsi que de secteurs dont le ruissellement est prépondérant.

La cartographie de la zone favorable à l'alimentation des eaux souterraines est fondée sur la cartographie des linéaments, de la pente et la densité de drainage. La superposition pondérée de ces trois cartes met en évidence que la zone d'infiltration potentielle occupe 29,57% (soit 90,32 km²) de la surface du bassin d'étude (305,48 km²) dont 0,23% dans le sous-bassin

versant d'Ambalavao, 8,71% dans le sous-bassin versant de Marerano, 9,10% dans le sous Bassin versant d'Andranazona ; 5,87% dans le sous bassin d'Amborompotsy et 5,67 dans le sous-bassin de Voanana. Ces zones correspondent à des valeurs de pente faibles, de densité de drainage moyenne et de densité de fracturation forte. On y trouve aussi de faibles valeurs d'indice de compacité de Gravelius et de coefficient de torrencialité. La répartition spatiale de la zone d'infiltration des eaux signifie que la répartition géographique de la nappe souterraine et sa disponibilité sont inégaux. Ce résultat exige donc de nouveaux schémas de gestion intégrée des ressources en eau pour éviter les litiges liés à l'eau tant sur le pan quantitative que qualitative.

Pour orienter la zone d'intervention prioritaire à la protection et à la conservation qualitative des ressources en eau à l'échelle du bassin versant de Soavina, l'exploitation de la carte de synthèse (Figure 10) est un incontournable.

Conclusion

Grâce à son aptitude de produire des images multispectrales, la télédétection appuyée par un SIG approprié montre plusieurs avantages en matière de gestion des ressources en eau et d'aide à la décision. Ces outils permettent de produire différentes cartes thématiques à partir d'images satellitaires. La mise en relation de ces différentes cartes aboutit à la production d'une nouvelle carte de synthèse montrant la propagation de l'écoulement des eaux à la surface du sol ainsi que les zones d'infiltration potentielle qui occupent 30% (soit 90,32km²) de la surface du bassin versant de Soavina. La grande partie de cette zone se situe dans le sous-bassin versant d'Andranazona. Sa localisation permet au décideur de choisir les zones d'intervention prioritaire en matière de protection et de conservation sur les plans quantitatif et qualitatif des ressources en eau existantes, de mettre en œuvre des plans d'action efficaces pour l'amélioration de la qualité et de prédire le risque de contamination des eaux souterraines.

Le bassin versant est l'unité naturelle de gestion des ressources en eau. La méconnaissance de cet espace et le non disponibilité de données physiques, caractéristiques au bassin restent un problème majeur pour les décideurs locaux dans la mise en œuvre de ce type de gestion. Pour le réduire, on a montré que le terrain le plus perméable correspond à la faible valeur de densité de drainage, à faible valeur d'indice de compacité de Gravelius et de coefficient de torrencialité, de se localiser aux intersections des fractures les plus longues et les plus nombreuses, d'avoir de faibles valeurs de pente et se situant sur des zones topographiquement basses et, enfin d'être en aval du bassin versant.

Les résultats ont permis d'avoir des perspectives encourageantes pour la suite des travaux. Ainsi, une modélisation hydrogéologique par une autre méthode est nécessaire pour déterminer la direction de l'écoulement et la disponibilité en eaux souterraines du bassin versant de Soavina.

Références bibliographiques

- Atillo F., 2015. Détermination de Bassin versant d'un territoire, préparer un MNT corrigé pour l'hydrologie.
- Belhadj-Aissa A., et Smara Y., 2010. Mise en évidence des phénomènes hydriques sur le piémont sud de l'Atlas saharien algérien à l'aide de la télédétection satellitaire. 10p.

- Bentekhici N., 2006. Utilisation d'un SIG pour l'évaluation des caractéristiques physiques d'un Bassin versant et leurs influences sur l'écoulement des eaux (Bassin versant d'Oued El Maleh, Nord-Ouest d'Algérie).
- Bouanani A., 2012. Hydrologie, transport solide et modélisation - Etude de quelques sous-bassins versants de la Tafna (NW-Algérie), p13-40.
- Boulghobra N., 2006. Protection de la wilaya de sikkida contre les inondations. 179p.
- El Hadani D., 1997. Télédétection et système d'information géographique pour la gestion et la recherche de l'eau. p197-204.
- Falza H. et al., 2009. Simulation de comportement des écoulements d'eau en utilisant les réseaux hydrographiques d'un bassin versant, cas de l'Oued Benimessous, Algérie. p180-190.
- Fossey M., 2008. Etude hydrologique dans le Pacifique - Première étape d'une modélisation sous SIG. Rapport technique IDR.
- Georges G. et al., 2004. Gestion intégrée de l'eau par bassin versant - Concept et application. 55p.
- Hafida Bouacouda et al., 2013. Apport de la télédétection et des SIG pour la recherche hydrogéologique dans la région du Sahel central des Doukkala (Maroc occidental). p205- 213.
- Kanohin F. O., et al., 2012. Apport de la télédétection et du SIG dans l'identification des ressources en eau souterraine dans la région de Daoukro (Centre-Est de la Côte d'Ivoire), Vol. 1 No. 1, pp. 35-53.
- Koffi A. S. et al., 2013. Extraction par télédétection des réseaux de fractures majeures à partir de l'image Landsat de la région d'Abidjan en Côte d'Ivoire, publication au Science Lib Editions Merseane : Volume 5, 16p.
- Koffi T. Y. et al., 2014. Rôle hydrogéologique des linéaments structuraux en milieu cristallin et cristallophyllien - Cas du Bassin versant du Sassandra, Sud-Ouest Côte d'Ivoire. p78-92.
- Ngustora M., 1995. Système d'information géographique et gestion de ressources en eau d'un bassin versant africain - Cas du bassin versant du Massili au Burkina Faso. p1-7.
- PNUE/PAM, 2000. Directives pour la gestion de programmes de contrôles d'érosion et de désertification, plus particulièrement destinées aux zones côtières méditerranéennes.
- Rambert B., 1973. Recherche sur la signification hydrogéologique de la densité de drainage : Application à la détermination et à la cartographie de l'écoulement souterrain. p4-20.
- Randrianasolo B., 2009. Nouvelles méthodes de cartographie du socle protérozoïque du Sud de Madagascar. Nature et géométrie de la croûte continentale d'un domaine orogénique en convergence, implications économiques. p70-84.
- Rasolofonilaina J.D., 2012. Schéma Directeur de l'eau et de l'Assainissement de l'Agence de Centre Ouest, p22-101.
- Savane Issiaka et al., 2003. Evaluation des ressources en eau dans le socle par l'étude des fractures à l'aide des données Landsat dans le bassin d'Odienné. p279-288.
- Sébastien R. 2013. Apport de l'imagerie satellitaire pour la recherche d'indices de drainage superficiels. Elevation data for geographic information system analysis, p1594-1600.

PARTICULARITES DU GITE D'OXYDE DE FER D'AMBOHIDRANANDRIANA, ANTSTRABE

Aurélien MANDIMBIHARISON¹

1- Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Mention
Génie Géologique, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar. raory@yahoo.fr

Résumé

Tongarivo, une petite localité au sein de la Commune Rurale d'Ambohidranandriana, a fait l'objet d'une exploitation artisanale de l'or depuis 1911. L'or de Tongarivo est une minéralisation primaire située dans des veines de quartz encaissées dans des quartzites à oxydes de fer. Certes, ces quartzites à oxydes de fer ne présentent que peu d'intérêt sur le plan économique, vue sa faible taille et teneur en fer mais ses caractéristiques : aspects lités (alternance des lits clairs ; quartz et des lits sombres riches en fer), débit en fines plaquettes rappellent celles des gisements des BIF (*Banded Iron Formation*). A part ces caractéristiques, l'existence de roche carbonatée dans la zone d'étude et la proximité du massif Ibity de formation SQC (Schisto- Quartzo- Carbonatée) d'âge Protérozoïque, font des quartzites à oxydes de fer de Tongarivo du type Lac Supérieur.

Mots clés : Tongarivo, BIF, quartzites, oxyde de fer, Lac Supérieur.

1. INTRODUCTION

Beaucoup de gîtes et d'indices de fer ont fait l'objet des études à Madagascar mais la plupart ne renferme que moins de 35% de teneur en fer et de petites tailles.

La figure 1, issue des travaux du PRGM en 2012, représente les zones à indices et celles qui sont favorables pour une exploitation de fer.

Dans la notice explicative de la carte géologique à échelle 1/1 000 000 établie par le PRGM en 2012, de nombreux auteurs ont conclu que la majeure partie des minéralisations en fer à Madagascar se trouve dans le groupe de Vondrozo et du type BIF. Le tableau 1 récapitule les différentes caractéristiques des gîtes connus à Madagascar.

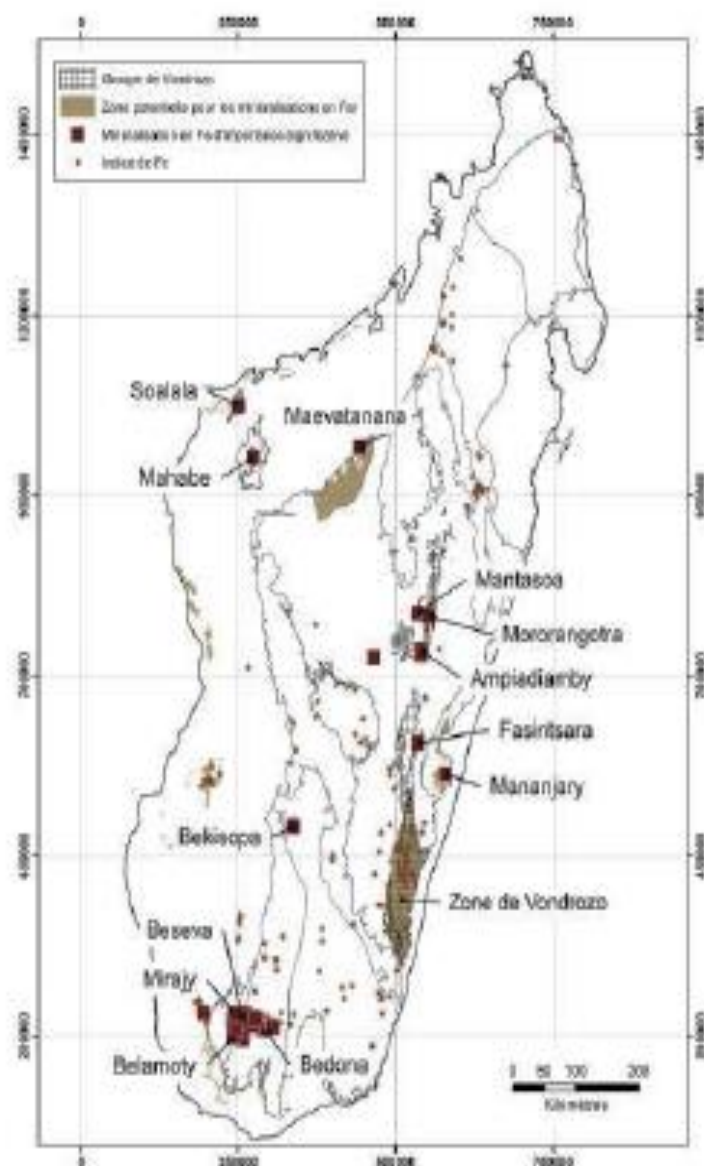


Figure 1 : Carte des indices et du potentiel en fer à Madagascar (PGRM, 2012)

Tableau 1 : Caractéristiques des principaux gisements et gîtes de minerai de fer à Madagascar

Nom du gîte	Substances	Minéraux caractéristiques	Morphologie	Direction générale minéralisation	Roches encaissantes		Données économiques		Type (d'après notice explicative PGRM 2012)
					Age	Nature	Tonnage métal (Mt)	Teneur (%)	
Solalala	Fe	Magnétite Hématite	Banc	NS	Archéen	Quartzite	360	35	Fe-Algoma ou Fe-Superior (Cannon, 1986 a et b)
Betioky	Fe	Limonite Stépnosidérite	Couche		Sénonien Néogène	Grès ferrugineux	30 130	24 10 à 14	Cuirasse ferrugineuse
Bekisopa	Fe	Magnétite	Banc	N 150 à NS	Protérozoïque	Gneiss	10 130	60 10 à 14	Métasomatique skarnoïde (Fournié, 1986)

									1963)
Fazintara	Fe	Magnétite	Banc	N 25 / 60°W	Archéen	Quartzite	100	35	Fe-Superior (Cannon, 1986a et b)
Fenoarivo Mananjary	Fe, Au	Magnétite Hématite Or	Banc	N 135 / 40 E	Catarchéen	Quartzite	94,5	37,7	Itabirite (BIF)
Ambohi-mahavony Ampadiamby	Fe	Magnétite	Banc	NW-SE à N-S	Archéen	Quartzite	30	60	Fe-Superior (Cannon, 1986a et b)
Ambatovy Analamay	Fe, Ni, Co	Limonite Stilpnosidérite	Cuirasse	Horizontale	Céttacé	Péridotite	30	46	Cuirasse ferrugineuse sur latérites nickelières

(Source : Rahajarivelo Sophie, 2015)

Une localité, où une société de cimenterie exploite des oxydes de fer comme ajout, attire notre attention car en plus de cette substance de l'or a été découvert et exploité dans cette zone depuis 1911. Elle ne figure pas dans le tableau 1, sûrement à cause de sa très petite taille, mais possède un grand intérêt scientifique.

II. METHODOLOGIE

L'organigramme représenté par la figure 2 résume la méthodologie adoptée.

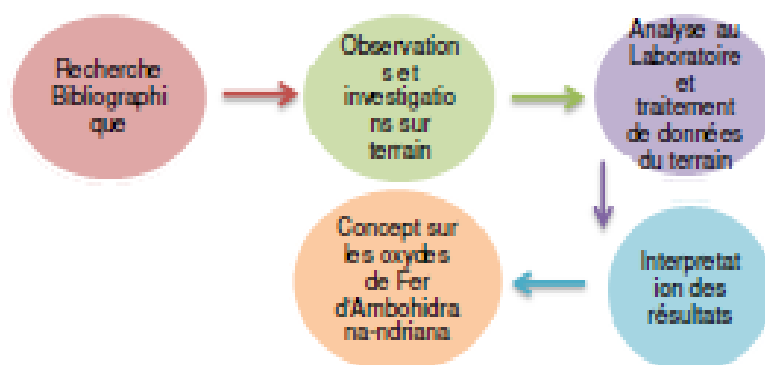


Figure 2 : Les démarches méthodologiques

II.1. Généralités sur les BIF

La plupart des minerais de fer dans le monde est constituée des fers rubanés (*Banded Iron Formation* ou BIF, en anglais) de formations sédimentaires marines qui sont tous d'âge archéen ou protérozoïque inférieur. La figure 3 montre l'importance relative des BIF au cours du temps.

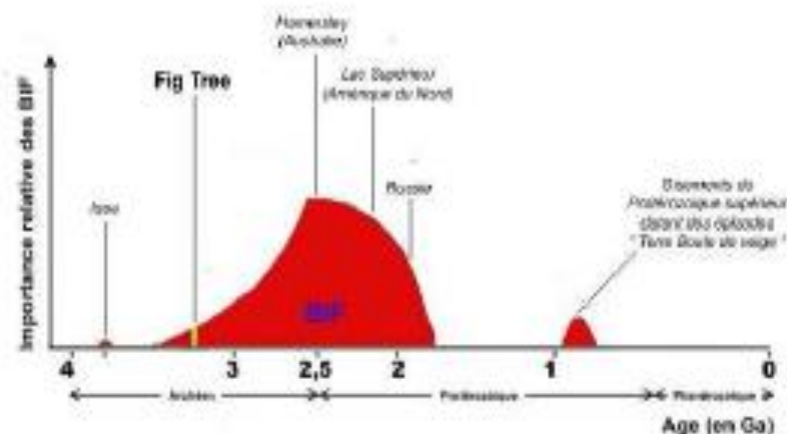


Figure 3 : Evolution de l'importance relative des BIF au cours des temps géologiques

Les gisements de fer rubané ou BIF représentent la plus importante ressource en fer de la planète puisqu'ils constituent 80 % des réserves. La figure 4 montre la répartition de ces gisements dans l'espace.

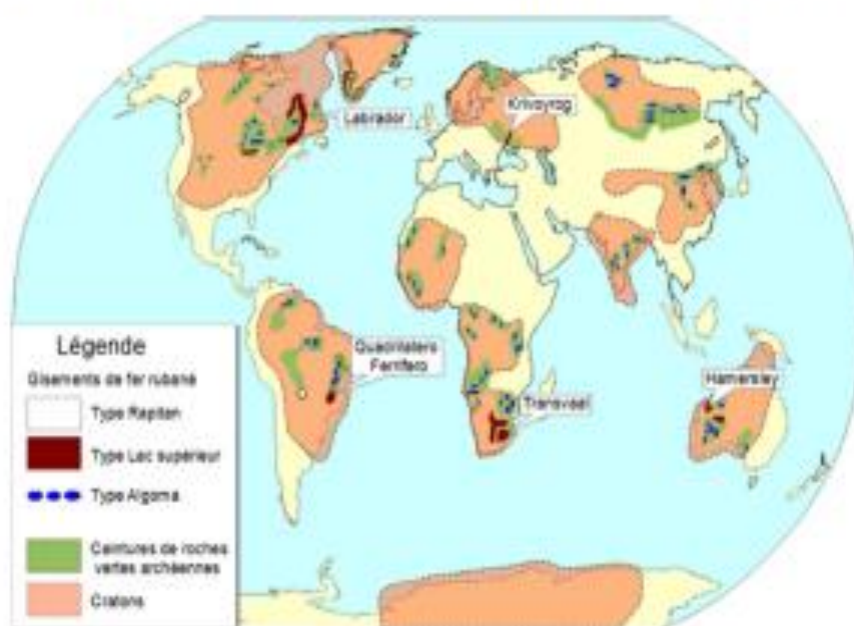


Figure 4 : Répartition géographique des gisements de fer rubané (Beulles et al. 2008).

Les gisements de fer rubané (BIF) sont de 3 types (Figure 5) :

- Le type *Algoma* est toujours associé aux ceintures de roches vertes de l'Archéen. Ces gisements sont les plus anciens, les plus nombreux mais de plus petite taille que le type suivant ;
- Le type *Lac supérieur* est associé au talus continental des cratons. Les gisements sont de très grande taille mais peu nombreux. Ils existent de -3 Ga à -2 Ga ;
- Le type *Rapitan* se dépose aussi sur le talus continental des cratons mais les conditions de formation sont différentes du type précédent. Ils sont rares et liés aux glaciations de la fin du

Précambrien.

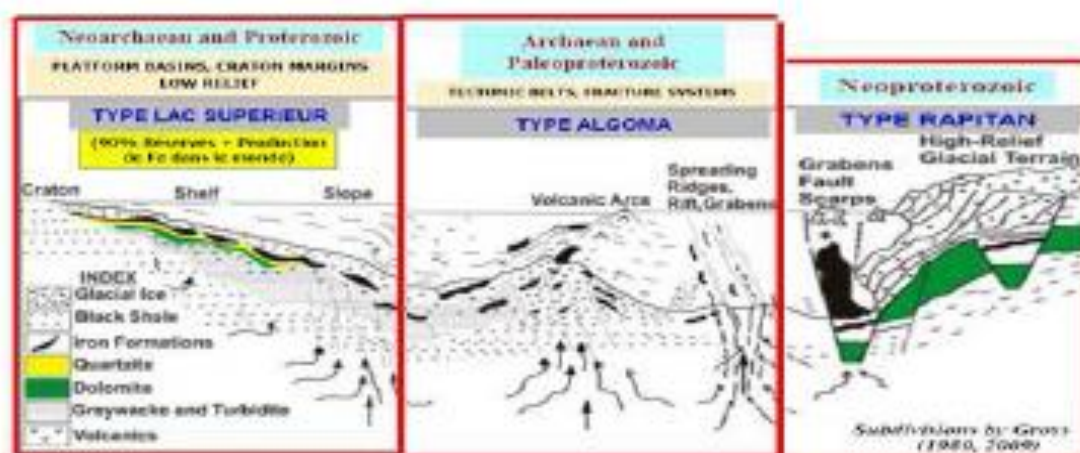


Figure 5 : Contexte géotectonique des trois types de gisements BIF

II.2. Sitologie

La zone d'étude, la Commune Rurale d'Ambohidranandriana appartient au District d'Antsirabe II, Région Vakinankaratra. Elle est limitée au Nord par la commune Rurale d'Ambohimiarivo, à l'Est par la Commune Rurale de Soanindrariny, au Sud par la Commune Rurale d'Ambohitsimanova et à l'Ouest par la Commune Urbaine d'Antsirabe (Figure 6).



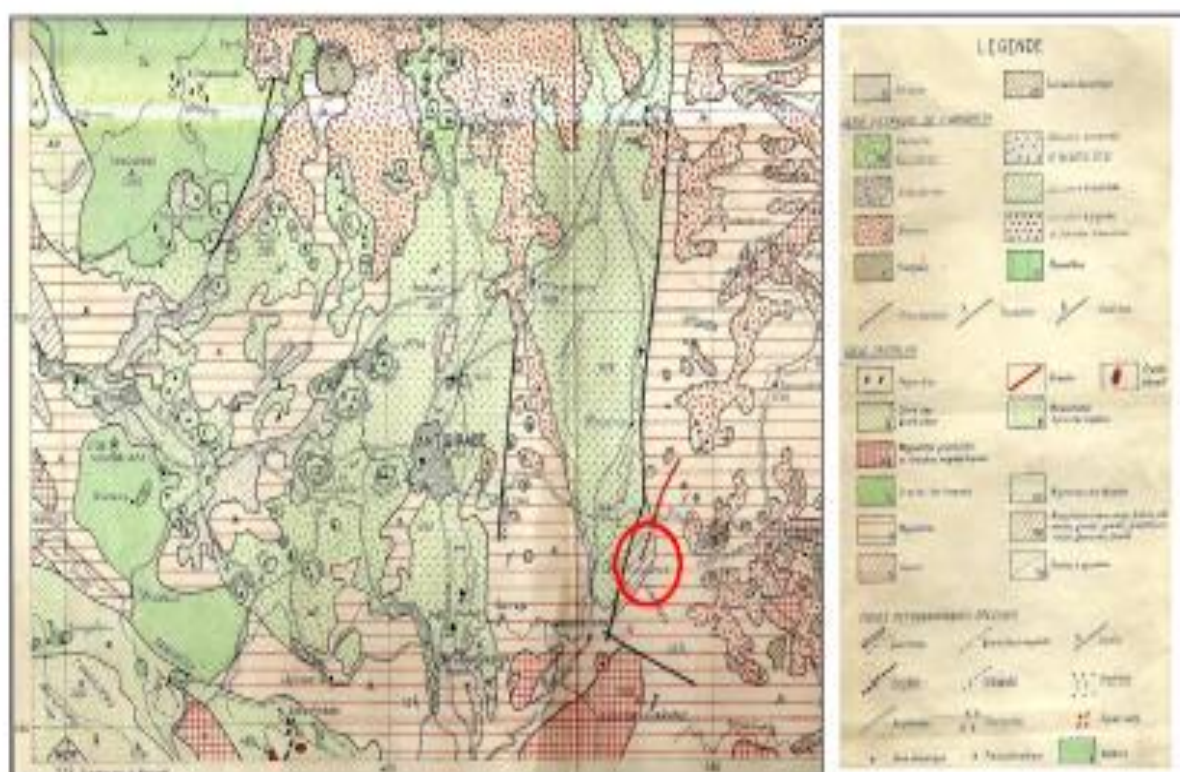
Figure 6 : Position de la Commune Rurale d'Ambohidranandriana par rapport aux Districts d'Antsirabe I et Antsirabe II

La morphologie de la zone de la Commune est en général divisée en deux : la basse colline à l'Ouest et la haute colline à l'Est (Figure 7). La basse colline est constituée d'une vaste pénéplaine et d'une plaine rizicole ; par contre la partie orientale est dominée par des versants abrupts. Le massif de l'Angavo y culmine avec une altitude de 1918m (Figure 8).



II.3. Contexte géologique régionale

La Région du Vakinankaratra, à laquelle appartient la Commune Rurale d'Ambohidranandriana, fait partie géologiquement du domaine d'Antananarivo et constituée par trois ensembles : le socle précambrien, les formations volcaniques et les sédiments lacustres. La Figure 9 illustre les différentes formations aux environs d'Antsirabe et de Betafo.



Le socle cristallin précambrien de Vakinkankaratra est formé par le complexe de roches cristallophylliennes ou paragneissiques, marqué par des micaschistes, des migmatites schisteuses et gneiss renfermant du graphite ainsi que des bancs de quartzites. Sur ce substratum se sont épanchées des coulées volcaniques allant du tertiaire au quaternaire récent marquées par quatre phases d'éruption différentes. L'ordre de superposition et la situation respective des coulées et des appareils volcaniques, leur fraîcheur, permettent de définir leur ordre chronologique selon le tableau 2.

Tableau 2 : Ordre chronologique d'émission des roches volcaniques
(Source : Rahajarivelo, 2015)

	Age	Roches émises
Série supérieure	Quaternaire subactuelle	Basanitoïde, basanite
	Pliocène	Ankaratrîte, basalte
	Pliocène supérieur	Basalte, andésite
	Pliocène moyen	Trachyte, trachyphonolite
Série inférieure	Pliocène inférieur	Trachyte, andésite, rhyolite

Ces épanchements volcaniques barrent certaines vallées et modifient l'écoulement normal de certains réseaux hydrographiques en formant des lacs qui par la suite se sont comblés par des sédiments dits « dépôts lacustres ». Le bassin d'Antsirabe est formé par des sédiments néogènes au quaternaire avec des conglomérats à galets trachytiques, des argiles et des cinérites.

II.4. Investigations sur terrain

Elles consistent à des travaux de reconnaissance et d'emplacement des points de sondage, suivis du creusement des puits de forme rectangulaire ou circulaire (Figure 10) et la profondeur maximale atteinte (jusqu'à la roche mère altérée de couleur rose ou rouge) est de 7 mètres.



Figure 10 : Les différentes formes du puits

Un lever géophysique (méthode du panneau électrique) a été aussi effectué permettant à la fois une investigation verticale et latérale du sous-sol. Cette méthode donne en même temps les modèles 2D de résistivité et chargeabilité ainsi que le profil. Les différents matériels utilisés avec ses accessoires sont représentés par la Figure 11.



Figure 11 : L'appareil résistivimètre Syscal 1 et ses accessoires

Trois panneaux ont été mis en œuvre selon le dispositif Wenner, ils recoupent la direction du quartzite à oxyde de fer qui est de N160. La longueur de chaque panneau est de 96 mètres.

III.-RESULTATS

III.1. Les formations géologiques de la zone d'étude

La Commune Rurale d'Ambohidranandriana se trouve dans le domaine d'Antananarivo. Différentes formations géologiques y sont rencontrées telles que les roches métamorphiques, magmatiques plutonique et volcanique ainsi que les sédiments récents.

III.1.1. Les roches métamorphiques

La partie orientale de la Commune où domine le massif d'Angavo est composé essentiellement par des roches migmatitiques (Figure 12) avec quelques intercalations de gneiss à graphite.



Figure 12 : Massif migmatitique d'Angavo

Au pied du massif d'Angavo, sur une basse colline se trouve deux types de quartzites :

- Les quartzites à oxyde de fer

Ces quartzites se situent à un endroit de taille très réduite en forme de lentille de 77 mètres de large et 250 mètres de long en affleurement suivant une direction générale de N 160. Ces quartzites sont lités avec alternance de lits sombres riches en oxyde de fer et de lits clairs riches en quartz et se débitent en plaquettes (quartzites en plaquettes figure 13) en surface.



Figure 13 : Quartzite en plaquette de direction N160

Sur le flanc nord-ouest à pente faible de cette basse colline se trouvent des encroûtements en cuirasse ferrugineuse sous forme de concrétions (Figure 14). Ces dernières ont un aspect très dur et consolidé (Figure 15).



Figure 14: Cuirasses ferrugineuses sur le flanc d'une colline



Figure 15 : Concrétion à aspect dur

Deux types de veines de quartz aurifères sont encaissés dans les quartzites à oxyde de fer : les veines concordantes au rubanement des quartzites (interstratifiées) qui sont minéralisées et les veines sécantes non minéralisées.

- *Les quartzites blancs*

A l'Est de Tongarivo, au pied des migmatites de l'Angavo se dressent trois lentilles alignées de quartzites blancs de plus grandes tailles par rapport aux précédents (entre 150 et 300 mètres).

Des micaschistes constituent les encaissants des quartzites au niveau de la basse colline et dans certains endroits ils sont intercalés dans les migmatites. La direction générale de foliation de ces micaschistes est comprise entre N 160 à N 185, de pendage comprise entre 45° à 85° SW. Leur couleur varie du rouge-pourpre à rose.

Un banc d'amphibolite de direction N 160, d'une longueur d'environ 30m et 6m de large, intercalé dans la formation micaschisteuse, affleure en surface au point de coordonnées X = 473 358 m et Y = 687 626 m.

III.1.2. Les roches magmatiques

Des petits dômes de granites intrusifs sont recensés le long de la route vers Vontovorona et à Tongarivo ces granites renferment des gros cristaux de feldspath (Figure 16).



Figure 16 : Un petit dôme de granite pegmatitique

De nombreuses formations volcaniques se trouvent dans et aux environs de la Commune Rurale d'Ambohidranandriana, d'autres sont sous forme d'orge (Figure 17a), certains s'altèrent sous forme de rognons (Figure 17b) tandis que certains cônes volcaniques sont encore conservés comme le piton volcanique de Vontovorona (Figure 17c).



Figure 17 : Les différentes formations volcaniques ; a) sous forme d'orge ; b) sous forme de rognon ; c) sous forme de piton volcanique de Vontovorona

III.1.3. Les sédiments récents

Des *sédiments lacustres* du bassin d'Antsirabe affluent au Nord de la Commune Rurale d'Ambohidranandriana, au pied de la formation migmatitique. Ils constituent des sols fertiles aménagés en champ de culture (Figure 18).



Figure 18 : Sédiments lacustres au pied de la faille d'escarpement de Manandona.

Les *alluvions* s'observent le long des cours d'eau et forment de vastes plaines rizicoles (Figure 19).



Figure 19 : Plaine rizicole d'Ambohidranandriana

Les différentes formations géologiques observées sont synthétisées par la carte géologique représentée par la Figure 20.

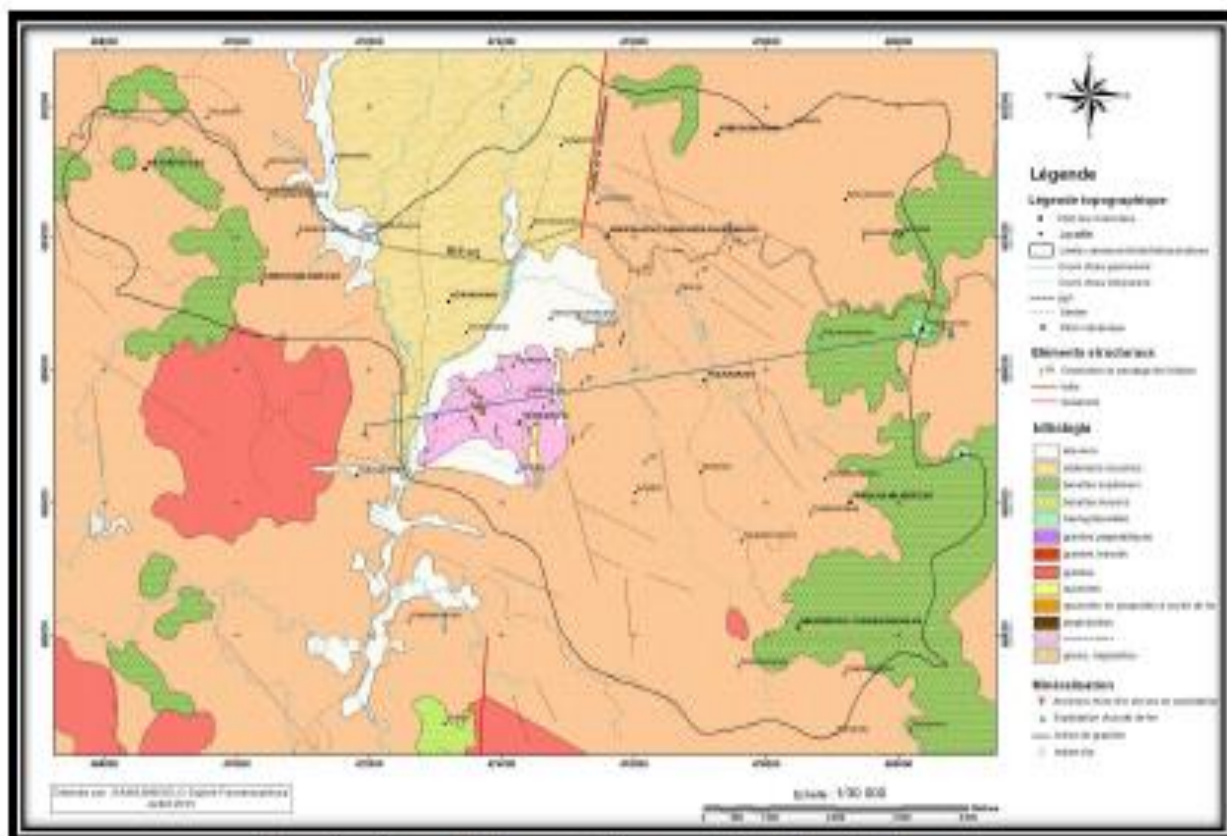


Figure 20 . Carte géologique de la Commune Rurale d'Antsahidrandrandra (Rahajavelo Sophie, 2015)

III.2. Résultats des données géophysiques

Trois profils géophysiques ont été réalisés sur le flanc Nord de la colline de Tongarivo, ils sont de direction Est-Ouest presque parallèles. Le tableau 3 décrit les coordonnées de chaque panneau.

Tableau 3 : Position des trois profils géophysiques

Panneau	Bout Est	Centre	Bout Ouest
Panneau N°1	X= 473 711	X= 473 666	X= 473 622
Direction(E-W)	Y= 687 553 Z= 1614	Y= 687 542 Z= 1618	Y= 687 532 Z= 1616
Panneau N°2	X= 473 711	X= 473 664	X= 473 620
Direction(E-W)	Y= 687 599 Z= 1611	Y= 687 590 Z= 1612	Y= 687 579 Z= 1609
Panneau N°3	X= 473 675	X= 473 634	X= 473 592
Direction(E-W)	Y= 687 653 Z= 1601	Y= 687 633 Z= 1605	Y= 687 617 Z= 1605

Les Figures 21,22 et 23 présentent les coupes géoélectriques des panneaux 1,2 et 3.

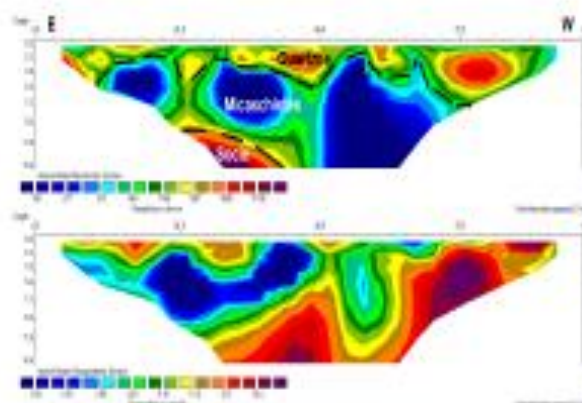


Figure 21 : Coupe géoélectrique du panneau N°1

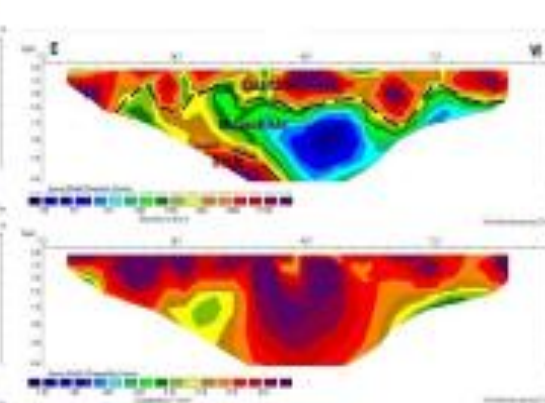


Figure 22 : Coupe géoélectrique du panneau N°2

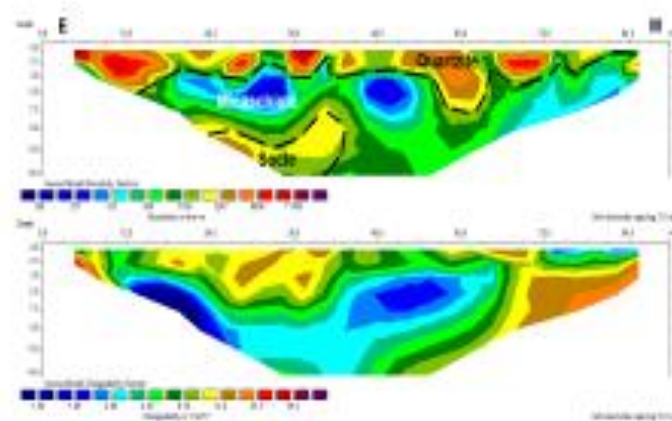


Figure 23 : Coupe géoélectrique du panneau N°3

De ces trois panneaux, trois formations géologiques sont à distinguer selon les valeurs de la résistivité électrique :

- Formation superficielle moyennement à fortement résistante (entre 1500 à 10000 Ω m) de couleur jaune à rouge sur le profil, correspondant aux quartzites à oxyde de fer ;
- Formation moyennement résistante (entre 150 à 1500 Ω m) représentée par les couleurs vert à bleu, renfermant une certaine quantité d'eau et correspondant à des micaschistes ;
- Formation très résistante (> 6000 Ω m) représentée par les couleurs rouge à violet correspondant à un socle migmatitique qui se situe à plus de 9 mètres de profondeur.

III.3. Résultats des analyses chimiques

47 échantillons prélevés dans des puits ont été analysés afin de définir : les teneurs des éléments majeurs en SiO_2 , Al_2O_3 , Fe_2O_3 , CaO , MgO . Les résultats de ces analyses sont représentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Résultats des analyses pour les échantillons prélevés

N° Puits	X	Y	Z(m)	Paf	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	Total
1	473661	687657	1604	11,33	51,92	24,39	10,75	0,00	0,48	98,87
2	473600	687740	1597	1,54	66,60	3,02	28,22	0,00	0,60	99,97
3	473660	687564	1614	10,25	74,81	8,37	6,10	0,25	0,18	99,95
4	473713	687500	1636	1,39	25,98	6,10	62,09	0,00	0,60	96,16
5	473516	687750	1597	4,10	28,06	3,66	62,09	0,00	0,48	98,39
6	473429	687842	1583	1,69	27,78	3,05	64,48	0,00	0,48	97,48
7	473633	687841	1626	1,50	33,36	1,22	60,18	1,51	0,78	98,55
8	473463	687942	1581	1,60	67,68	1,52	25,07	1,68	1,99	99,54
9	473400	687873	1579	2,89	18,01	1,83	72,60	1,83	0,00	97,16
10	473487	687780	1591	3,75	27,78	5,34	60,90	1,51	0,60	99,88
11	473487	687842	1582	4,80	26,36	1,83	64,96	1,51	0,72	100,18
12	473603	687780	1583	12,63	46,68	13,72	23,88	0,34	0	97,25
13	473811	687586	1610	10,30	58,34	18,30	7,16	0,67	0,24	95,01
14	473574	687842	1583	9,20	55,26	15,25	9,55	1,34	2,65	93,25
15	473603	687657	1607	1,66	30,60	0,61	64,48	0,50	0,00	97,85
16	473830	687527	1618	11,20	49,59	24,00	14,10	0,83	0,28	99,98
17	473850	687685	1579	10,85	43,16	15,25	28,66	0,50	0,00	98,42

18	474017	687530	1601	12,74	40,22	24,4	21,49	0,34	0	99,19	
19	474206	687537	1591	13,05	44,86	24,39	9,55	0,00	0,36	92,21	
20	474356	687585	1594	7,97	65,07	16,35	9,30	0,82	0,35	99,86	
21	474313	687742	1582	8,38	62,88	17,53	9,55	0,00	0,00	98,34	
22	474141	687708	1577	13,71	40,72	19,82	21,97	0,00	0,36	96,58	
23	473860	687861	1580	11,28	48,20	22,87	16,	(Secam, 2015)			25
24	473747	687564	1609	9,63	44,24	15,24	26,27	0,5	0,24	96,12	
25	474750	687978	1583	13,24	47,92	25,92	9,55	0,00	0,30	96,93	
26	474803	687606	1595	2,80	63,26	3,05	31,04	0,00	0,54	100,69	
27	474241	687993	1588	15,71	40,28	27,45	14,33	0,84	0,28	98,89	
28	473632	687626	1610	11,07	42,60	21,35	21,50	0,00	0,00	96,52	
29	473602	687688	1601	12,49	51,52	25,01	10,5	0	0,36	99,88	
30	473574	687810	1581	10,06	49,74	25,92	9,55	1,34	0,24	96,85	
31	474132	688117	1569	14,84	43,44	27,45	11,94	0,16	0,24	98,07	
32	473935	688030	1565	12,77	50,38	19,82	11,94	0,67	0	95,58	
33	473751	688059	1564	11,69	48,78	25,35	14,32	0,5	0	100,64	
34	473662	687949	1572	12,21	47,32	21,34	16,71	0,34	0	97,92	
35	474233	688312	1569	14,3	47,58	25,92	10,75	0,67	0,36	99,58	
36	474433	687935	1581	10,49	55,39	24,01	9,40	0,49	0,24	100,01	
37	474383	687651	1594	0,70	91,78	2,44	1,40	1,84	0,72	98,88	
38	474068	687839	1583	2,55	16,14	3,05	77,60	0,00	0,00	99,34	
39	474081	687993	1571	4,70	12,84	1,52	76,42	0,00	0,00	95,48	
40	473681	688336	1566	12,80	19,72	13,72	51,34	0,00	0,00	97,58	
41	473681	688334	1563	15,56	9,28	9,15	59,71	0,00	0,00	93,70	
42	474187	687648	1601	3,67	54,22	2,29	29,85	0,00	0,00	90,03	
43	474134	687648	1596	0,05	96,24	0,23	0,95	0,00	0,50	97,97	
44	474184	687651	1593	2,40	73,58	1,52	14,32	0,00	0,30	92,12	
45	473868	688009	1567	4,76	78,58	0,92	13,13	0,00	0,00	97,39	
46	473681	688333	1562	7,31	17,88	13,07	52,72	1,63	2,56	95,17	
47	474129	687658	1597	1,80	24,58	6,10	65,68	0,00	0,00	98,16	

IV. INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS

IV.1. Interprétations

IV.1.1. Interprétation du lever géophysique

Du lever géophysique électrique on peut déterminer une succession de trois formations géologiques à Tongarivo à savoir :

Les quartzites : superficiels (2,5m de puissance en moyenne), moyennement résistants (1500 à 10000 Ω m), représentés en vert, jaune à rouge sur chaque coupe de résistivité. Les valeurs de chargeabilité de ces formations sont en général élevées. Le profil du milieu (CD) a montré qu'ils sont plus épais le long de ce profil (pouvant dépasser 4m de puissance) ;

Les micaschistes : en dessous du précédent, moyennement à très conducteurs (150 à 1500 Ω m) de couleur vert à bleu sur le profil de résistivité, avec une certaine humidité voire même d'eau à quelques endroits et une certaine teneur en argile dans d'autres d'après les profils de chargeabilité ;

Le socle migmatitique : à la base de chaque profil, en général sain, moyennement à hautement résistant par la suite (supérieure à 7000 Ω m), de couleur jaune à violet sur les coupes de résistivité. La Figure 24 illustre la forme géométrique des différentes couches.

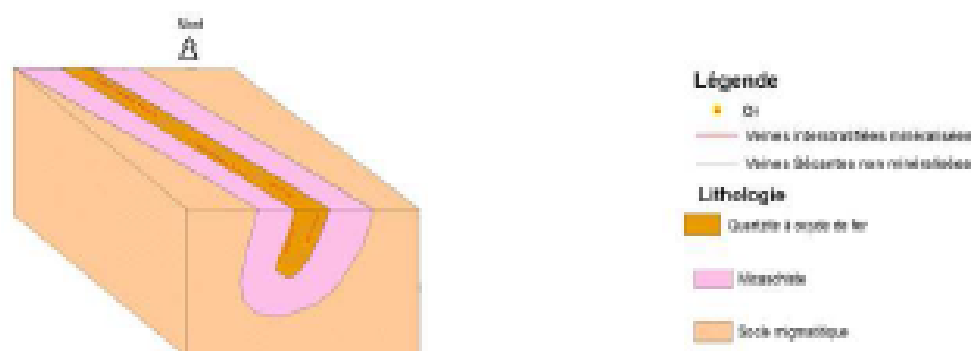


Figure 24 : Forme géométrique des différentes couches issues des profils tomographiques (Rahajarivelo, 2015)

IV.1.2. Interprétation des données d'analyses chimiques

A partir de XLSTAT on peut définir une matrice de corrélation entre les trois éléments majeurs (Tableau 5).

Tableau 5 : Matrice de corrélation (Pearson)

Variables	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
SiO ₂	1	0,021	-0,805
Al ₂ O ₃	0,021	1	-0,590
Fe ₂ O ₃	-0,805	-0,590	1

De ce tableau il ressort que les deux variables SiO₂ et Fe₂O₃ ont une très forte corrélation négative c'est-à-dire que lorsque la teneur en SiO₂ augmente, celle de Fe₂O₃ diminue. Les deux histogrammes (Figure 25) vérifient encore cette corrélation négative.

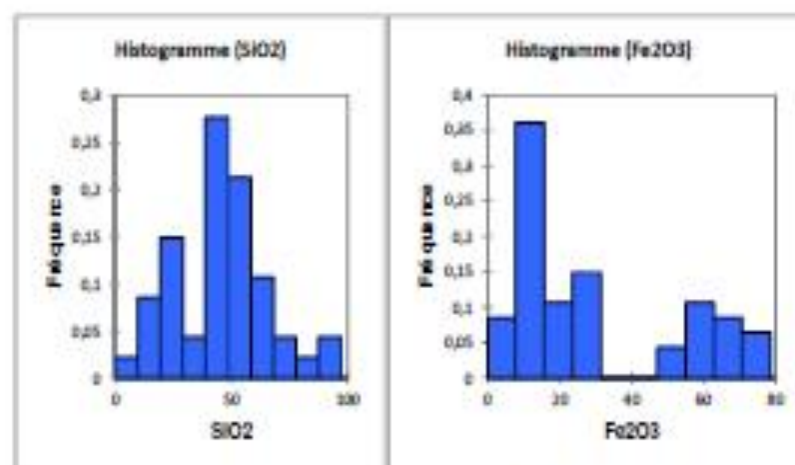


Figure 25 : Histogramme pour les deux variables SiO2 et Fe2O3

IV.2. Discussions



IV.2.1- Sur la minéralisation d'oxyde de fer de Tongarivo-Ambohidranandriana

Sur la carte géologique feuille N°08-Antananarivo au 1/500 000 du PGRM 2008, les formations géologiques de notre zone d'étude y sont cartographiées comme appartenant au Groupe de Vondrozo et que les quartzites à magnétite de ce groupe ont été interprétés par Bernard Moine en tant que BIF. Il a décrit que ce groupe est formé d'une séquence hétérogène de gneiss migmatitiques avec un fort rubanement migmatitique compositionnel (métatexite), des lentilles et des amas d'amphibolite, de schistes plus ou moins graphiteux et de quartzites à magnétite. Comme ces descriptions correspondent bien à nos observations sur terrain et pour renforcer l'hypothèse que les quartzites à oxyde de fer de Tongarivo sont des BIF nous allons les comparer avec le BIF de Mauritanie.

Le tableau 6 représente les quelques similitudes entre le BIF de Mauritanie et celui de Tongarivo

Tableau 6 : Comparaison entre les BIF de Mauritanie (Kedia d'Ijl) et de Madagascar (Tongarivo)

Caractéristiques	BIF de Kedia d'Ijl (Mauritanie)		BIF de Tongarivo (Madagascar)	
Formation	Formation quartzite-ferrugineuse		Quartzite à oxyde de fer	
Rubanement	alternance de lits : de silice pure et d'un mélange de silice et d'hématite		alternance de couches riche en oxyde fer et de couches riches en quartz	

Type d'affleurement	Empilement en plaquette		En plaquette	
---------------------	-------------------------	---	--------------	---

IV.2.2. Sur le modèle du BIF de Tongarivo

Comme les BIF sont reconnus d'origine marine et que la présence de dolomie dans les environs de la zone d'étude et la proximité d'Ibity, formation épicontinentale témoignent le passage de la mer.

La Figure 26 montre la variation latérale des faciès selon la profondeur :

Faciès oxydé vers l'extérieur (paléo-rivage) ;

Faciès sulfuré en profondeur ;

Faciès carbonaté en position intermédiaire.

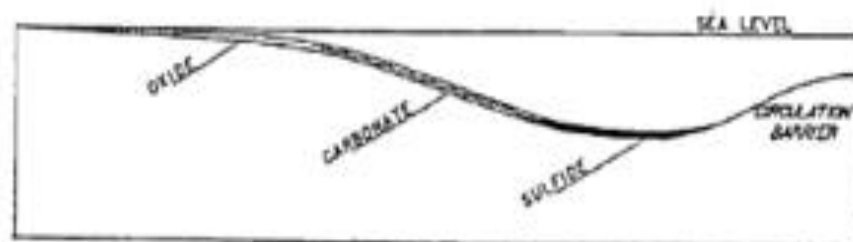


Figure 26: Schéma montrant l'enrichissement latéral en fer avec la diminution de la profondeur, dans un bassin isolé et profond (d'après James, 1954 in Elhadj, 2002).

Comme les quartzites à magnétite de Tongarivo appartiennent au groupe de Vondrozo dont l'âge de formation se situe entre 2,5 à 2,8 Ga et étant donné que les périodes de formation des BIF sont principalement Archéen (2,7-3,5 Ga) ; Paléoprotérozoïque (2,5-2,8 Ga) et Néoprotérozoïque (0,8Ga), la figure 27 montre l'emplacement du BIF de Tongarivo.

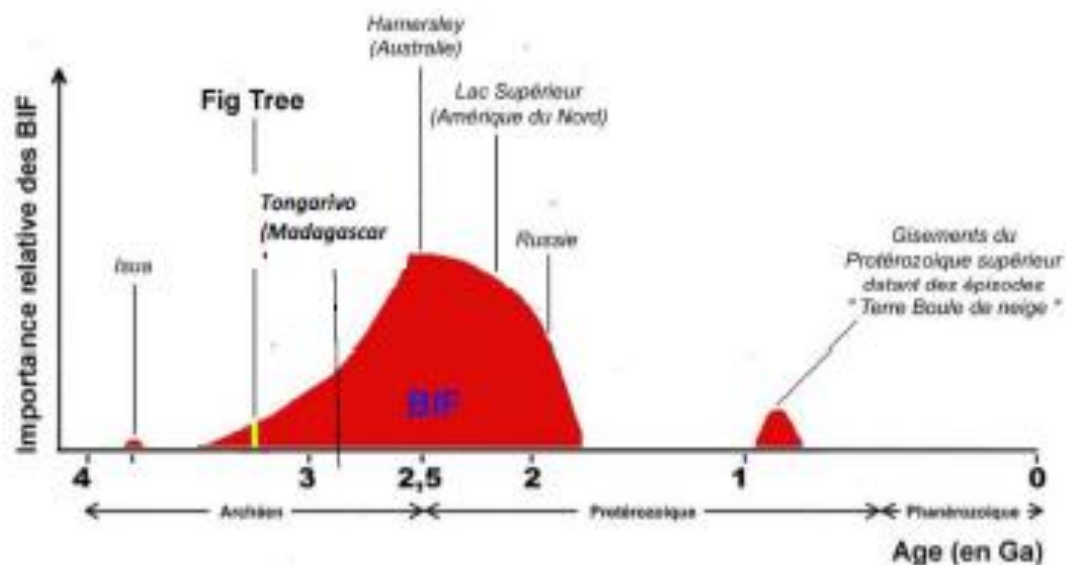


Figure 27 : Position du BIF de Tongarivo en fonction de l'âge.

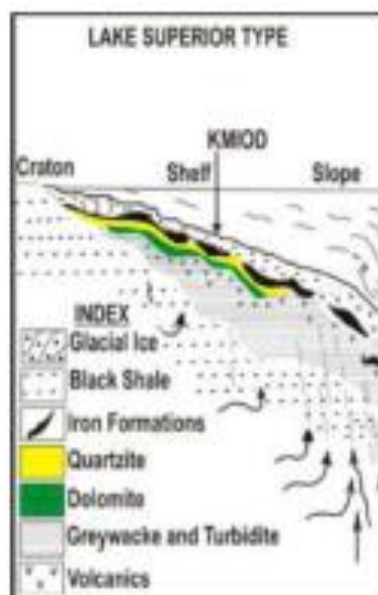


Figure 28 : Caractéristique d'un BIF type Lac Supérieur

Quelques contextes géotectoniques du BIF du type Lac Supérieur ont été observés dans le cas de Tongarivo :

- l'association du gîte à des sédiments ;
- le passage latéral à des carbonates (localement) ;
- l'environnement de plateforme (marge continentale) ;
- la présence d'un piton volcanique.

La figure 28 montre les différentes formations et caractéristiques d'un BIF type Lac Supérieur

Ces diverses informations (Figure 28) permettent de classer les quartzites de Tongarivo aux BIF type Lac Supérieur d'âge Paléoprotérozoïque (2,5-2,8 Ga) (Figure 27), associé non pas à des ceintures de roches vertes mais au talus continental des cratons et à faciès oxydé.

La Figure 29 illustre un schéma des environs du BIF de Tongarivo, du massif d'Ibity à l'Ouest jusqu'au phonolite de Vontovorona à l'Est.



Figure 29 : Coupe schématique des environs du BIF de Tongarivo

V. CONCLUSION

Les quartzites à oxyde de fer de Tongarivo, de petite taille (250mx 80m), est encaissée dans des micaschistes. Affleurer en surface sur le sommet d'une colline arrondie, ils se débitent en fines plaquettes de direction N160 et sur les versants ils se forment des encroulements ferrugineux. Des résultats des investigations et des observations aux environs du site permettent d'avancer l'hypothèse que les quartzites à oxyde de fer de Tongarivo sont du type Lac Supérieur de gisement BIF.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Besairie, H., 1962 : *Géologie économique de la préfecture d'Antsirabe*. Service géologique. pp 26-40
- Beukes et al., 2008 : *Origin and paleoenvironmental significance of major iron formations at the Archean-Paleoproterozoic boundary*. Rev. Econ. Geol 15, p5-47
- Boaka Akoul, M., 2018: *Gisements de fer et de Manganèse*. Edition PanAfGeo WP2 training
- Elwaleed, O. E. 2009 : *Etude d'un gisement type banded iron formations : gisement de F'Derik, Kedia D'Ijil (Province de Tiris-Mauritanie)*. Mémoire de Master Spécialisé - Ressources Minérales et Énergétiques : Genèse et Mise en Valeur. Université Moulay Ismail. 64 pages
- PGRM, 2008 : *Revision de la cartographie géologique et minière des zones Nord et Centre de Madagascar*. République de Madagascar, Ministère de l'Energie et des Mines. 1049 pages
- PGRM, 2012 : *Cartes géologique et métallogéniques de la République de Madagascar à 1/1 000 000 - Notice explicative*. Bureau du Projet de Gouvernance des Ressources Minérales de Madagascar. 263 pages

Rahajarivelo S., 2015 : *Monographie de la minéralisation ferrifère et aurifère de Tongarivo, Commune Rurale d'Ambohidranandriana, District d'Antsirabe II*. Mémoire de Master Génie Géologique à l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo. 84 pages

Secam, 2015 : *Rapport des travaux géologiques de gisement d'oxyde de fer à Ambohidranandriana*. Rapport inédit

Programme du Colloque pour les 130ans de l'IOGA
GEOSCIENCES : RESSOURCES, RISQUES ET TECHNOLOGIES

JOUR 1

26-sept-19

- 08:30 Arrivée et inscription des participants
 08:45 Arrivée des invités
 09:15 Arrivée des officiels
Ouverture du colloque
 09:30 Discours de Monsieur le Directeur de l'IOGA;
 Discours de Monsieur le Président de l'Université d'Antananarivo
 09:45 Discours d'ouverture de Mme le Ministre de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique
 10:00 Historique IOGA
 10:15 Cocktail
 10:45 **Session Poster 1** Les auteurs des posters sont priés de rester auprès de leurs posters;

Salle A			Salle B		
Session 1: Sol.		Président de session: Prof. Rakotoniana Secrétaires de session : Onja + Fara	Session 2 : Climat et atmosphère.		Président de session: Prof. Ratsimbazafy Secrétaires de session : Patricia + Rina
11:15	Aude Chambodut	Applications du géomagnétisme: du noyau terrestre à la magnétosphère - de la navigation à la météorologie spatiale	Blanc Elisabeth	Les phénomènes intenses de l'atmosphère et leurs conséquences	
11:45	RAMIFEHIARIVO Nandrianina	Cartographies du carbone du sol à Madagascar	ANDRIANAIVOARISOA Jean Bernardo	Seismic and Infrasonic monitoring of Tropical Cyclones surrounding the South-Western Indian Ocean	
12:00	RASOAMAMPIAÏNA Virginie	Contamination par les métaux lourds des sols agricoles dans la ville d'Antananarivo et des plantes maraîchères issues de ces sols	LAMY Kevin	Réseau UV-Indien	
12:15	RASOARIMANANA Honorine	Paramètres géochimiques et écologiques d'aménagement du territoire : cas de la zone urbaine et suburbaine de Fianarantsoa.	AGBAMARO Mayébinasso	Effets climatiques et problèmes d'accès aux centres de santé dans la préfecture de KENDJAL (NORD-EST DU TOGO)	
12:30	RAZANAMAHANDRY Vao Fenotiana	Variations des propriétés du sol le long de pente des collines dans la région du lac Alaotra, Madagascar	MADJITOLLOUM Moyangar	Changement climatique et développement durable au en Afrique sahélienne : Cas du Tchad	
12:45	ABUI Gbêhidé Akouvi	De la communication à l'adoption de comportements responsables par les consommateurs : le rôle de l'orientation écologique	SOILHI Mohamed	Variabilité Climatique et Indice de Changement Climatique dans la ville d'Antananarivo-Madagascar	
13:00	RAKOTONINDRIÏNA Hobimiarantsoa Nantenaina	Prediction of soil oxalate phosphorus content using visible and near-infrared spectroscopy : Application to Malagasy agro-ecosystem and paddy soils.			
13:15	Déjeuner				

Session Poster 2			Les auteurs des posters sont priés de rester auprès de leurs posters;		
Session 3: Etat de surface, végétation, risque		Président de session: Prof. Rakotoniana; Secrétaires de session : Onja+Kanto	Session 4: Sous-sol et exploitation du sous-sol		Président de session: Prof. Rasolomanana Secrétaires de session : Patricia +Herizo
14:15	RAKOTOMALALA Fety Abel	Mesure et suivi de la dégradation et régénération forestière par télédétection dans l'écorégion des forêts humides de l'Est Madagascar	RANDRIANANTENAINA Hervé Gilbert	Répartition, Description et Conservation des restes d'ossements d'Hippopotamus d'Anjohibe, Mahajanga, Madagascar.	
14:30	RAKOTOVAO Lova James	Aperçu et Applicabilité des approches méthodologiques utilisées pour l'analyse de fuite de pression anthropique des offsets d'Ambatovy	VOARINTSOA Ny Riavo G.	Geological archives recording environmental and climate changes in the past in NW Madagascar	
14:45	ANWAR Maeva	Estimation de la biomasse aérienne de la forêt de la grande Comore à partir des données lidar du satellite ICESAT-2	RAKOTONDRAIBE H.Miora	Cartographie des indices de minéralisations du phlogopite du sud de Madagascar par analyse et	
15:00	ANDRIAMANALINA Roger Luc	Evaluation des moteurs de déforestation par l'analyse de co-inertie	MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques	Contexte géomorphologique des géomatériaux et leurs caractéristiques géomécaniques dans les environs du Campus Vontovorona.	
15:15	MONTADE Vincent	Etude de la dynamique des forêts tropicales humides et changements paléoclimatiques à Madagascar	ROBIAONA RAHELIVOLONIINA Baholy	Optimisation de la minéralisation du clinker de la Cimenterie d'Ibity en verre	
Session 5: Etat de surface, végétation, risque		Président de session: Prof. Razanaka Secrétaires de session : Onja+Fitiavana	Session 6: Sous-sol et exploitation du sous-sol		Président de session: Dr HDR Rakoto Secrétaires de session : Patricia +Jaona
15:30	RIERA Bernard	Usage des images Sentinel1 pour la caractérisation des formations végétales : le cas de deux espèces de savane : Acridocarpus excelsus et Terminalia mantaly, à Antrema (Madagascar).	RAZAFINDRAKOTO Boni Gauthier	Caractérisation et estimation volumétrique des roches d'empierrement par prospection électrique de la carrière au PK88 de la RNS43 Faratsiho	
15:45	RANAIVOSOA Rija	Modélisation spatiale de l'état d'évolution du stock de bois sur pied	RAKOTONDRAIBE Nicolas Jacques	Utilisation du phonolite de VONTOVORONA à SOANINDRANINY comme fondant et dans d'autre domaine agriculture, génie civil et céramiques	
16:00	RAVELOARISOA Tsilaviniana Victorien	Comptabilité écosystémique du capital naturel : cas de compte carbone de la forêt sèche de la NAP Complexe Mahavavy Kinkony-Région Boeny	RAKOTONDRAFARA PARANY Rowlands	Construction routière dans les zones compressibles, investigations géotechniques approfondies et recherches de solutions durables : cas de la digue de Fontsimaro sur la RNS 5 entre Mananara Nord et	
16:15	ANDRIAMADIA Mevasoa Martine	Evaluation d'état du changement du capital naturel de Bombetoka à partir de la comptabilité écosystémique (2007-2017)	NDONGO Alexis	Nouvelles données sur les gisements de manganèse du bassin de Franceville : exemple du plateau de Bignoni (Gabon).	
16:30	ALEXANDRE Cyprien	Utilisation du CVA3d pour la détection et la caractérisation du changement post-cyclone dans le Sud-Ouest de l'océan Indien à partir d'Images Sentinel 2	ANDRIAMADY Andry Toky	Etude expérimentale du champ de vitesse et du phénomène de triage dans un sluice	

CONTEXTE GÉOMORPHOLOGIQUE DES GÉOMATÉRIAUX ET LEURS CARACTÉRISTIQUES GÉOMÉCANIQUES DANS LES ENVIRONS DU CAMPUS VONTOVORONA

MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques¹,

¹ Département de Géologie, ESPA, Université d'Antananarivo, BP 1500, Antananarivo 101,
e-mail : raory@yahoo.fr

Résumé :

L'habitat dans la périphérie de la ville d'Antananarivo ne cesse de s'épanouir et l'agglomération dans les environs du Campus universitaire de Vontovorona n'est pas en reste.

Cette extension et aménagement nécessitent l'existence et l'exploitation des quantités importantes des matériaux de construction dénommés « géomatériaux ».

La question qui se pose, y en a-t-il assez dans les environs de Vontovorona et quelles sont leurs caractéristiques physiques, chimiques et géotechniques ?

Dans cette étude seront décrits la définition du géomatériau, l'inventaire dans le site étudié et la description de leurs propriétés à partir des essais et analyses au laboratoire.

Enfin l'utilisation de la géomatique est nécessaire pour les localiser et les valoriser selon leur importance. Cet outil aussi permet la création des cartes thématiques relatives aux diversités géologiques ou géodiversité.

Mots clés : géomatériau, géotechnique, géodiversité, géomatique, Vontovorona.

Abstract-

The habitat on the periphery of the city of Antananarivo is not interrupted and the agglomeration around of the University Campus Vontovorona is not far behind.

This extension and the development of the rounding and immobilization of building materials called "geomaterials". The question is, are there enough in the around of Vontovorona and what are their physical, chemical and geotechnical characteristics?

In this study, we will study the definition of geomaterial, the inventory in the studied site and the description of their properties from the tests and analyzes in the laboratory.

Finally, the use of geomatics is necessary to locate and value according to their importance. This tool also allows the creation of thematic maps relating to geological or geological diversities.

Key words: geomaterial, geotechnical, geodiversity, geomatics, Vontovorona.

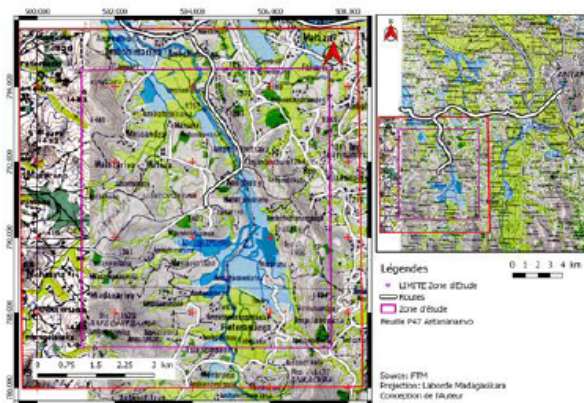


Figure 2 : Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude comporte plusieurs formations géologiques (Figure 3):

- A l'Ouest de la rivière Andromba s'étend un petit plateau basaltique et des migmatites granitoides et de migmatites. Le volcanisme de Vontovorona correspond à celui d'Ankaratra et constitue la phase d'activité volcanique la plus récente (moins de 10.000 ans) ;
- Pour la partie l'Est, des hautes collines alignées suivant une direction N20°W s'interposent entre les vallées de l'Andromba et de la Sisaony. Ces collines sont formées par des migmatites granitiques avec quelques intercalations de syénite ;
- Des formations gneissiques apparaissent dans la partie Nord et Sud de la zone d'étude et sur la rive Nord du lac Lohazozoro ;

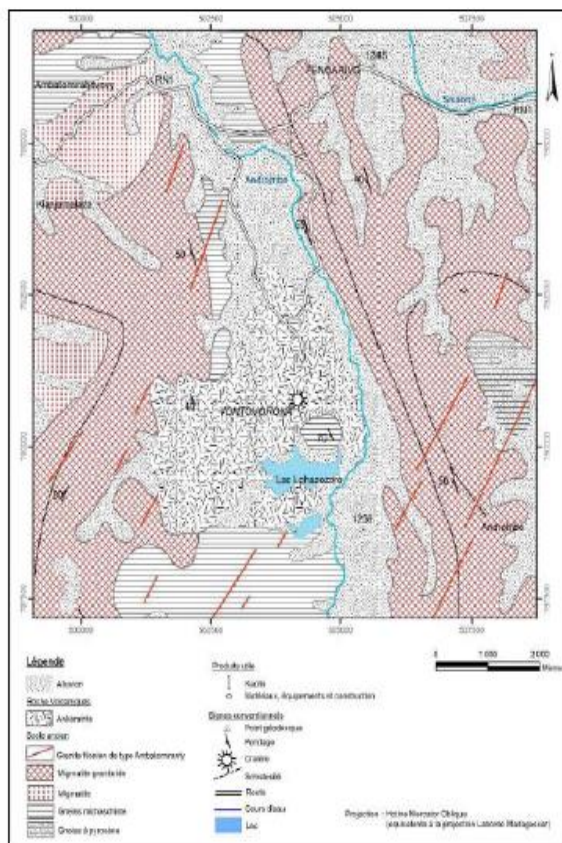


Figure 3 : Géologie de la zone d'étude (Rajo-Herisoa A. 2015).

- Les alluvions fluviales d'âge quaternaire occupent la vaste plaine de la zone d'étude.

Ces formations sont recoupées par le granite filonien d'Ambatomiranty de direction N40.

3. Méthodologie

La démarche méthodologique adoptée est classique, basée d'abord sur les recherches bibliographiques des travaux antérieurs sur la zone d'étude, puis sur les travaux du terrain et enfin sur les travaux en laboratoire.

Plusieurs paramètres influencent sur les matériaux de construction: les paramètres physiques, les paramètres mécaniques, la lithologie de la roche, les propriétés pétrographiques et enfin, leurs utilisations (Benbaqqal H et al.). Dans cette étude, les paramètres suivants seront déterminés ; Indice de Plasticité (IP), Equivalent de Sable (ES), Californian Bearing Ratio (CBR), Los Angeles (LA) et Micro Deval (MDE).

4. Résultats et Discussions

Les résultats présentés sont issus des observations et investigations sur le terrain ainsi que des essais en laboratoire. Il s'agit d'abord de décrire les morphologies aux environs de la zone d'étude, puis de caractériser les différents matériaux rencontrés dans leur contexte géomorphologique.

La géologie locale est constituée de migmatites granitoides et de granites migmatitiques calco-alcalins, où le faciès charnockitique est fréquent (Figure 3). Les roches intrusives sont très rares, quant aux roches filoniennes, hormis les filons granitiques de type Ambatomiranty dont la direction générale est N40.(Rajo-Herisoa A. 2015).

4.1. Les unités géomorphologiques dans la zone d'étude

Divers types du relief sont observés dans la zone d'étude :

- Piton volcanique de Vontovorona avec ses planèzes (Figure 4);



Figure 4 : Piton volcanique avec ses planèzes



Figure 5 : Piton volcanique avec ses nombreuses infrastructures

Relief volcanique d'orientation NE-SW, d'âge récent, dont au pied se trouvent beaucoup de belles maisons (Figure 5).

- **Plaine alluviale avec la rivière Andromba, les terrasses et les digues** (Figure 6);



Figure 6 : Plaine alluviale avec ses éléments

- **Terrasse alluviale ;**



Figure 7 : Terrasse alluviale

Au niveau des terrasses alluviales, des cultures maraîchères, des arbres fruitiers (oranges, bananes) et des confections de briques ont été observés (Figure 7).

- **Les différents types de colline:**

- Basse colline (Figure 8a);

9

- Moyenne colline allongée à sommet arrondi appelée relief à « dos de baleine » (Figure 8b);
- Haute colline d'Ankazotokana (Figure 8 c)



Figure 8a : Zones des basses collines



Figure 8 b : Relief à dos de baleine = moyenne colline

10



Figure 8 c : Haute colline

4.2. Les types de matériaux rencontrés

La zone d'étude se distingue par deux types de matériaux :

- Les matériaux rocheux d'origine magmatique et métamorphique ;
- Les matériaux meubles issus de l'altération des roches préexistantes ou des roches sédimentaires

Les matériaux rocheux se situent généralement :

- au niveau du piton volcanique et sur les planèzes pour les boules et blocs de basaltes (Figure 9) ;



Figure 9 : Boules et blocs de basaltes sur l'une des planèzes basaltiques

11



Figure 11 : Extraction du sable près du pont

- L'autre extraction se trouve à Antaramanana, un peu au sud de la première, ce lieu est réputé avec ses sables un peu plus grossiers (Figure 12)



Figure 12 : Extraction du sable à Antaramanana

Autre type de matériau meuble : Argile limoneuse pour la confection des briques sur une terrasse et au niveau de plaine alluviale (Figure 13) avec $15 < IP < 25$ = Plastique.

13

Le petit volcan du Vontovorona se dresse sur la rive gauche de l'Andromba et a donné au Nord du lac Lohazoro quelques coulées étendues sous forme de plateau légèrement incliné ou planèze, couvert de latérite « lit de vin » (Antsaniaina F. T.2015)

- au niveau de la colline à dos de baleine pour les migmatites granitiques (Figure 10) qui ont un caractère granitique et non gneissique (Antsaniaina F. T.2015)

et sur la haute colline d'Ankazotokana.



Figure 10 : Une des carrières de matériaux rocheux (migmatite granitique)

Les matériaux meubles se trouvent par contre au niveau des plaines et terrasses alluviales

Les deux zones d'extraction du sable le long de la rivière Andromba :

- L'une se trouve près du pont (Figure 11)

12



Figure 13 : Argile limoneuse au niveau de terrasse et plaine alluviale utilisée pour la confection des briques

Un autre type de matériau meuble dans la zone d'étude provenant de l'altération de la roche riche en feldspath (genre syénite) se trouvant dans la partie Nord de la colline à dos de baleine, $5 < IP < 15$ = Peu Plastique. Ce matériau est utilisé comme remblai (Figure 14).



14

Figure 14 : Zone d'emprunt

Le dernier matériau meuble concerne les latérites rouges issues de l'altération des basaltes et se trouvant sur les flancs des planèzes (Figure 15).



Figure 15 : Latérite rouge sur le flanc des planèzes

4.3- Les caractéristiques physiques et géomécaniques des matériaux

Le tableau I récapitule l'emplacement, la position au niveau du relief, les caractéristiques physiques et géomécaniques et l'utilisation de chaque matériau rencontré dans la zone d'étude.

Tableau I : Caractéristiques de chaque matériau

Type de matériau	Coordonnées	Positionnement morphologique	Propriétés géomécaniques	Utilisation
Matériaux rocheux				
Migmatite granitique	S 18°57'30.3" E 047°25'52.6" Altitude 1283m	Sur le versant de la colline à dos de baleine	LA = 25 MDE = 16	Granulats pour béton, moellons, pavés, enrochements

15

La présence des trois lacs d'origine tectono-volcanique donne à la région une zone favorable à la détente, c'est un atout pour le tourisme local.

La figure 16 récapitule les différents types de relief, l'emplacement des divers matériaux rencontrés ainsi que la géodiversité.

5. Conclusion

En conclusion les matériaux rencontrés aux environs de campus Vontovorona sont très diversifiés et répondent aux normes pour de nombreux types de construction.

Les matériaux d'empierrement et de construction sont abondants et généralement de bonne qualité. Il y a été ouvert un certain nombre de carrières, mais il n'existe pas d'exploitation importante. Dans les plaines alluviales, de l'argile et de la tourbe sont utilisées pour la briqueterie (Rajo-Herisoa A. 2015).

Les matériaux originaires de roches massives sont très remarquables puisqu'ils se diversifient sur l'ensemble de la zone d'étude et présentent une bonne qualité comme pierre de construction (Benbaqqal H et al.).

Les différentes analyses effectuées sur l'ensemble des échantillons tiennent un rôle important pour trouver leurs meilleures utilisations. Chaque produit fini est caractérisé par une composition minéralogique, granulométrique et géotechnique (Ramisasoa T. 2016).

17

Basalte	S 18°57'30.3" E 047°25'52.6" Altitude 1283m	Sur le versant du Piton volcanique, au niveau des planèzes	LA = 15 MDE = 18	Granulats pour béton, construction routière
Matériaux meubles				
Sables	S 18°57'45.7" E 047°25'50.0" Altitude 1262m S 18°59'10.2" E 047°26'10.2" Altitude 1268m	Le long de la rivière Andromba, près du pont à Antaramanana	ES = 62 ES = 70	Mortier, enduit, béton, lit de pose pour pavé
Argile limoneuse	S 18°59'14.8" E 047°26'20.1" Altitude 1262m	Terrasse et plaine alluviale	IP = 18	Briques, tuiles, poteries
Latérite rouge (Fe ₂ O ₃)	S 18°59'07.0" E 047°25'44.2" Altitude 1312m	Sur le versant des planèzes	IP = 26 CBR = 23	Mortier en terre, couche de forme, couche de roulement pour route en terre (sol amélioré avec du sable)
Argile blanche (Al ₂ O ₃)	S 18°57'03.6" E 047°25'51.2" Altitude 1312m	Au Nord de la colline à dos de baleine	IP = 10	Céramique, remblai

16

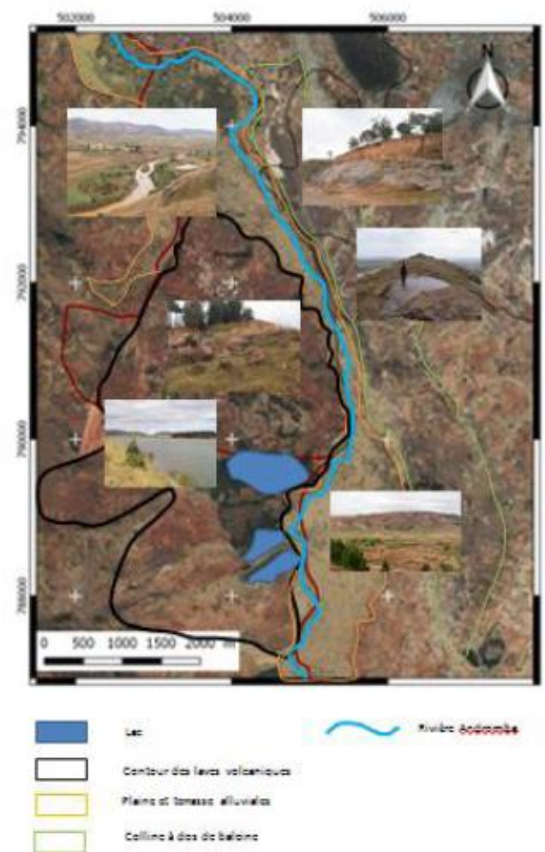


Figure 16 : La géodiversité dans la zone d'étude

18

Références bibliographiques

Antsaniaina F., T. (2015) : Modélisation et cartographie des zones à risque d'érosion par combinaison de facteurs en jeu : cas du bassin versant de Lohazozoro-Andromba. Mémoire de Master, ESPA, Université d'Antananarivo.

Benbaqqal H. ; Masrour A. ; Benyassine E.M. et Erragragui M. (2016) :
Approche du SIG pour la valorisation des carrières de matériaux de construction.
Cas d'étude : Ex-Région septentrionale de Meknès-Tafilalet, Maroc.
J. Mater. Environ. Sci. 7 (7) pp 2340-2351.

Ramiasoa T. M. (2016) : Valorisation des géoressources argileuses de Vontovorona Tananarive (Madagascar), Mémoire de Master, Département de Géologie Fac Sciences, Université de Liège.

Rajo-Herisoa A. (2015) : Cartographie géologique au 1 : 50 000, par la géomatique, de Vontovorona Commune Rurale Alakamisy- Fenoarivo, Mémoire d'Ingénieur, Département de Géologie, ESPA, Université d'Antananarivo.

**CARACTERISATIONS PHYSICO-CHIMIQUE, MINERALOGIQUE ET
GEOTECHNIQUE DES LATÉRITES AUX ENVIRONS DE VONTOVORONA,
COMMUNE ALAKAMISY FENOARIVO**

Mandimbiharison A.¹, Raharinierana H.², Mandimbiarimanga T. H.³

- 1- Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Mention Génie Géologique, BP 1500 Antananarivo 101 Madagascar. raory@yahoo.fr
2- Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Mention Sciences de l'Ingénierie des Matériaux (SIM), BP 1500 Antananarivo 101.
3- Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo (ESPA), Laboratoire de Géotechnologie et Géotechnique.

Résumé :

De nombreux spécialistes ont étudié les latérites mais chacun a sa version, sa compréhension et son interprétation sur leur formation. Dans notre recherche, trois échantillons de latérite de couleur et de roche-mère différentes ont été analysés tant sur les plans physique, chimique, minéralogique que géotechnique. Si certains résultats confirment les travaux des autres auteurs, il y en a qui posent des doutes. Cet intérêt scientifique et ces divergences traduisent une forte augmentation de la connaissance et font des latérites un grand sujet de recherche qui est loin d'être clos.

Mots clés : Latérite, roche-mère, caractérisations, géotechnique, Vontovorona.

1. INTRODUCTION

Les latérites se forment par altération des roches sous les climats tropicaux et constituent des sols de différentes couleurs selon la nature de leur roche-mère. Dans l'ensemble les latérites sont considérées comme des matériaux meubles ou indurés selon leur position dans le profil d'altération.

Le phénomène d'altération se présente sous deux natures différentes :

- L'altération physique ou mécanique : elle se traduit par la fragmentation de la roche mère, due aux grands écarts de température journalière ou saisonnière qui font alterner des contraintes de traction et de compression dans la roche en des temps relativement courts ;
- L'altération chimique dont le principal agent est l'eau de pluies qui pénètre dans les fractures, dans les fissures ou dans les pores de la roche mère.

D'autres facteurs ont une influence prépondérante sur cette altération des roches et la formation des sols latéritiques qui en découlent. Ce sont : le climat, la topographie, la végétation, la nature de la roche-mère.

Si les latérites couvrent 33% des continents, elles se trouvent surtout sur les Hautes Terres Centrales à Madagascar et couvrent plus de la moitié de sa superficie.

2. PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

2.1. Localisation administrative

La zone d'étude, située aux environs du Campus universitaire de Vontovorona de l'Ecole Supérieure Polytechnique, fait partie de la Commune Rurale d'Alakamisy

Fenoarivo dans le District d'Antananarivo Atsimondrano. La figure 1 délimite la zone étudiée.



Figure 1 : Localisation de la zone d'étude

2.2. Contexte morphologique

La morphologie de la zone d'étude est très diversifiée (Mandimbiharison A., 2019) :

- des collines de forme et d'altitude variées (basse, moyenne et haute colline) parsemées de boue rocheuse en altération, essentiellement granitiques et migmatitiques et une colline d'épanchement volcanique ;
- d'une vaste plaine rizicole ;

L'altitude varie de 1260 m à 1520 m environ. La dénivellation entre les collines mamelonnées et la vallée marécageuse est très grande.

2.3. Hydrographie

La Commune Rurale d'Alakamisy Fenoarivo, y compris Vontovorona, est parcourue par la Rivière Andromba de direction SSE-NNW, un affluent de l'Ikopa. Quelques eaux stagnantes s'y trouvent, en particulier le lac Lohazozoro.

2.4. Aperçu géologique

La zone d'étude comporte plusieurs formations géologiques (Figure 2):

- A l'Ouest de la rivière Andromba s'étend un petit plateau basaltique et des migmatites granitoïdes et de migmatites. Le volcanisme de Vontovorona correspond

à celui d'Ankaratra et constitue la phase d'activité volcanique la plus récente (moins de 10.000 ans) ;

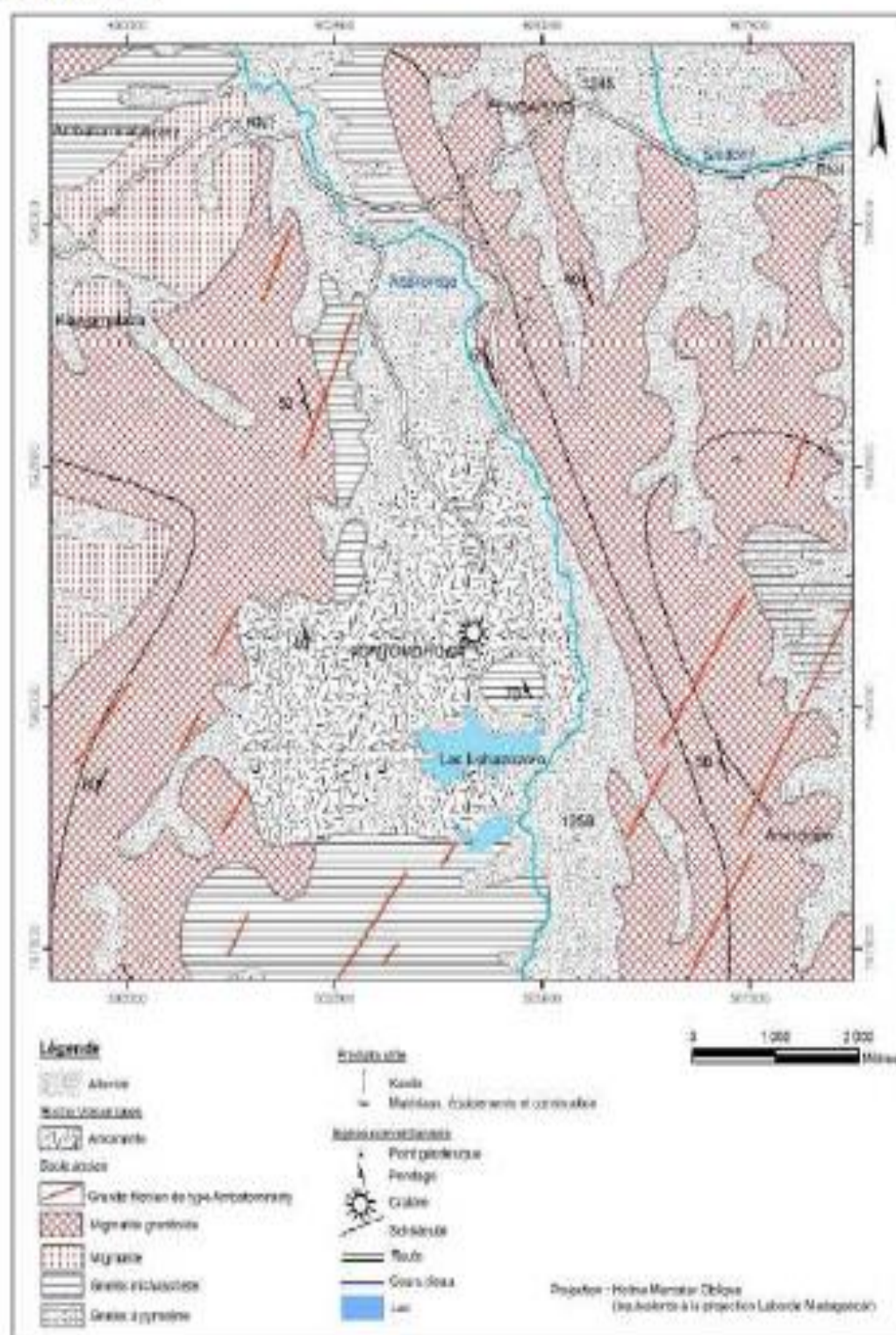


Figure 2 : Les formations géologiques de la zone d'étude (Rajon-Herisoa, 2015).

- Pour la partie l'Est, des hautes collines alignées suivant une direction N20°W s'interposent entre les vallées de l'Andromba et de la Sisaony. Ces collines sont formées par des migmatites granitiques avec quelques intercalations de syénite ;
- Des formations gneissiques apparaissent dans la partie Nord et Sud de la zone d'étude et sur la rive Nord du lac Lohazozoro ;
- Les alluvions fluviales d'âge quaternaire occupent la vaste plaine de la zone d'étude.

Ces formations sont recoupées par le granite filonien d'Ambalomiranty de direction N40.

3. METHODOLOGIE




La démarche méthodologique adoptée est classique, elle est basée sur des recherches bibliographiques (travaux antérieurs sur la zone d'étude), sur des observations et travaux sur terrain et enfin sur des essais et analyses au laboratoire.

Nous avons repris les résultats des analyses chimiques et minéralogiques des travaux de recherche de Ramisasa Tatamo 2016, effectués au laboratoire des argiles à l'Université de Liège.

Pour les analyses physiques et essais géotechniques, nous avons pris les échantillons sur les mêmes points de prélèvement que ceux de Ramisasa. Ils sont effectués au Laboratoire National des Travaux Publics et de Bâtiments (LNTPB).

Le tableau 1 montre la localisation des points d'échantillonnages pour les analyses physiques et essais géotechniques.

Tableau 1 : Localisation des points d'échantillonnage

N°	Coordonnées	Nature	Observation	Illustration
1	S 18° 58' 35,7" E 047°25' 36,7" Z= 1338m	Latérite rouge	Issue de l'altération du basalte, sur le versant du piton volcanique	
2	S 18° 57' 30,3" E 047°25' 52,6" Z= 1283m	Latérite jaunâtre	Issue de l'altération de migmatite granitique	
3	S 18° 57' 02,4" E 047°25' 46,0" Z= 1287m	Latérite blanchâtre	Issue de l'altération du granite avec des intercalations de la syénite	

4. RESULTATS DES ANALYSES ET ESSAIS SUR LES LATÉRITES DE VONTOVORONA

Les latérites, objet de l'étude, se trouvent aux environs de Vontovorona dans la Commune Rurale d'Alakamisy Fenoarivo et se distinguent par leur couleur (rouge, jaunâtre, blanchâtre) et par leur roche d'origine.

4.1- Caractéristiques physico- chimiques des latérites de Vontovorona

4.1.1- Essais physiques

Il s'agit de déterminer la teneur en eau et le poids spécifique des trois échantillons étudiés. Le tableau 2 récapitule les résultats des analyses physiques

Tableau 2 : Résultats des analyses physiques

Désignations	Nature visuelle	Teneur en eau initiale (%)	Poids spécifique (KN/m ³)
Latérite blanchâtre	Limon Sableux Blanchâtre	10.5	26.50
Latérite jaunâtre	Limon Argileux légèrement Sableux Jaunâtre	16.2	28.67
Latérite rougeâtre	Limon Argileux Rougeâtre	23,43	28,4

(LNTPB, 2019)

4.1.2- Analyse chimique par fluorescence X

Le tableau 3 présente la composition chimique en éléments majeurs des 3 échantillons de latérites étudiées, exprimée en pourcentage d'oxydes.

Tableau 3 : Composition chimique des 3 échantillons étudiés

Echantillon	SiO ₂	TiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MnO	MgO	CaO	Na ₂ O	K ₂ O	P ₂ O ₅	LOI	Total
Latérite rouge	36,25	4,95	23,53	20,76	0,51	0,63	0,04	0,00	0,09	0,5	13,61	100,87
Latérite jaunâtre	49,81	1,25	27,80	8,28	0,03	0,11	0,00	0,00	0,21	0,04	12,27	99,80
Latérite blanchâtre	62,30	0,11	23,23	0,43	0,03	0,00	0,00	0,00	0,16	6,78	6,69	99,73

(Ramisasona, 2016)

4.1.3- Diffraction au rayon X

Cette méthode permet d'identifier les différentes phases minérales présentes à partir de l'analyse sur poudre totale et de déterminer à partir des fractions totales (fines) les minéraux argileux.

Les figures 3.4 et 5 montrent les diffractogrammes des trois échantillons

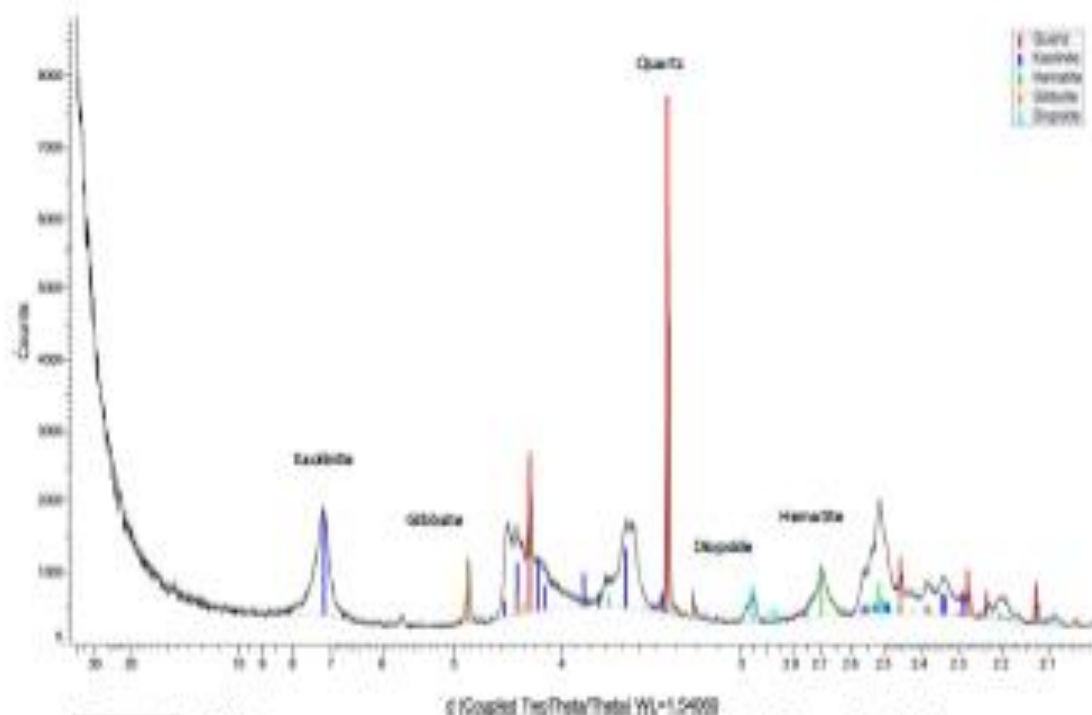


Figure 3 : Diffractogramme sur poudre totale de l'échantillon de latérite rouge (Ramisasa, 2016)

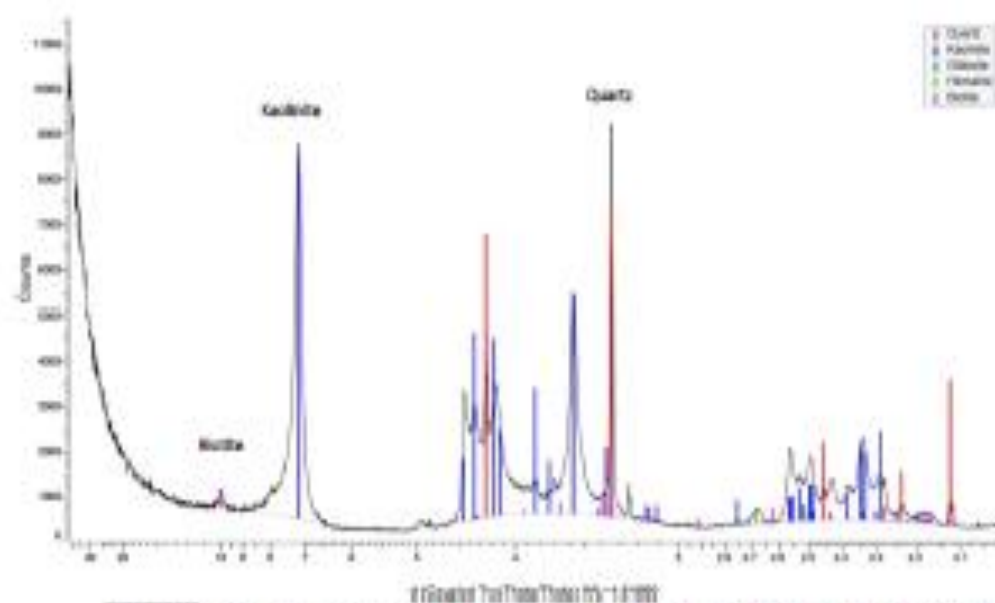


Figure 4 : Diffractogramme sur fraction totale de l'échantillon de latérite jaunâtre (Ramisasa, 2016)

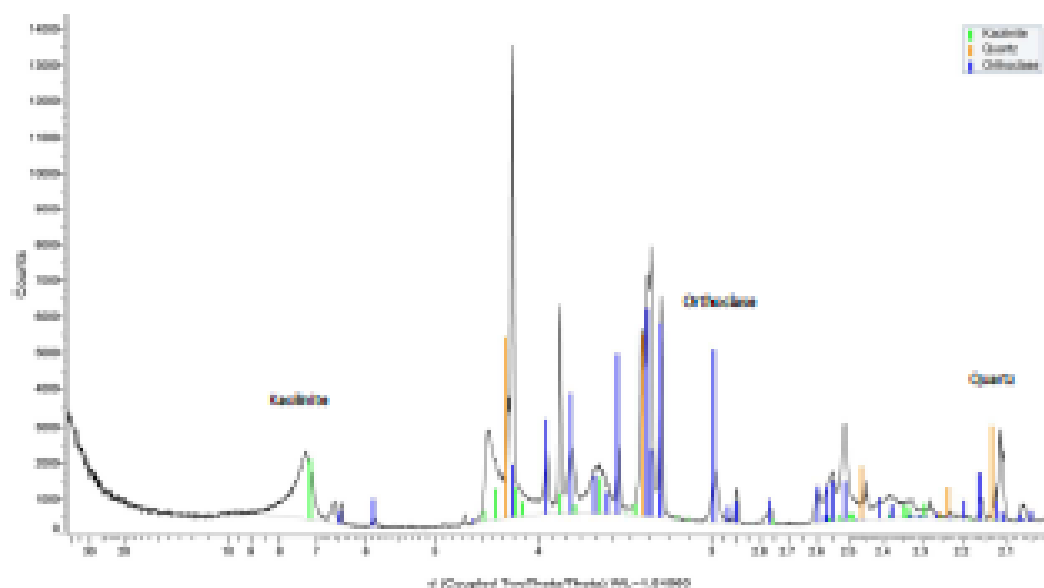


Figure 5 : Diffractogramme sur fraction totale de l'échantillon de latérite blanchâtre
(Ramisasa, 2016)

Le tableau 4 montre les proportions des phases minérales identifiées dans la poudre totale pour chaque échantillon de sol.

Tableau 4 : Estimation semi-quantitative de la composition minéralogique des échantillons de sol en %

Type	Minéraux primaires						Minéraux secondaires		
Phase minérale	Quartz	Pyroxène	Mica	Feldspath K	Plagioclase	Illite	Hématite	Gibbsite	Kaolinite
Latérite rouge	21	6	-	-	-		7	3	63
Latérite jaunâtre	14	-	4	-	-	10	2	-	70
Latérite blanchâtre	6	-	-	32	-		-	-	62

(Ramisasa, 2016)

4.2 Caractéristiques géotechniques des latérites de VONTOVORONA

4.2.1 – Essais d'identification

a) Analyse granulométrique

L'essai consiste à diviser au moyen de tamis un matériau en plusieurs classes granulaires de tailles décroissantes selon la norme NF EN 12948 Décembre 2010: Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau 5 et la figure 6.

Tableau 5 : Composition granulométrique des 3 échantillons de latérites

Désignation	Nature visuelle	Ouverture des tamis (mm) / Passant(%)									
		5	2	1.0	0.31 5	0.2	0.08	0,065	0,033	0,011	0,001 4
Latérite blanchâtre	Limon Sableux Blanchâtre	100	98	89	62	53	41				
Latérite jaunâtre	Limon Argileux légèrement Sableux Jaunâtre	100	94	83	71	68	60				
Latérite rouge	Limon Argileux Rougeâtre		100	100	99	98	94	93	82	55	25

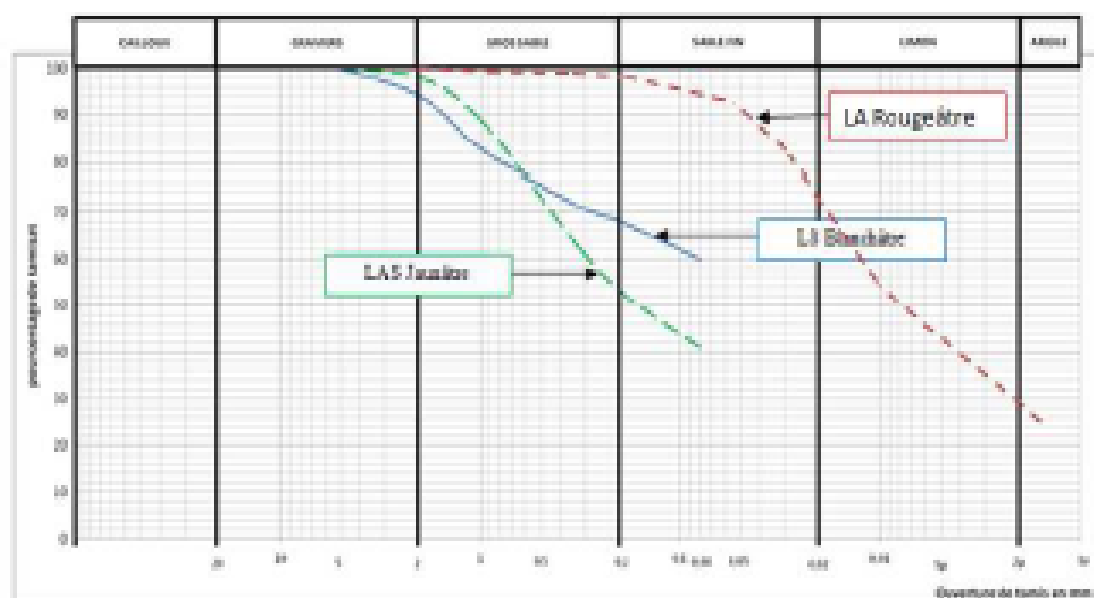


Figure 6 : Représentation des courbes granulométriques des trois échantillons

b) Limite d'Atterberg

L'essai consiste à déterminer la plasticité du sol en tenant compte de la limite de liquidité et la limite de plasticité selon la norme NF P 94-051 Mars 1993.

Les résultats de l'essai sont présentés dans le tableau 6 ci-dessous.

Tableau 6 : Les paramètres de la limite d'Atterberg pour les trois échantillons

Désignation	WL %	WP %	IP
Latérite blanchâtre	30.7	19.2	11,5
Latérite jaunâtre	43.4	26	17,4
Latérite rouge	56	32,4	23.6

(LNTPE, 2019)

WL : Limite de liquidité

WP : Limite de plasticité

Ip : Indice de plasticité

4.2.2 – Essais de caractérisation

c) - Essai Proctor

L'essai Proctor Modifié est réalisé par opération de compactage dans un moule métallique normalisé à l'aide d'une dame modifiée avec un certain nombre de coups bien définis pour déterminer la densité optimale en faisant varier la teneur en eau de compactage selon la norme NF P 94-093 Octobre 2014. Cet essai Proctor modifié a été réalisé du fait de sa conformité avec les travaux de construction routière.

d) - Essai CBR

L'essai CBR consiste à déterminer la portance d'un sol compacté à des énergies relatives à l'essai Proctor selon la norme NF P 94-078 Mai 1997.

Il s'agit donc de déterminer expérimentalement des indices qui serviront à déterminer principalement l'épaisseur des couches de fondation.

Le tableau 7 récapitule les résultats de deux essais Proctor et CBR

Tableau 7 : Résultats des essais Proctor et CBR sur les trois échantillons de latérites

Désignations	Essai PROCTOR		Essai CBR (95% OPM)	
	γ_{dmax} (KN/m ³)	W _{opt} (%)	Indice CBR	Gonflement (%)
Latérite blanchâtre	19.97	12.6	25	0.78
Latérite Jaunâtre	19.80	17.1	23	0.89
Latérite rouge	17,2	21,8	23	0,19

(LNTPE, 2019)

5. INTERPRETATIONS ET DISCUSSIONS

L'analyse granulométrique, la limite d'Atterberg et les essais Proctor et CBR des trois échantillons sont récapitulés au tableau 8 et la figure 7 montre leur position dans le diagramme de Casagrande.

Les compositions minéralogique et chimique des éléments principaux sont présentées au tableau 9.

D'après la classification des matériaux GTR 92 (norme NF-P11-300) :

- Le tamisat à 80 μ m >35% est considéré comme de sol assimilable à celui de fractions fines ;
- Les seuils retenus pour l'Indice de plasticité (IP) sont 12 ; 25 et 40



Tableau 8 : Les différents essais géotechniques

Désignations	Analyse granulométrique	Limite d'Atterberg			Essai Proctor		Essai CBR (95% OPM)	
	% en fine (< 0.080mm)	WL	WP	IP	γ_{dmax} (kN/m ³)	Wopt(%)	Indice CBR	Gonflement (%)
Latérite Blanchâtre	41	30.7	19.2	11.5	18.97	12.6	25	0.78
Latérite Jaunâtre	60	43.4	26	17.4	18.80	17.1	23	0.89
Latérite Rouge	94	56	32.4	23.6	17.2	21.8	23	0.19

Les matériaux pour les remblais doivent remplir les conditions suivantes (GTR) :

- limite de liquidité (W_L) inférieure à 65;
- indice de plasticité (I_p) inférieure à 25;
- poids volumiques sec Proctor modifié supérieur à 18kNm³;
- indice Portant CBR à 96 heures d'imbibition (tenseur en eau OPM) et à 95% de l'OPM supérieur à 15;
- présente un gonflement linéaire au moule CBR à la densité exigée à la mise en œuvre inférieure à 2%;

→ Seule la latérite Rouge ne remplit pas ces conditions donc ne peut pas être utilisé comme matériau de remblai

Les matériaux à sols fins ($D_{max} \leq 50mm$) pour couche de forme doivent remplir les conditions suivantes :

- indice de plasticité inférieure ou égal 20;
- indice CBR supérieur à 15 après 96 heures d'immersion;
- gonflement linéaire au moule CBR inférieur à 1%.

→ Les latérites jaunâtre et blanchâtre peuvent être utilisées comme couche de forme.

Les deux latérites jaunâtre et blanchâtre peuvent être utilisées en tant que matériaux de remblai et comme couche de forme pour la construction routière.

La figure 7 montre la position des trois types de latérites dans le diagramme de Casagrande.

Différentes études ont montré que les latérites sont composées principalement d'oxydes de fer, d'oxydes d'Aluminium et de minéraux argileux. Le fer est généralement retrouvé sous forme de goéthite $FeOOH$ ou d'hématite Fe_2O_3 , l'alumine sous forme de gibbsite $Al(OH)_3$ ou boehmite $AlO(OH)$ et les argiles dont la plus commune aux sols résiduels tropicaux est la kaolinite $Al_2Si_2O_5(OH)_4$. Ce matériau renferme aussi une grande quantité de silice libre ou combinée (Souley, 2016).

Le tableau 10 présente les constituants majeurs des latérites (Rakotoarisoa R.M.E, 2019).

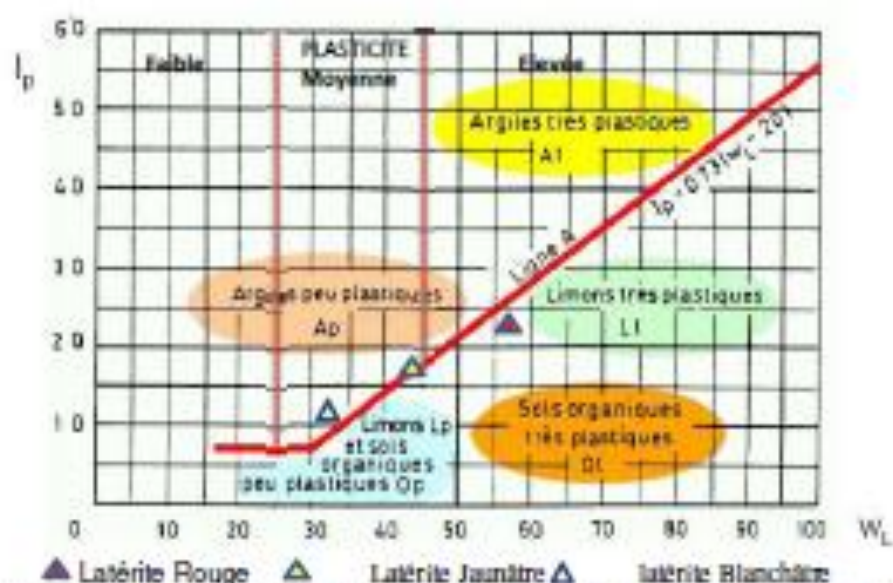


Figure 7 : Position des trois échantillons dans le diagramme de plasticité de Casagrande

Tableau 9 : Compositions minéralogique et chimique des trois échantillons de latérites

Type	Minéraux primaires					Minéraux secondaires			Composition chimique des éléments principaux		
Phase minérale	Quartz	Pyroxène	Mica	Feldspath K	Illite	Hématite	Gibbsite	Kaolinite	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
Latérite rouge	21	6	-	-	-	7	3	63	36.25	23.53	20.76
Latérite jaunâtre	14	-	4	-	10	2	-	70	49.81	27.8	8.28
Latérite blanchâtre	6	-	-	32	-	-	-	62	62.3	23.23	0.43

Tableau 10 : Les constituants majeurs des latérites

Oxydes de fer	Oxydes d'aluminium	Minéraux argileux	Minéraux siliceux
Goethite Limonite : Communs Hématite	Gibbsite : commun Bohmite : plus rare	Kaolinite : commun Halloysite : plus rare	Quartz : commun
Magnétite Magnétite : plus rares Ilménite	Corindon très rares Diaspore	Illite rares Montmorillonite	

(Rakotoarisoa, 2019)

L'abondance de Feldspath et le peu de Quartz dans les minéraux primaires de la latérite blanchâtre peut indiquer la nature syénitique de la roche mère.

De nombreux auteurs ont essayé de proposer des critères permettant de classer les latérites.

En général, ces critères étaient basés sur les proportions relatives de silice, d'alumine et d'oxyde fer contenu dans la latérite (Rafidiniana L.H., 2013) Parmi ces proportions :

- Lacroix (1913) classe les latérites selon la somme des teneurs en oxydes de fer et d'alumine, représentée par le tableau 11.

Tableau 11 : Classification des latérites selon Lacroix

Classe	Teneur En Oxydes De Fer Et D'aluminium
Latérite	100 à 90 %
Latérite argileuse	90 à 50 %
Argile latéritique	50 à 10 %
Argile	10 à 0%

→ Les trois échantillons se trouvent dans la classe de l'argile latéritique

- Martin et Doyen (1930)

- Classification en fonction du ratio silice alumine $k_1 = \frac{\frac{\text{SiO}_2}{100}}{\frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{100}}$
- Classification en fonction de la silice sesquioxyde $k_2 = \frac{\frac{\text{SiO}_2}{100}}{\frac{\text{Fe}_2\text{O}_3}{100} + \frac{\text{Al}_2\text{O}_3}{100}}$

Une valeur de k_1 faible est attribuée aux latérites. D'autre part, suivant les valeurs de k_2 , on peut classer les latérites en :

- latérites vraies si $k_2 < 1.33$
- roches latéritiques si $1.33 < k_2 < 2$
- sols tropicaux non latéritiques si $k_2 > 2$

Le tableau 12 montre la classe de chaque échantillon selon la classification de Martin et Doyen.

Tableau12 : Classification des latérites selon Martin et Doyen

Echantillon	Valeur K_2	Classe
Latérite rouge	1.68	Roche latéritique
Latérite jaunâtre	2.58	sols tropicaux non latéritiques
Latérite blanchâtre	4.51	sols tropicaux non latéritiques

Les résultats sur les deux types de classification sont différents, ainsi l'utilisation de ces rapports ne suffit pas à caractériser entièrement les latérites. En effet, différents minéraux inclus dans le profil latéritique et la cuirasse tel que le quartz peut de nature à élever le rapport.

6. CONCLUSION

Les matériaux latéritiques aux environs du Campus de Vontovorona se distinguent par leur couleur, leur origine, leurs caractéristiques physique, chimique, minéralogique et géotechnique. Le tableau 11 récapitule certains paramètres permettant de voir si des corrélations existent entre eux.

Tableau 11 : Récapitulatif de certains paramètres lithologiques, géotechniques et chimiques.

Plus foncée ↓ Plus claire	Désignation	Roche mère	Ip	γ_{dmax} (KN/m ³)	Wopt (%)	I _{cas}	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃
	Latérite rouge	Basalte	23,6	17,2	21,8	23	36,25	23,53	20,76
	Latérite jaunâtre	Migmatite granitique	17,4	18,80	17,1	23	49,81	27,80	8,28
	Latérite blanchâtre	Granite avec intercalation de syénite	11,5	18,97	12,8	25	62,30	23,23	0,43

De ce tableau, il ressort que plus la couleur de la latérite est foncée, la teneur en Fe₂O₃, le pourcentage de Wopt et la valeur de Ip sont élevés. Ces quatre paramètres ont donc une forte corrélation positive. Inversement à cela les valeurs de γ_{dmax} et de SiO₂ sont moindres. La teneur assez élevée en Fe₂O₃ dans un matériau augmente-t-elle son Indice de Plasticité (Ip) ? La mélange de la latérite rouge avec une certaine quantité de latérite blanchâtre diminue-t-elle l'Ip ou en augmente-t-elle le CBR ? Voilà une piste pour la recherche future.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Mandimbiharison A. 2019 : Contexte géomorphologique des géomatériaux et leurs caractéristiques géomécaniques dans les environs du campus Vontovorona, Communication lors du Colloque en Géosciences lors de 130^è anniversaire IOGA, à l'Académie Malagasy (26-27 Sept 2019)

Rafidiniaina L. H. 2008 : Banque des données pluridisciplinaires sur les latérites, Mémoire de DEA à l'ESPA 69p

Rajo-Herisoa A. 2015 : Cartographie géologique au 1 : 50 000, par la géomatique, de Vontovorona Commune Rurale Alakamisy- Fenoarivo, Mémoire d'Ingénieur, Département de Géologie, ESPA, Université d'Antananarivo.

Rakotoarisoa R.M.E. 2019 : Etude de la stabilisation de la latérite par les déchets plastiques, cas de la latérite de Vontovorona, Mémoire de Master en Ingénierie Pétrolière ESPA, 121p

Ramiasoa T. M. 2016 : Valorisation des géorressources argileuses de Vontovorona Tananarive (Madagascar), Mémoire de Master, Département de Géologie, Faculté des Sciences, Université de Liège.

Randrianantenaina L. 2013 : Contribution à l'étude de stabilisation de la latérite par le purin de bœuf, cas de la latérite de Vontovorona, Mémoire d'Ingénieur en Génie Chimique, ESPA

Souley Issiakou M. 2016, Caractérisation et valorisation des matériaux latéritiques utilisés en construction routière au Niger Thèse de Doctorat à l'Université de Bordeaux 323p

CARACTERISATIONS PETROGRAPHIQUES DES PROFILS LATERITIQUES NICKELIFERES D'AMBATOVY MORAMANGA, CENTRE EST DE MADAGASCAR

Mandimbiharison A.1

1 Département de Géologie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo, B.P. 1500 Antananarivo 101
E-mail auteur correspondant : raory@yahoo.fr

Résumé :

Le gisement du Nickel d'Ambatovy provient de l'altération météorique des péridotites. De la roche mère saine, péridotite (I) à la base jusqu'à la cuirasse ferrugineuse (V) au sommet, le profil d'altération comporte cinq horizons. Par l'étude de deux profils (Profil S et Zone C), nous allons suivre l'évolution et les caractéristiques pétrographiques de chaque horizon par observations des lames minces et des sections polies. A la fin un modèle d'évolution de l'olivine et des cloisons serpentineuses a été présenté.

Mots clés : Altération, nickel, Ambatovy, olivine, péridotite, Madagascar

Abstract:

The Ambatovy Nickel deposit comes from the weathering of Peridotites. Of the healthy parental rock, peridotite (I) at the base to the ferruginous duricrust (V) at the summit, the weathering profile has five horizons. By studying two profiles (Profile S and Zone C), we will follow the evolution and petrographic characteristics of each horizon by observations of thin sections and polished sections. At the end, an evolution model of olivine and serpentine partitions was presented.

Keywords : Weathering, nickel, Ambatovy, olivine, peridotite, Madagascar.

1. INTRODUCTION

Dans les régions à climat tropical chaud et humide, l'altération des roches ultrabasiques conduit à une épaisse formation d'horizons d'altération de caractéristiques diverses mais qui peuvent contenir de minerais ferrugineux et nickélifères exploitables.

C'est le cas du gisement du nickel d'Ambatovy, Moramanga, Centre Est de Madagascar.

Dans cet article, nous voulons présenter les résultats des études pétrographiques (lames minces et sections polies) des deux profils latéritiques permettant de suivre l'évolution de l'altération de la roche mère.

2. CARACTERISTIQUES DU GISEMENT LATERITIQUE NICKELIFERE

Les roches ultrabasiques sont très altérables, elles se transforment rapidement en serpentine, c'est la « serpentinitisation » dont on distingue 2 types :

- *la serpentinitisation primaire* qui affecte les roches ultrabasiques avant qu'elles ne parviennent à l'affleurement. Selon Trescases (1977), il s'agit d'un phénomène de retrodiagenèse hydrothermale, avec expansion partielle du fer sous forme de magnétite. C'est un phénomène hypogène antérieure à l'altération superficielle et constitue les pièges privilégiés des hydroxydes de nickel à la base des profils (TRESCASES 1973).

- **la serpentinisation secondaire** : il s'agit d'une serpentinisation due à l'altération météorique supergène des roches ayant déjà subi la serpentinisation primaire.

Les latérites nickélifères ont été subdivisées en deux types de gisements (Zeissink, 1969 ; Avias, 1978) :

- le gisement silicaté, où le nickel est associé à des silicates et se situe à la base du profil, est caractérisé par de fortes teneurs en SiO_2 et MgO et de faible teneur en Fe_2O_3 ;

- le gisement oxydé, caractérisé par de fortes teneurs en Fe_2O_3 et faible teneur en SiO_2 et MgO .

L'horizon enrichi en Ni est constitué d'hydroxyde et de trouve dans les niveaux supérieurs du profil.

Les profils d'altération latéritique nickélifère sont dénommés « **saprolite** » au niveau silicaté et « **limonite** » (latérite ou saprolite fine) au niveau oxydé.

Pour le gisement latéritique nickélifère d'Ambatovy, c'est du type classique rattaché à l'altération météorique des péridotites dont l'évolution conduit à la formation de cuirasses ferrugineuses et des latérites ou limonites nickélifères.

La figure 1 ci-après montre le profil latéritique type d'Ambatovy.

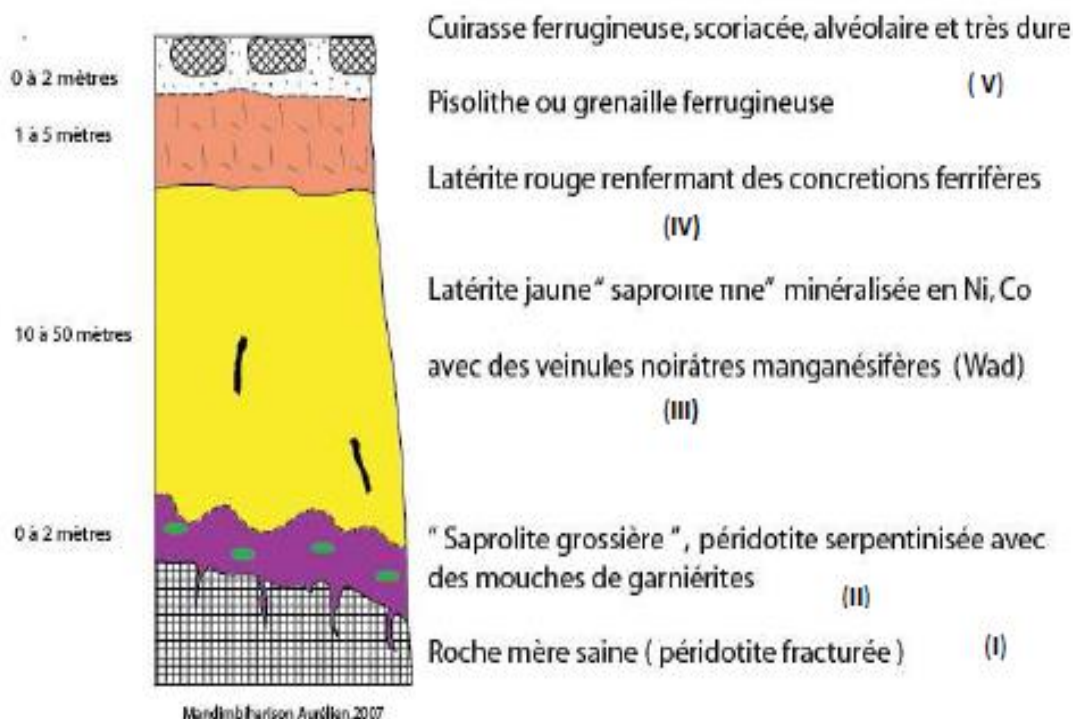


Figure 1 : Profil latéritique type d'Ambatovy

3. CONTEXTE GEOLOGIQUE

3.1- Localisation de la région étudiée

Ambatovy appartient entièrement à la région communément appelée le « Versant oriental de Madagascar ». Elle se trouve à une vingtaine de kilomètres au Nord-est de

la ville de Moramanga située à 110 Km à l'Est de la capitale. C'est une zone forestière située entre 900 et 1200 mètres d'altitude, limitée à l'Ouest par le fossé tectonique de

Mangoro et à l'Est par la falaise de Betsimisaraka. La figure 2 représente la localisation de la zone d'étude, la ville de Moramanga située à 110 Km à l'Est de la capitale. C'est une zone forestière située entre 900 et 1200 mètres d'altitude, limitée à l'Ouest par le fossé tectonique de

Mangoro et à l'Est par la falaise de Betsimisaraka. La zone d'Ambatovy appartient à la Région d'Ataotra Mangoro limitée à l'ouest par la Région d'Analamanga et à l'est par celle d'Atsinanana (figure 2).

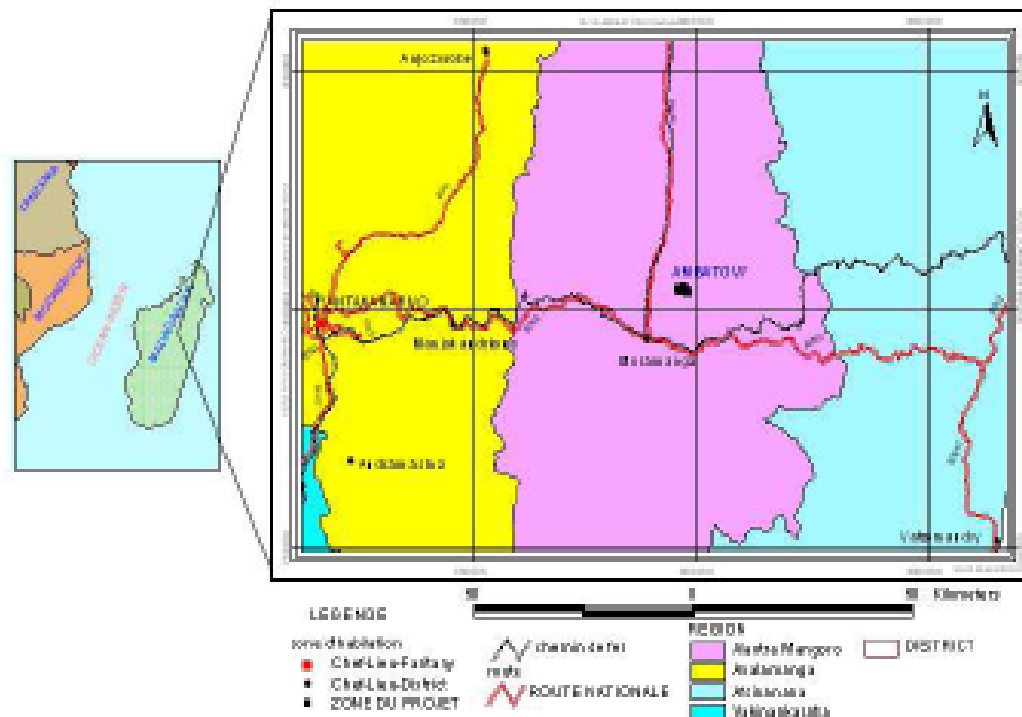


Figure 2: Localisation de la zone d'étude

3.2- Géologie locale

La région étudiée, appartient au domaine d'Antananarivo selon la nouvelle cartographie géologique de Madagascar (PGRM, 2012) et faisant partie du « Complexe d'Antampombato » d'âge Crétacé (Delbos et Rantoanina 1961), elle est représentée par un grand massif intrusif de 80km² environ et de forme elliptique qui est constitué essentiellement par du gabbro, par une masse syénitique formant

un grand « ring dyke » et par deux petits massifs péridotitiques (Ambatovy et Analamay). Ce grand massif, recoupé par de nombreux filons de basalte, dolérite, rhyolite et trachyte, est cintré et dominé par de formations gneissique et migmatitique de direction Nord-Sud.

La figure 3 illustre la variété et la diversité des formations rencontrées dans la région étudiée.

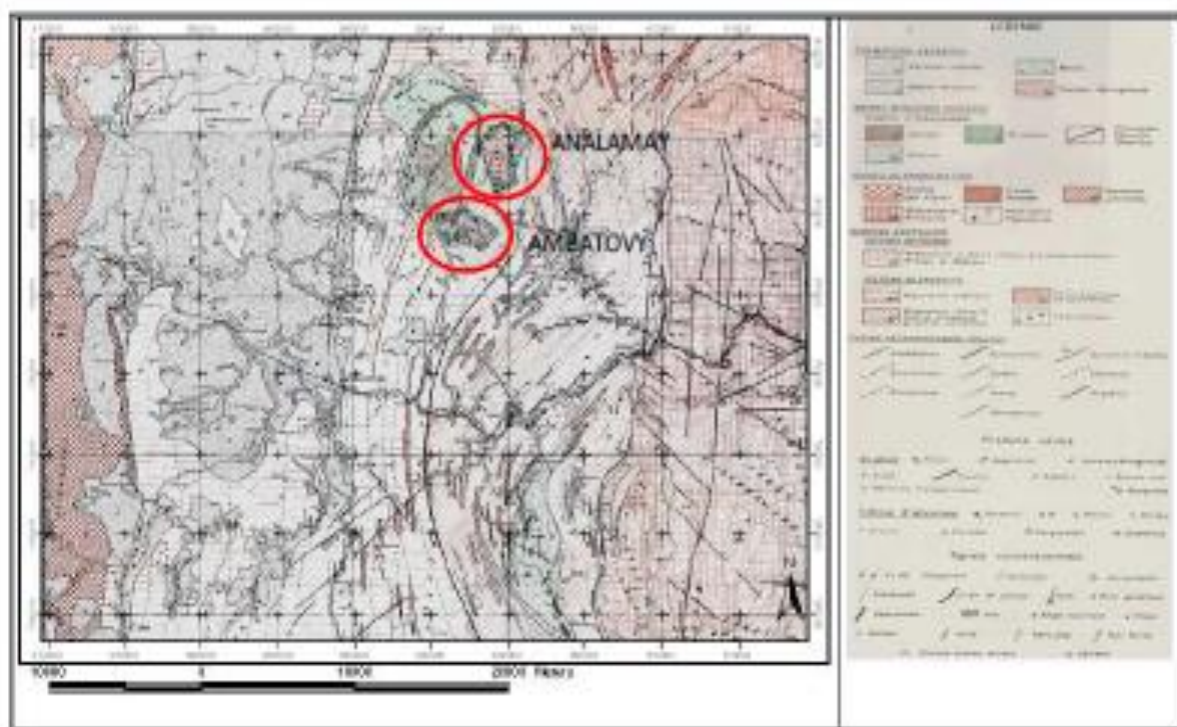


Figure 3 : Géologie régionale avec les deux petits massifs péridotitiques d'Ambatovy et d'Analamay (Delbos et Rantoina, 1961)

4. DESCRIPTION DES PROFILS ETUDIÉS

Deux profils dénommés « Profil S1 » et « Zone C » font l'objet de cette étude. Le profil appelé « profil S1 » est issu d'un sondage du SIF Bachy en 1980, au point de coordonnées Laborde (X=804 550m, Y=596 550m) et le deuxième nommé « Zone C » provient d'un rafraîchissement d'un affleurement de coordonnées Laborde (X= 803 290m, Y= 595 600m).

4.1- Profil « S1 »

La répartition sur un profil vertical de l'ensemble de faciès d'altération est :

- la « cuirasse ferrugineuse », scoriacée, alvéolaire et très dure. Dans certains endroits elle est pisolithique ;
- la latérite brun violacée parfois jaunâtre qui renferme de concrétions ferrifères, c'est la « latérite rouge ». La puissance de cet horizon est faible, de 1 à 5 mètres environ ;

- la « latérite jaune » ou « saprolite fine » où la structure de la roche-mère est reconnaissable à la base de cet horizon ; donnée par la figure 4 suivante dont on distingue, de haut en bas :

Le contact entre la saprolite fine et la saprolite grossière est progressif.

- la « saprolite grossière », la roche-mère péridotite serpentinisées est altérée mais la structure originelle est conservée. Ce niveau mesurant environ 1,20 m renferme des « mouches » de garnièrites ;
- la « roche-mère », elle est constituée essentiellement de péridotites plus ou moins serpentinisées, avec quelques fissures où tapissent des garnièrites.

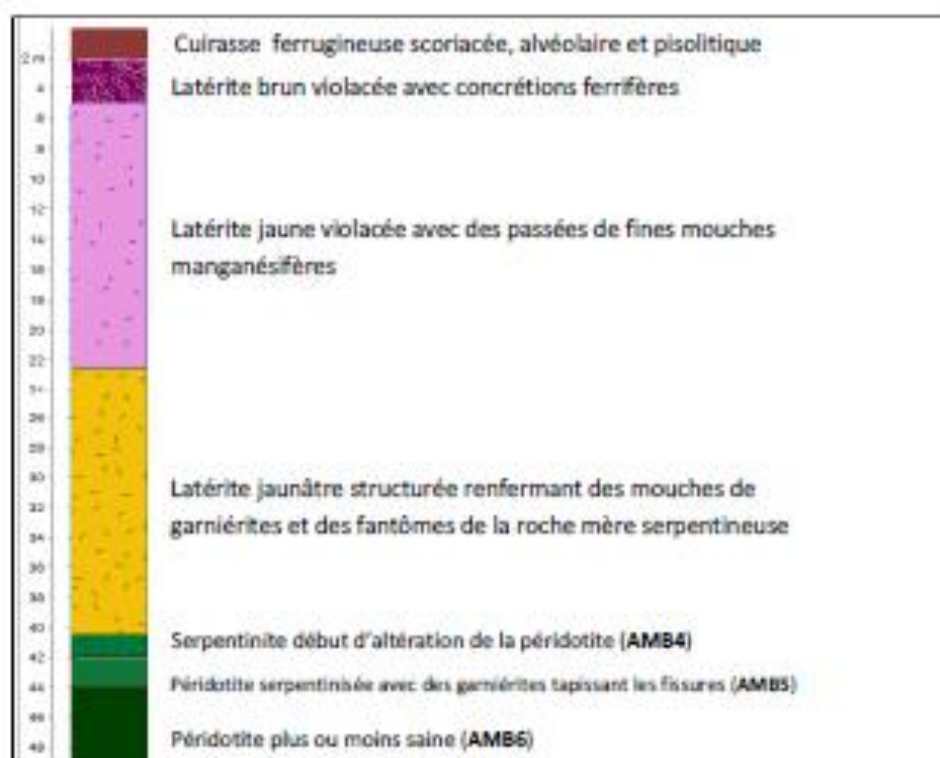


Figure 4 : Profil vertical du sondage S1 (Mandimbarison, 2012)

4.2- Zone C

Ce profil, situé sur le flanc d'un versant à 970 mètres d'altitude, présente une épaisseur de l'ordre de 8 à 10 mètres où l'on peut distinguer d'après la figure 5 cinq horizons :

- au sommet se trouve une mince couche de sol développée sur la cuirasse ;
- vient ensuite une couche de cuirasse ferrugineuse de 1 à 2m d'épaisseur ;
- suivie de latérite brun violacée avec des veinules d'hématite de 2m d'épaisseur ;

- enfin la latérite brun jaunâtre avec des veinules d'hématite sur plus de 2 m d'épaisseur.

Des lames minces et des sections polies ont été taillées dans les échantillons à la base du profil S1 tels qu'AMB 4, AMB 5, AMB 6. Et pour les échantillons terreux (AMB 23, AMB 24, AMB 25) et les cuirasses ferrugineuses (AMB 11, AMB 26 du haut du profil Zone C) ils sont taillés en sections polies.

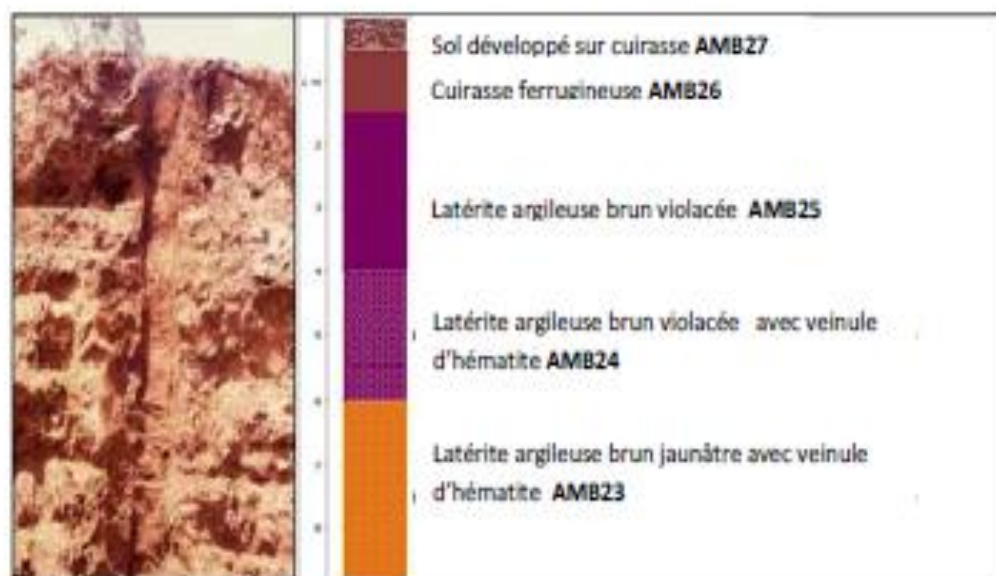


Figure 5 : Profil vertical de la « Zone C » (Mandimbiharison, 2012)

5. DESCRIPTION DES MINERAUX EN LUMIERE REFLECHIE

Les minéraux opaques ont été observés sur des sections polies en lumière réfléchie avec un microscope polarisant type « Olympus ». L'objectif x 10 est utilisé pour avoir une vue

d'ensemble de la section, mais pour les détails nous avons utilisé les objectifs x 40 ou x 50.

5.1- Section potie AMB 6 (péridotite serpentinisée)

Les noyaux d'olivine (gris clair), dont les bordures sont plus au moins corrodées,

sont isolés par de doubles cloisons serpentineuses (gris moyen) plus ou moins épaisses (Figure 6).

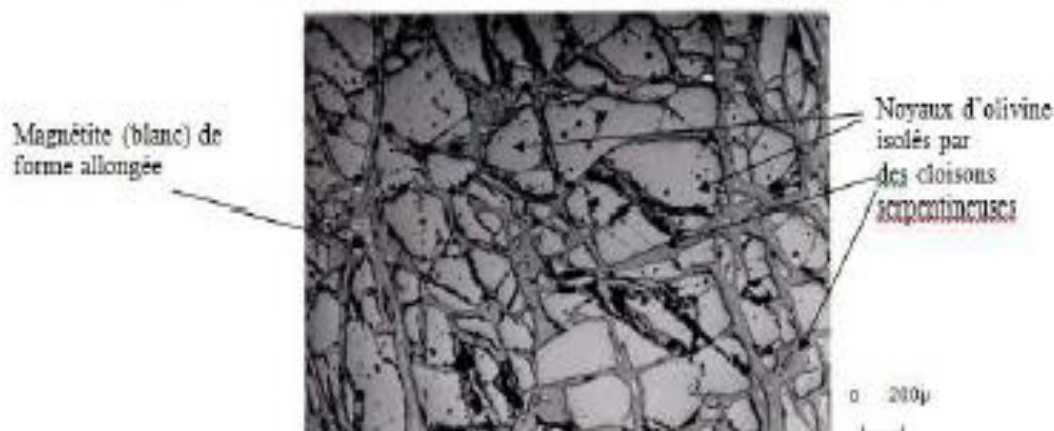


Figure 6: Vue d'ensemble des noyaux d'olivine légèrement corrodés en bordure mais isolés par des cloisons serpentineuses.

Dans le plan axial de ces cloisons serpentines est accumulée la magnétite

(blanc) sous forme de lignées (allongées) ou sous forme cubique (Figure 6).

Au sein de cette section polie, le degré d'altération ou de déformation des minéraux diffère d'un endroit à un autre. Là où il y a abondance de ces matières bruns jaunâtres (sombre), les bordures de

filonnets serpentins sont assez corrodés et leurs épaisseurs ont tendance à s'amenuiser et que les grains de magnétite, rencontrés à l'état frais contour net et automorphe, commencent à être corrodés et dans certains cas, la magnétite est légèrement altérée en maghémite (Figure 7). Ces matières brunes et jaunâtres (sombres) sont des produits ferrugineux libérés lors de l'altération de l'olivine.

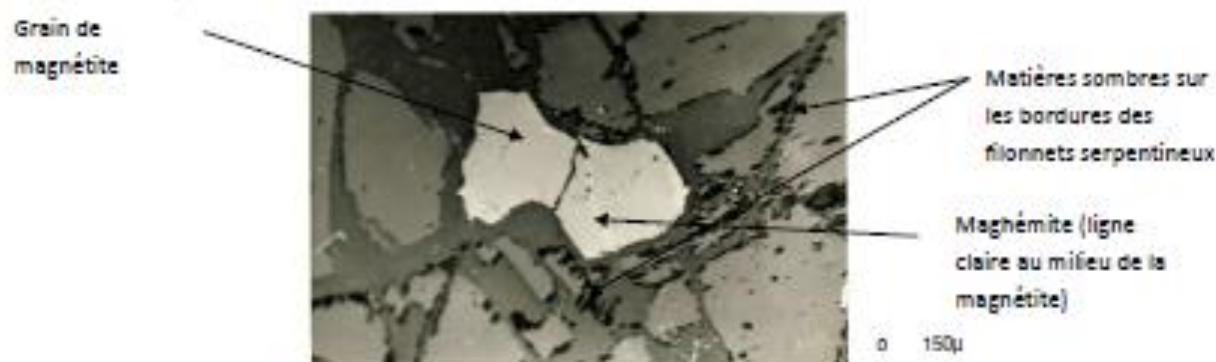


Figure 7 : Un grain de magnétite à contour net et filonnets serpentins corrodés

Toujours dans le plan axial de ces cloisons serpentines, on observe des rares cristaux blancs constitués d'hématite qui proviennent d'une phase de remplacement

de la magnétite en hématite (phénomène de martitisation) et au fort grossissement x 50 de cristaux de pyrite placés à côté de la magnétite (Figure 8).

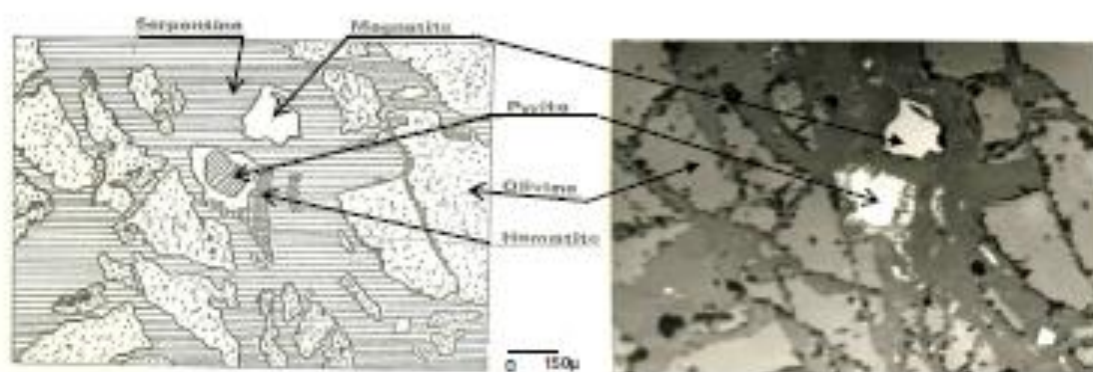


Figure 8 : Les cristaux d'hématite, magnétite et de pyrite au fort grossissement d'AMB6

5.2- Section polie AMB 5 (saprolite grossière)

Dans cette section, le réseau serpentinite est beaucoup moins marqué que dans AMB 6, mais les noyaux d'olivines possèdent des nombreux petits trous, à part les craquelures. Ce sont des trous de

dissolutions de l'olivine. Des petits granules de magnétites (blanc) abondent la plage, ils sont disséqués en bordure et ne sont plus automorphes. Leur dimension diminue par rapport à celle d'AMB 6 (Figure 9).

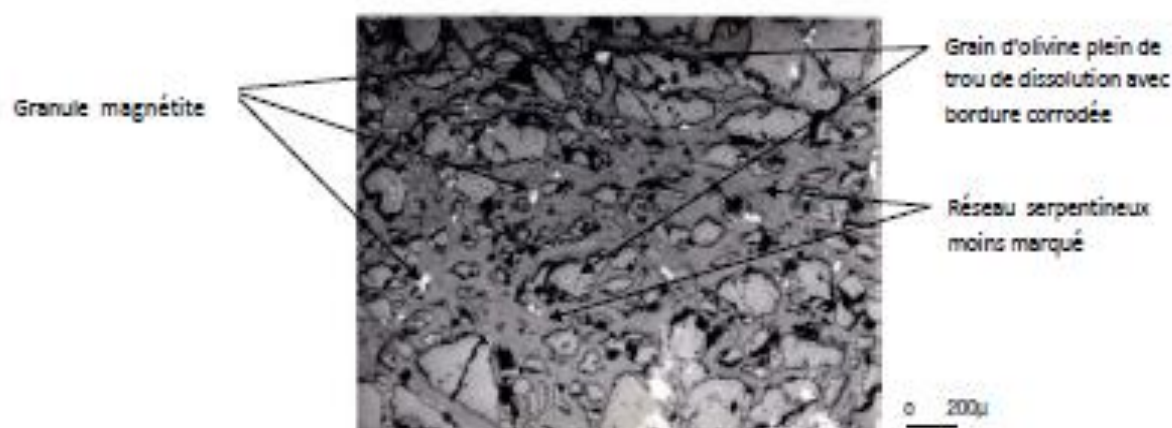


Figure 9: *Stade avancé de l'altération de l'olivine*

La figure 9 montre l'évolution de l'altération d'un grain d'olivine dont le produit final obtenu est la goéthite. Cette altération commence en bordure de grains d'olivine puis il y a épigénisation

progressive de l'olivine par l'hydroxyde de fer (goéthite).

Mais de grains mixtes de magnétite - ilménite dont le contact est marqué par un cordon d'hercynite $\text{Fe Al}_2 \text{O}_4$ et des exsolutions d'ilménite dans la magnétite ont été observés dans cette figure 10.

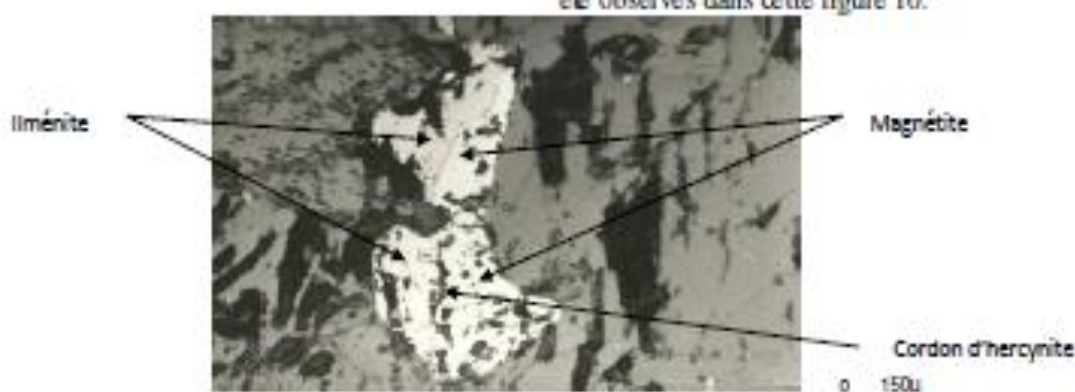


Figure 10: *Grain mixte de magnétite-ilménite*

Dans l'ensemble, l'ilménite est encore à l'état frais et se présente sous forme de banquettes. De très rares exsolutions de spinelles dans la magnétite ont été aussi observées ainsi que des grains sulfurés polyphasés qui s'altèrent et évoluent vers la goéthite (Figure 11).

Quelques points verts de dimension 10μ à peu près ont été remarqués au sein des noyaux d'olivine, ceux-ci représentent des « mouches » de garniérite.

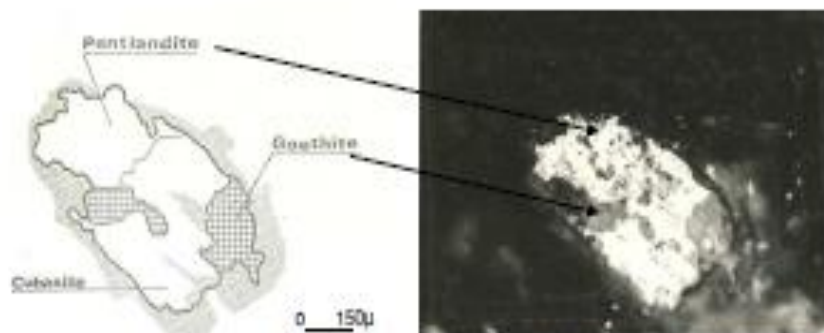


Figure 11 : Un grain sulfuré (pentlandite et cubane) évoluant vers la goéthite

5.3- Section polie AMB 4

Les granules de magnétite qui étaient automorphes subissent aussi la corrosion à leur bordure et parfois même craquelées. Quelques cas montrent une martitisation. A côté de ces minéraux : olivine, serpentine, magnétite, hématite et hydroxyde de fer, on

a observé surtout au fort grossissement, de grains sulfurés à pouvoir réflecteur élevé par rapport à la magnétite (figure 12). Ce sont : Pyrite, Pentlandite, Pyrrhotine. Ces grains de pentlandite sont disséminés dans les filonnets serpentineux.

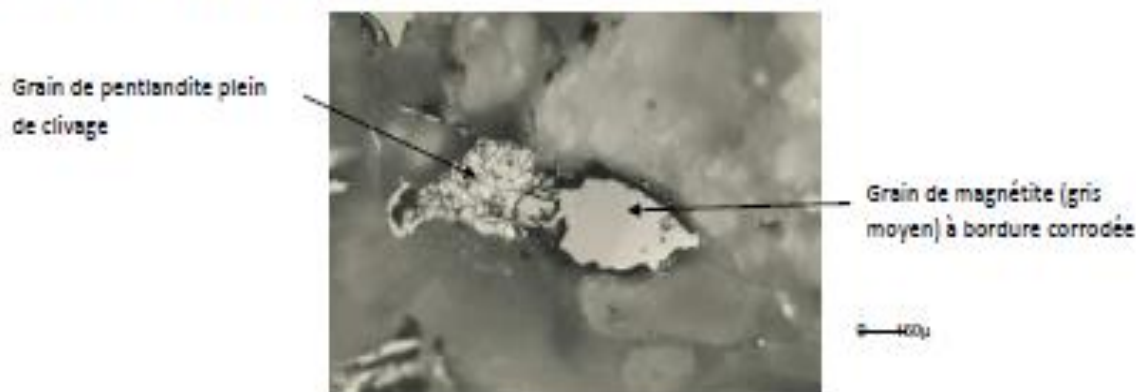


Figure 12: Association des grains d'oxyde de fer (magnétite) et de sulfure (pentlandite)

5.4- Section polie AMB 26 (cuirasse ferrugineuse)

Une vue d'ensemble permet de dire que la section est remplie de structures nodulaires qui sont essentiellement constituées de goéthites (figure 13).

Des matières collomorphes sous forme de fibres constituent la partie extérieure de ces nodules et selon Besset (1978), ce sont des gels ferriques.

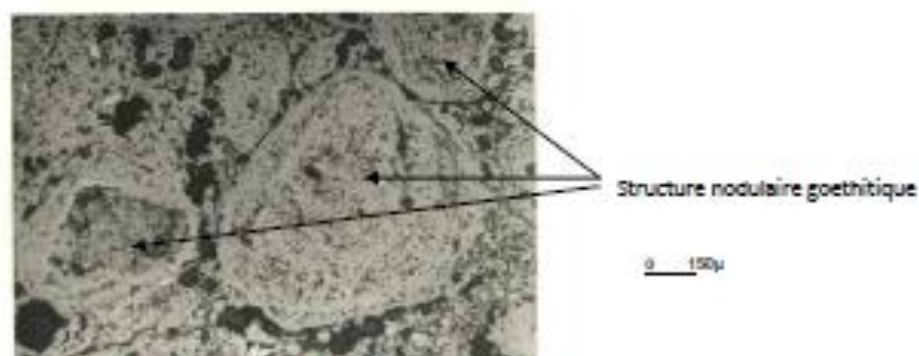


Figure 13 : *Cuirasse ferrugineuse sous forme*

Le fort grossissement permet d'observer des cristaux d'ilménite au centre de ces nodules qui sont remplacés progressivement par de l'hématite qui forma alors des agrégats poreux, sa structure devient alors squelettique. La figure 14 montre les composants de la structure nodulaire.

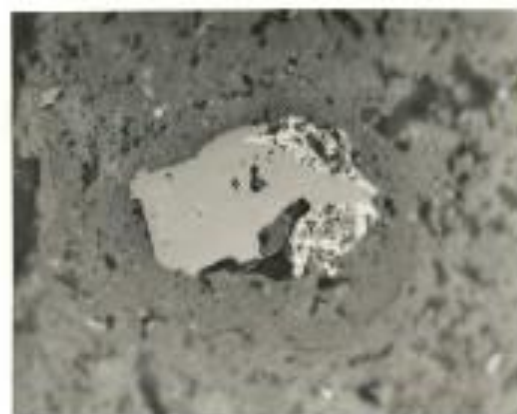
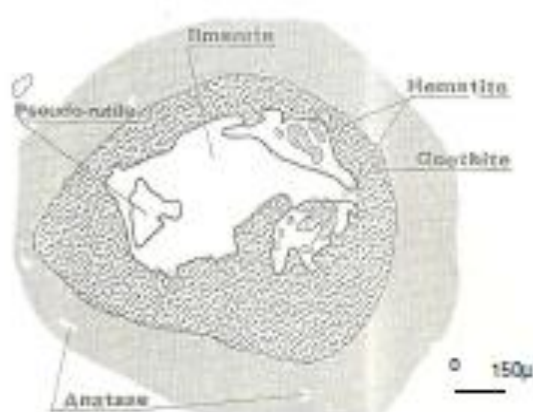


Figure 14 : Les différents composants de la structure nodulaire au fort grossissement : goéthite, hématite, magnétite, ilménite

En fait, dans cette section polie, c'est la goéthite qui prédomine ; la magnétite et l'hématite sont en voie de transformation ou déjà transformées en goéthite. Et à côté de ces évolutions magnétite – hématite –

goéthite, l'ilménite qui est pour la plupart encore intacte et présentant une structure plus ou moins automorphe dans l'ensemble, est aussi assez fréquente dans la section (figure 14).

5.5 - Section polie AMB 11 (cuirasse ferrugineuse)

L'ensemble de la plage de couleur grise est constitué de goéthite. On voit des structures concentriques qui indiquent une phase d'altération et dont le pourtour est constitué de fibres (gel ferrugineux). Des grains, souvent automorphes d'ilménite et encore à l'état frais, sont disséminés dans cette plage de goéthite.

La magnétite fraîche ne se rencontre pas dans la section, elle est déjà oxydée et se

transforme en hématite (martitisation) qui est aussi à l'état de transformation vers la goéthite. La figure 15 montre un fantôme de magnétite complètement altéré en hématite et qui donne une texture particulière appelée « martite ». Et dans le plan de clivage d'ilménite, on voit des grains d'hématite qui sont en voie de dégradation pour donner de la goéthite.

En fait au fort grossissement, on peut déterminer trois phases :

- la phase magnétite – hématite – goéthite (figure 15) ;
- la phase hémio – ilménite ;
- la phase ilménite – magnétite – maghémite.

On n'a pas remarqué la décomposition d'ilménite vers l'anatase.



Magnétite transformée en
Hématite

Goéthite

Mouche de garnierite

0 200µ

Figure 15: Structure (111) résiduelle de magnétite transformée en hématite dans une plage de goéthite

5.6- Section polie AMB 25 – AMB 24 – AMB 23

Pour les échantillons terreux (latéritiques), des grains de dimensions variables et de formes différentes sont répartis dans une matrice résineuse. En général ces grains sont plus ou moins arrondis à contour régulier et fortement corrodés. L'ensemble de la plage est dominée par la goéthite caractérisée par des réflexions internes rouges très abondantes et dans certaine plage on peut distinguer de granules d'or (figure 16). Ces goéthites présentent de structures nodulaires souvent jointives (figure 13). Certains grains sont très dégradés et possèdent une structure

squelettique ou spongieuse car on y remarque beaucoup de trous, de pores et de nombreuses fibres fines. Quelques grains d'anatase de forme cubique peuvent se rencontrer dans cette structure vacuolaire (figure 17). Dans certains endroits, la réflexion interne est quelquefois jaunâtre. Ce qui indique une autre variété d'hydroxyde de fer, le « stilpnosidérite ». Quelques cristaux d'hématite sont observés dans cette masse de goéthite. Ils sont corrodés et subissent de « lessivage », de transformations, d'où leur structure vacuolaire ou spongieuse (figure 17).

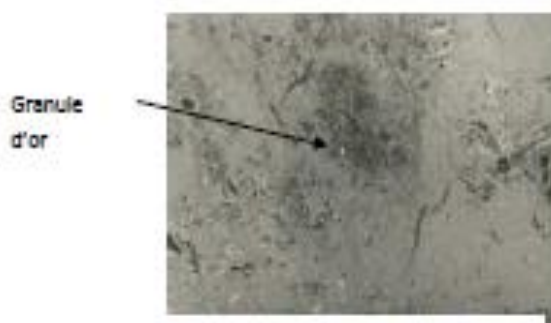


Figure 16 : Granule d'or (blanc) dans une matrice latéritique (goéthite)

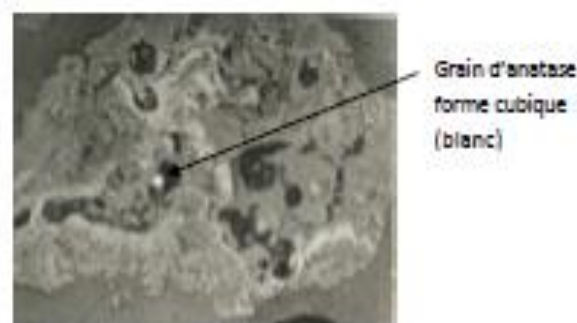


Figure 17 : Structure spongieuse de goéthite



Figure 18 : Grain complexe à structure nodulaire

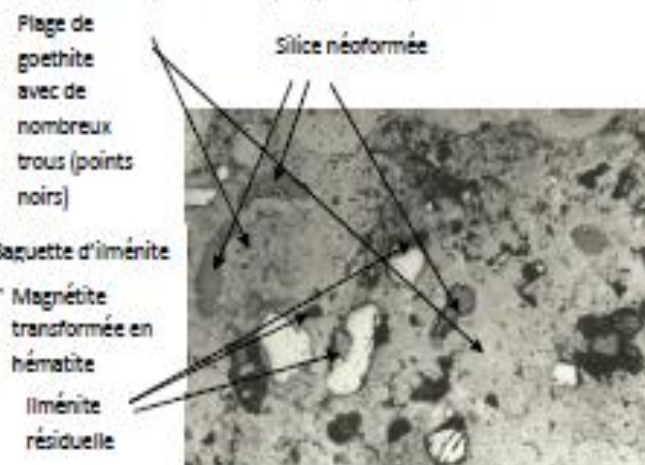
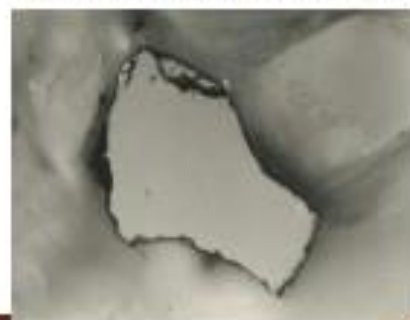


Figure 19 : Grains de silice et d'ilménite noyés dans la goéthite



0 200µ
Γ

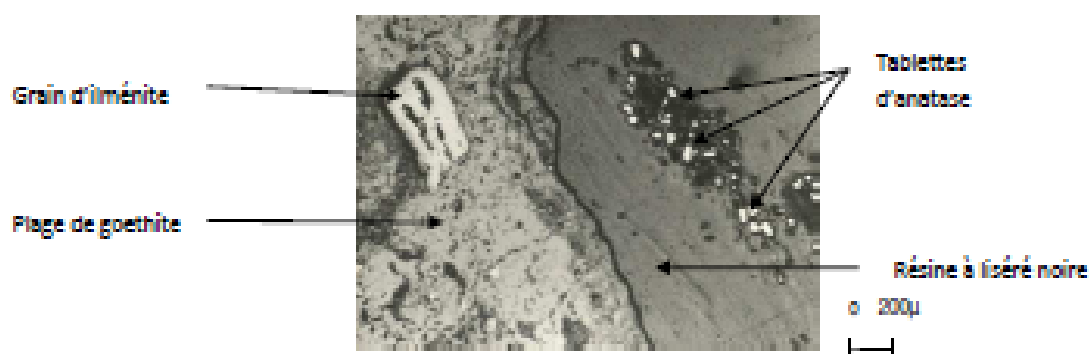


Figure 21 : Libération et reprise des anatases dans la résine lors du polissage

De structures résiduelles d'hématite qui nous montrent la phase de remplacement de l'hématite à la goéthite.

A l'intérieur de nombreux grains (goéthite) à contour plus ou moins régulier, on voit des nombreux filonnets gris qui sont en forme de fibres. Ce sont des produits amorphes colloïdaux présentant une alternance de filonnets bruns et de filonnets gris clairs. Des grains d'ilménite encore intacts sont observés dans certaines plages, mais dans la plupart des cas, ils présentent de craquelures et sont corrodés en bordure. La structure résiduelle d'ilménite transformée en hématite et l'existence de fantômes de magnétite,

reconnaissables même si c'est fortement dégradée et transformée en goéthite (figure 18,19).

Dans certaines fissures on rencontre de petits points verts de garniérile. Des cristaux d'anatase blanc en L.N. (figures 17,21), en forme de fer de lance ou cubique ont été observés, ainsi que des rares granules d'or et de grain de chromite (figures 16, 20) noyé dans une matrice latéritique (masse goéthitique). Dans la figure 21, le grain d'ilménite est quasi intact surtout la bordure mais les anatases sous forme cubique sont facilement libérées de la masse goéthitique par polissage.

6. DESCRIPTION DES MINÉRAUX EN LUMIÈRE TRANSMISE

L'observation des minéraux transparents a été faite sur les échantillons AMB 4, AMB 5 et AMB 6 qui sont constitués de

péridotites serpentinisées plus ou moins altérées. La détermination est faite avec un microscope polarisant « ZEISS ».

6.1- Echantillon AMB 6

L'observation au microscope nous montre essentiellement des cloisons serpentineuses, des noyaux d'olivine et des minéraux opaques (Figure 22).

Les minéraux serpentineux se présentent en fibres allongées d'apparence amorphe et sont de deux espèces : une espèce lamellaire longue et épaisse et une espèce de fibres

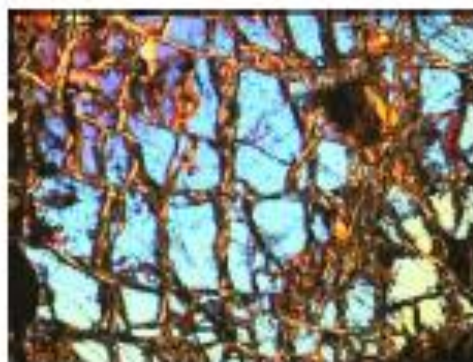
perpendiculaires à la première. Ces fibres de serpentines en elles – mêmes sont représentées par des alternances de fibres de couleurs brunâtre et jaunâtre.

Et en général les bordures de ces minéraux fibreux sont brunâtres.

Au fort grossissement les craquelures au sein des grains d'olivine sont constituées

essentiellement des fibres brunâtres correspondant aux oxyhydroxydes ferriques amorphes.

Et à l'intérieur des minéraux fibreux serpentineux se trouvent des lignées de minéraux opaques sous forme allongée et



Cette lame mince et surtout caractérisée par l'abondance des trous de dissolution de l'olivine (figure 23). L'épaisseur des minéraux serpentineux fibreux est très réduite et ces minéraux sont fortement



Figure 23 : *Fibres serpentineux en réseau maillé perpendiculaire*

L'altération de l'olivine se manifeste par la corrosion en bordure de grain (Figure 24).

- le pyroxène facilement distingué de l'olivine par sa couleur brun foncé à brun clair (LN) et surtout par son clivage et son extinction droite. C'est de l'Enstatite.
- l'amphibole très remarqué avec son clivage

quelquefois ces cristaux opaques sont automorphes.

o 200µ



Figure 22 : *Noyaux d'olivines entourés par des cloisons serpentineuses*

colorés en brun et en général ils forment de « réseau maillé perpendiculaire » (figure 23). Même les olivines à structure grenue ont des teintes brunâtres dans certains endroits de la lame.

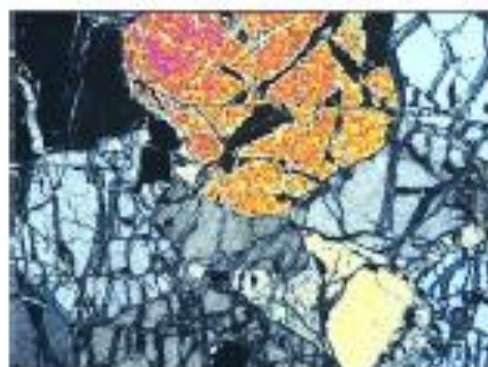


Figure 24 : *Grain d'olivine à bordure corrodée*

A part de ces grains d'olivine et ces cloisons serpentineuses on rencontre aussi dans cette lame d'autres minéraux tels que : losangique et par sa couleur jaune un peu brunâtre (LN).

Ces minéraux sont parfois recoupés par des fibres serpentineuses, et dans le plan de ses clivages on observe des teintes brunâtres.

6.3- Echantillon AMB 4

L'épaisseur des fibres serpentineuses est réduite par rapport à celle de AMB 6 mais elles sont beaucoup plus abondantes et que leurs bordures sont fortement corrodées dans la plupart des cas.

Les contours des olivines sont dans la plupart de cas fortement dégradés et corrodés (Figure 25) en abandonnant un résidu d'hydroxydes de fer qui envahit progressivement le plan de clivage des olivines, c'est le début de l'altération. Petit à petit ces hydroxydes de fer remplacent l'olivine qui finit par disparaître et laisser la place aux hydroxydes de fer partiellement

cristallisés en gréthites. Les réseaux serpentineux sont à leur tour altérés d'abord leurs axes ou leurs clivages sont envahis par des produits ferrugineux qui rendent les fibres serpentineuses rougeâtres. Puis les filonnets serpentineux deviennent nettement dégradés en abandonnant des oxyhydroxydes ferrugineux d'abord amorphes et qui cristallisent progressivement en gréthite qui est la phase ultime de l'évolution de l'altération de roche péridotite serpentinisée.

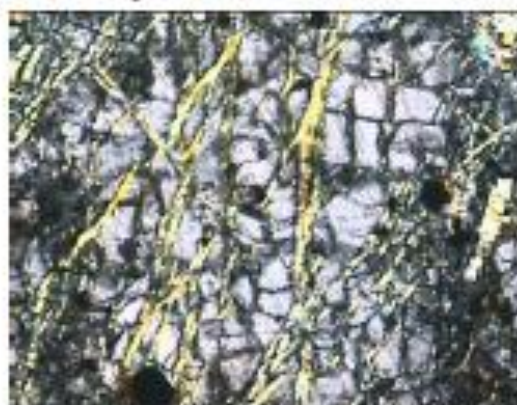


Figure 25 : Stade avancé de l'altération

7.- DISCUSSIONS

L'observation au microscope optique (en lumière réfléchi surtout) nous a permis de suivre les transformations successives des minéraux silicatés primaires qui sont due à l'altération hydrothermale et superficielle.

Comme la roche mère est une péridotite serpentinisée (Dunite serpentinisée), nous allons suivre l'évolution de l'olivine, des minéraux serpentineux et aussi, des oxydes de fer et de titane.

L'olivine est le plus souvent, partiellement et parfois totalement, transformé en serpentine. Cette transformation qui a lieu en profondeur est connue sous le nom de transformation *hypogène*, elle est due à l'altération hydrothermale.

Au début les cristaux de l'olivine sont de tailles très variable et plus ou moins

automorphes avec des craquelures et séparés par des cloisons serpentineuses.

Puis l'olivine commence à être altérée. Cette altération se manifeste par la corrosion de la périphérie qui laisse parfois des vides qui sont envahis par des produits ferrugineux brunâtres. Ces substances ferrugineuses s'accumulent dans les facteurs qui pénètrent les minéraux, entraînant ainsi la fragmentation des noyaux d'olivine en petits nodules résiduels noyés dans une masse fortement colorée par des hydroxydes de fer. Suivant Trescasses (1975), Besset, (1978); Pelletier (1983); l'olivine est pseudomorphosée en oxyhydroxydes ferriques. Tandis que les cristaux d'olivine disparaissent partiellement ou totalement, les cloisons serpentineuses commencent à s'altérer. Du matériel ferrugineux issu

d'hydrolyse des cristaux d'olivine, vient pigmenter d'abord les contours de ces cloisons serpentineuses, puis les plans de clivages.

Le réseau serpentineux se teinte de plus en plus, on assiste donc à un remplacement progressif du réseau par du matériel ferrugineux. C'est dans l'horizon supérieur « saprolite fine » que la serpentine achève sa disparition mais son fantôme ferrugineux subsiste et évolue progressivement vers la goëthite.

La magnétite qui se trouve dans le plan axial du réseau serpentineux subit aussi une transformation dite « martitisation ». L'hématite dans le dernier stade d'altération s'est évolué en goëthite. On remarque aussi l'apparition de quartz néoformé. L'ilménite est parfois intacte au cours de l'altération sauf que leur bordure est corrodée et elle s'évolue aussi vers l'anatase. Cette évolution se passe dans la partie supérieure de profil. Nos observations sont conformes à celles des autres auteurs (Pelletier, 1983 ; Trescasses, 1979 ; Nahon, 1979 ; Yongue R. et al , 1998).

Vient ensuite la serpentine qui subsiste assez longtemps dans les saprolites et permettant ainsi à la préservation de la structure originelle des péridotites. Sa destruction progressive évolue vers la goëthite (oxyhydroxyde ferrique).

Donc on peut se résumer schématiquement l'évolution de l'altération de la « dunite serpentinisée » comme suit :

- olivine + serpentine ;
- olivine + serpentine + minéral phylliteux (type nontronite) + gels silico-ferriques ; serpentine + gels ferriques ;
- oxyhydroxydes ferriques.

A partir des observations microscopiques, nous pouvons l'évolution et la progression de l'altération de la roche-mère « dunite serpentinisée ». La figure 26 suivante illustre cette évolution.

En bref, l'olivine est le premier minéral touché par l'altération et les produits finaux de son altération *supergène* sont essentiellement des oxyhydroxydes ferriques.

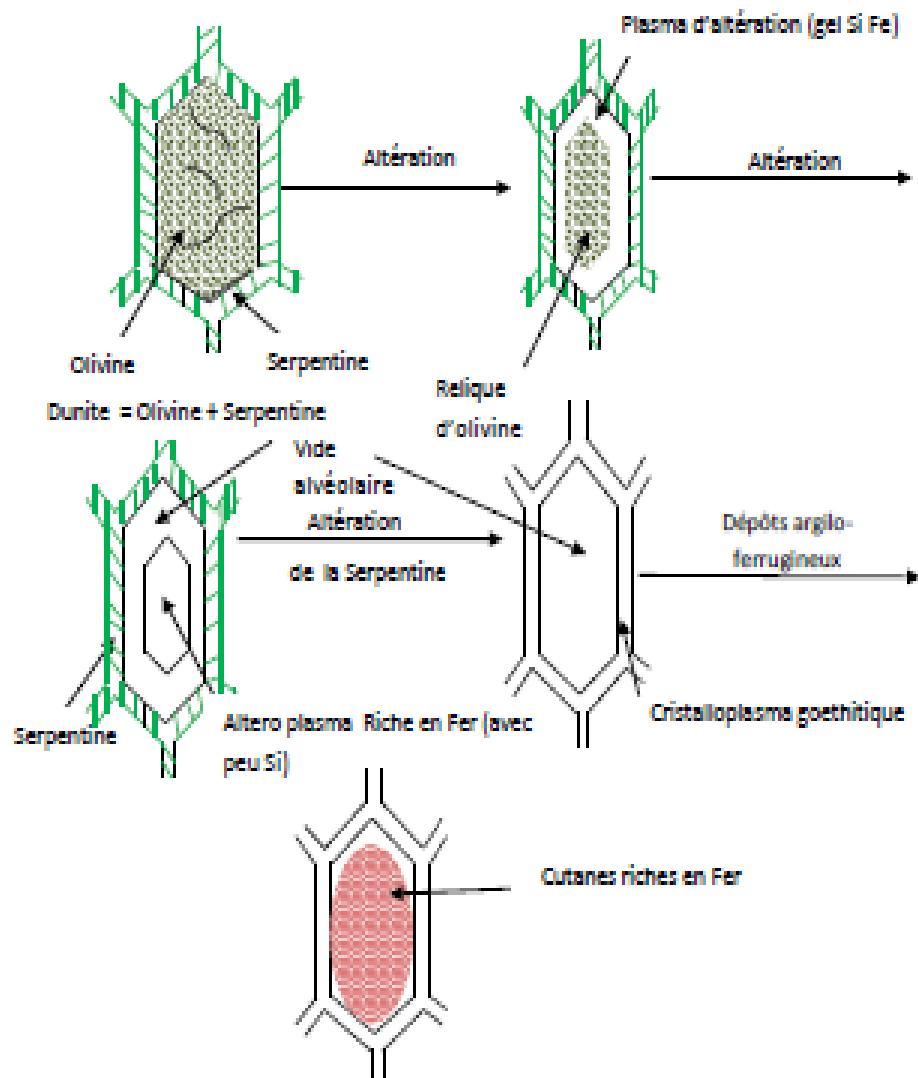


Figure 26 : Modèle d'évolution de l'olivine et des cloisons serpentineuses de la roche-mère « Dunite serpentinisée » (Mandimbiharison, 2012)

8. CONCLUSION

Dans la région d'Ambatovy, la roche ultrabasique, la Dunite, subit d'abord une profonde altération hydrothermale (serpentinisation hypogène) puis survient l'altération météorique qui a modifié progressivement la structure originelle et ne laissant à la fin qu'un résidu goethitique. Les altérations hypogène et supergène ont conduit au développement d'un gisement latéritique nickelifère et cobaltifère contenant cinq niveaux du haut en bas : Cuirasse Ferrugineuse (V), Latérite Rouge (IV), Latérite Jaune (III), Saprolite grossière (II) et Roche mère (I).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [1] Avias J., 1978, L'évolution des idées et des connaissances sur la genèse et sur la nature des minerais de Ni en particulier latéritiques, de leur découverte à nos jours. Bulletin Bureau de Recherches Géologique et Minière, Section II, 3 p 165 – 172.
- [2] Besset F., COUDRAY J., 1978, Le comportement du nickel dans les processus d'altération latéritique des péridotites de Nouvelle Calédonie. Bull. B.R.G.M. Section II, N° 3, 1978, p 207 – 223.
- [3] Besset F., 1978, Localisation et répartition successives du nickel au cours de l'altération latéritique des péridotites de Nouvelle Calédonie. Mémoire C.E.R.G.E. Montpellier Tome XV.
- [4] Delbos L., Rantoanina M., 1961, Les gisements fer-nickel des environs de Moramanga T.B.G. N° 106. (Service Géologique de Madagascar)
- [5] Mandimbiharison A. J., 2007, Rapport de stage sur la télédétection et traitement des données géologiques. Musée Royal de l'Afrique Centrale, Tervuren, Belgique. Inédit.
- [7] Mandimbiharison A. J. et al. 2012, Evolution minéralogique et géochimique du profil latéritique nickélicifère d'Ambatovy. Madamines, ISSN 2220-0681, vol. 4, 2012.
- [8] Nahon D., 1979, Cuirasses siliceuses ou silicrètes nickélicifères dans les profils d'altération des roches ultrabasiques de Côte d'Ivoire. Sci. Géol. Bull. 32, p 198-197.
- [9] Pelletier B., 1983, Localisation du nickel dans les minerais « garniéritiques » de Nouvelle Calédonie. Sciences Géol., Mém. 73, p 173-183.
- [10] PGRM (Roig J. Y. et al.) 2012, Nouvelles cartes géologiques et métallogéniques de Madagascar à l'échelle du millionième. Symposium International sur la Géologie de la République de Madagascar, 28-29 juin 2012, Antananarivo
- [11] Trescasses J. J., 1975, L'évolution géochimique supergène des roches ultrabasiques en zone tropicale. Formations des gisements nickélicifères de Nouvelle Calédonie. Mémoire O.R.S.T.O.M. 78, (1975) 259p.
- [12] Trescasses J. J., 1979, Remplacement progressif des silicates par les hydroxydes de fer et nickel dans les profils d'altération tropicale de roches ultrabasiques. Accumulation résiduelle et épigénie. Sci. Géol., Bull. 32, 4, p 181-188
- [13] Yongue F. R. et al., 1998, Séquence d'altération des roches ultrabasiques dans la région de Lomé, Sud-Est du Cameroun, Ann. Fac. Sci. Univ Yaoundé, série Sc Nat et Vie Vol 34, N° 01 pp 1-17.
- [14] Zeissink H. E., 1969, The mineralogy and geochemistry of a nickélicifère laterite profile (Greenvale, Queensland, Australia). Mineral. Deposita (Berl.) 4, p 132-152.

Utilisation des pouzzolanes d'Alakamisy Anativato en briques, dans le District de Betafo, Région Vakinankaratra

Ramanantsoa T.1 Mandimbiharison A. J 2

1) École Normale SFM/FLM Fandriana, Option Scientifique, BP 23 Fandriana 308, Madagascar, lanitrafi@gmail.com

2) Université d'Antananarivo, École Supérieure Polytechnique, Département de Géologie, BP1500 Antananarivo 101 Madagascar, raory@yahoo.fr

RÉSUMÉ

Les pouzzolanes ont de nombreuses utilisations dans divers domaines : bâtiments (fabrication des bétons légers ou caverneux..), construction routière (construction des assises et structuration des chaussées, comme Matériaux Sélectionnés..), industrie cimentière (Ajout), agriculture (drainage et amendement des sols..). A Madagascar ces diverses utilisations sont méconnues des constructeurs et du grand public. C'est pourquoi il nous a paru nécessaire de valoriser les pouzzolanes dans les environs de Betafo dans le domaine de bâtiment, en occurrence pour la fabrication des briques en pouzzolane. Des essais, analyses et expérimentations ont été effectués au sein du Laboratoire National des Travaux Publics et de Bâtiments (LNTPB). Pour cela nous avons confectionné des briques sous forme d'éprouvette (moule cylindrique) à partir des pouzzolanes noires (PN) et rouge mélangé (PRM) selon les teneurs en ciment (6 ,8 et 10%) et les granulométries (4/10 ; 2/4 ; 0,5/2 ; 0/0,5) pour déterminer les résistances à la compression de chaque essai.

Mots-clés : *pouzzolanes, briques, résistance à la compression, utilisation, Betafo.*

ABSTRACTS

Pozzolans have many uses in various fields: buildings (manufacture of light or cavernous concrete..), road construction (construction of foundations and structuring of pavements, as Selected Materials...), cement industry (Addition..), agriculture (drainage and soil amendment...). In Madagascar these various used are little known by manufacturers and the general public. This is why it seemed necessary to us to develop the pozzolans in the surroundings of Betafo in the building sector, in fact for the manufacture of bricks in pozzolan. Tests, analyzes and experiments were carried out within the National Laboratory of Public Works and Buildings (LNTPB). For this, we made bricks from black (PN) and mixed red (PRM) pozzolanas according to the cement contents (6, 8 and 10%) and the grain sizes (4/10;2/4;0,5/2;0/0,5) to determine the compressive strengths of each test.

Keywords: *pouzzolans, bricks, compressive strength, use, Betafo.*

I- INTRODUCTION ET GENERALITES

De nombreuses pouzzolanes se trouvent dans la Région de Vakinankaratra, dans le District de Betafo et en particulier dans la Commune Rurale d'Alakamisy-Anativato. Elles peuvent servir comme matériaux routiers (Matériaux Sélectionnés ou M.S.) ou de construction en bâtiment (béton léger..) ainsi que des liants. Cette pluralité de nouvelle combinaison offre aux constructeurs des produits de plus en plus performants. De nos jours, les bétons légers font partie de la gamme des bétons spéciaux développés par des chercheurs et dans ce cas, on utilise des granulats légers dont leurs caractéristiques sont programmables par la connaissance des propriétés des matériaux, du mélange, des adjuvants et des conditions de formulation (*Moussa A .K 2009*).

Malgré la pluralité d'utilisation de pouzzolane la question qui traverse notre esprit est ce que la pouzzolane naturelle rencontrée à Alakamisy Anativato peut-elle être utilisée pour confectionner des briques? Avec une réponse affirmative deux hypothèses ont été émises :

- D'abord il faut faire le choix de la granulométrie de pouzzolane ;
- Puis avec l'expérimentation définir la teneur du liant (ciment) à utiliser.

L'objectif principal est de déterminer lors de l'expérimentation la granulométrie convenable avec la teneur en ciment pour obtenir une brique ayant une bonne résistance à la compression.

Dans cet article il sera question d'exposer les résultats des essais et des expérimentations pour confirmer les hypothèses proposées.

1.1 Sitologie

La Commune Rurale d'Alakamisy Anativato se trouve dans le District de Betafo, Région de Vakinankaratra. Elle est située à 21km au sud-ouest d'Antsirabe suivant la RN 34 (Figure 1). Cette commune a une superficie de 17,60 km² et compte 8 fokontany : Alakamisy, Ambalakatra, Ampamelomana, Antovontany, Iakarina, Imanja Soamanandrany et Soavina –Belanitra (PCD *Alakamisy Anativato*, 2015). Elle est délimitée :

- au Nord par les Communes Rurales de Ambohijatovo, Andranomafana;
- au Sud par la Commune Rurale d'Alakamisy Marososona;
- à l'Est par la Commune Rurale de Tritriva ;
- à l'Ouest par la Commune Rurale de Betafo, et de Mahaiza.

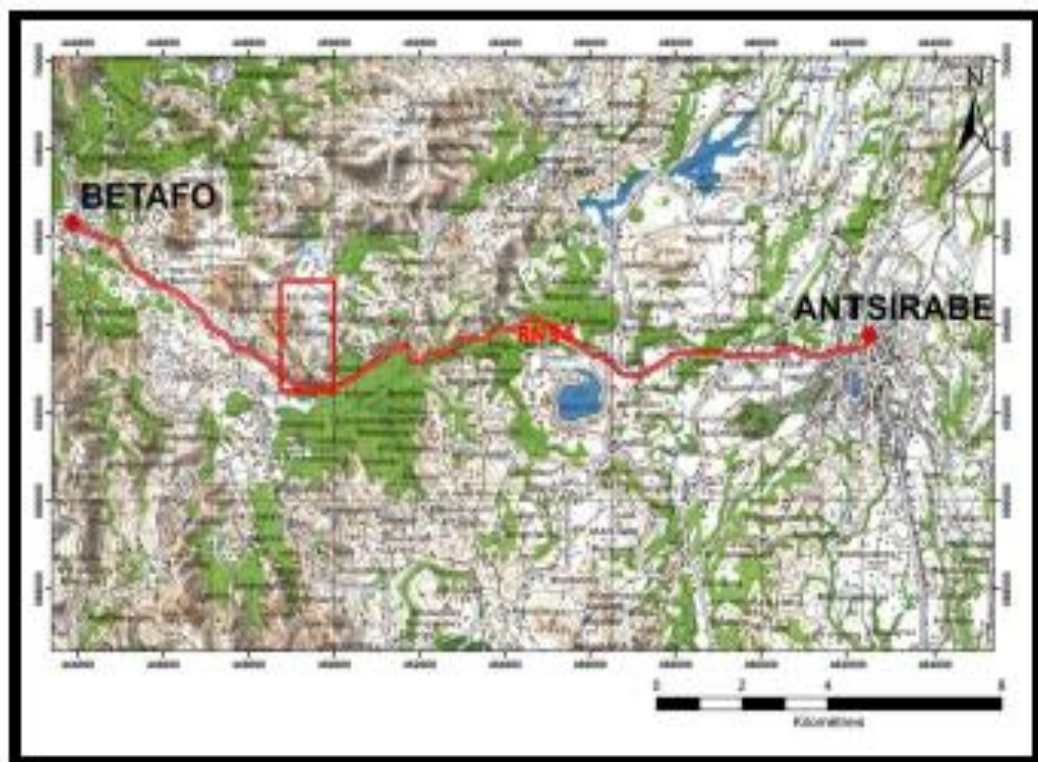


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Sur le plan morphologique, la zone est caractérisée par une succession des monts (Iavoko 1817m, Antsifotra 1788m.) et des vallées plus ou moins larges occupées par des rizières. Certaines collines sont entaillées par de l'érosion en lavaka (figure 2) et que dans certains endroits quelques

appareils volcaniques (cône, cratère) sont conservés (figure 3) et le sol noir n'est autre que des cendres volcaniques très fertiles.



Figure 2. Versant d'une colline entaillée par l'érosion en lavaka



Figure 3 : Cône et cratère conservés

Du point de vue géologique. (*Besairie H. 1962*), l'axe Antsirabe – Betafo y compris notre zone d'étude présente deux entités géologiques bien distinctes (figure 4) :

- ❖ La formation volcanique récente du Vakinankaratra représentée par le basanite, le basanitoïde et les pouzzolanes ;
- ❖ La formation de socle précambrien matérialisée par la migmatite granitoïde.
- Basanite et Basanitoïde

Ces 2 types de roches ne se rencontrent que dans la région volcanique d'Antsirabe-Betafo. Elles forment dans cette région des puy très remarquables qui sont les monts volcaniques de l'Iavoko et de l'Antsifotra. avec une conservation parfaite particulièrement dans le flanc Sud et Sud –Ouest. La pouzzolane se trouve surtout sur le flanc et le sommet de la colline, tandis que les gros blocs (basanite) se placent dans les bas-fonds.

- Migmatite granitoïde

Le flanc Sud du mont d'Antsifotra montre un très bel affleurement de migmatite granitoïde. C'est une roche migmatitique à fort pourcentage d'élément granitique, ou encore comme de granite folié leucocrate dans lesquelles les minéraux ferromagnésiens tel que biotite, amphibole et parfois grenats disposés en minces lits appartiennent à une roche métamorphique préexistante. Du point de vue association minéralogique : aucun minéral de métamorphisme autre que l'amphibole et la biotite n'a été observé dans la migmatite granitoïde.

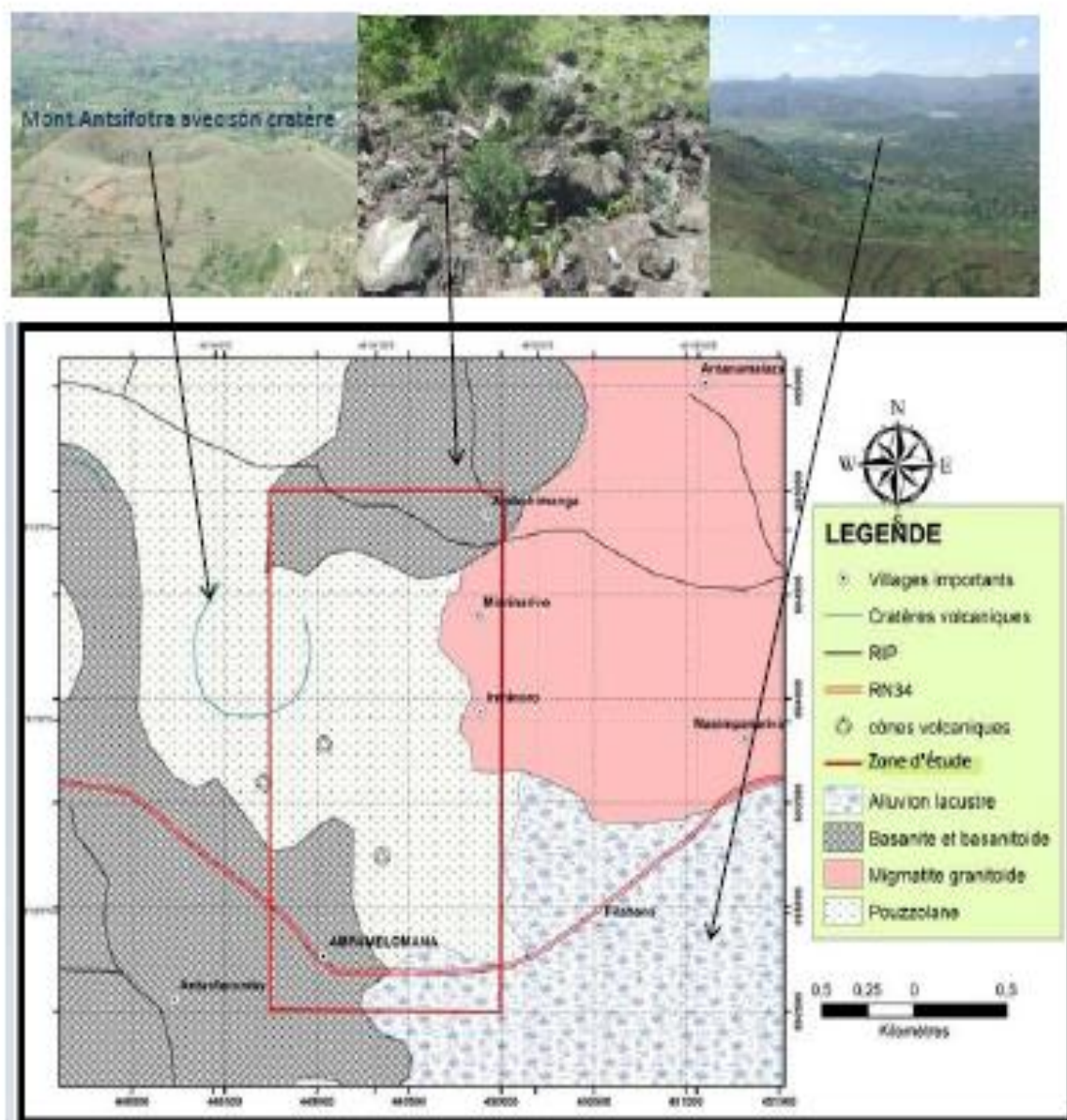


Figure 4 : Carte géologique de la zone d'étude

I.2 Description et caractéristiques des pouzzolanes

Définition de pouzzolanes

La pouzzolane est une roche naturelle constituée par des scories volcaniques de texture scoriacée et alvéolée de couleur allant du noir au rouge en passant par gris, brun violacé et essentiellement composée de silice (SiO_2), d'alumine (Al_2O_3) et d'oxyde ferrique (Fe_2O_3). Cette variation de couleur des pouzzolanes est liée au rapport des pourcentages pondéraux des Oxydes Ferreux et Ferriques dans la roche ($f = \text{FeO}/\text{Fe}_2\text{O}_3$) (Bagarre, 1987).

Mode de formation des pouzzolanes

La pouzzolane appartient à la famille des roches éruptives qui sont composées de roches plutoniques et de roches volcaniques.

Les roches volcaniques se divisent en deux groupes tels que les laves et les projections, et les pouzzolanes appartiennent à ce dernier groupe. Les volcans caractérisés par des explosions violentes projettent des débris de tout calibre. Les matériaux les plus fins, constitués de cendres, peuvent être transportés par le vent et tomber en pluie loin du centre d'émission, c'est le cas des pouzzolanes (Figure 6).

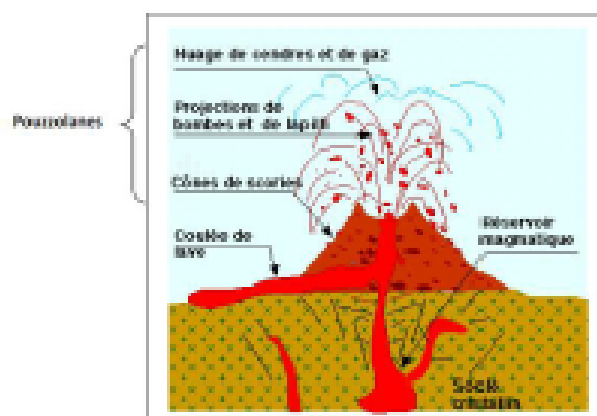


Figure 6 : Formation des Pouzzolanes (klouky.free.fr/Histoire/les volcans)

Caractéristiques des pouzzolanes

La première caractéristique de pouzzolane est sa capacité de fixer l'Oxyde de Calcium (Chaux) en présence d'eau pour donner des composés stables « **Silicate de Chaux** » possédant des propriétés de **liant hydrauliques** de ciment. C'est l'effet pouzzolanique et pour que la pouzzolane soit utilisée dans la fabrication du ciment, elle doit avoir un indice de pouzzolanité $I_p > 75$.

Selon la norme française NFP18 310 la composition des pouzzolanes naturelles doit être conforme au Tableau 1 suivant.

Tableau 1- Norme française NFP18 310 sur la composition de pouzzolane (in Benkaddour M. 2009)

SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	MgO	I_p
42 à 55%	12 à 24%	8 à 20%	4 à 11%	1 à 10%	≥ 75

La compilation des résultats d'analyse chimique des pouzzolanes dans les environs de Betafo est représentée dans le tableau 2 suivant pour comparer avec la norme française.

Tableau 2 : Compilation de toutes les moyennes des résultats des analyses chimiques dans des sites situés dans les environs de Betafo.

Localité	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	Ip
Sur l'axe RN34 du PK16 au PK20	31,64	26,64	14,16	5,11	5,38	-
Sur l'un des monts Lavoko	42,4	17,24	14,62	6,54	7,28	-
Alakamisy Anativato	45,17	14,11	16,20	3,56	6,54	72,57
Tritriva	44,18	13,94	12,10	12,10	10,46	79,79

(Source *Mandimbiharison A. et al., 2014*)

Se référant aux teneurs des éléments majeurs décrits dans le Tableau 1, dans l'ensemble la composition des pouzzolanes collectés dans les 3 sites (Tritriva, Alakamisy Anativato et Lavoko) sont conformes à la norme française NFP18 310. Tandis que pour les pouzzolanes le long de l'axe RN34, la teneur en silice (SiO₂) est faible et que celle de l'alumine (Al₂O₃) est trop élevée.

La pouzzolane possède d'autres propriétés et qualités dont : la légèreté, l'isolation thermique et phonique, la résistance au gel et un bon accrochement du liant grâce à sa rugosité.

Des essais physique (densité du béton frais) et mécanique (résistance à la compression) des bétons confectionnés à partir des granulats de granite et de pouzzolane (de Tritriva) de granulométrie 0/7 (microbéton) ont été faits et représentés dans le Tableau 3 suivant pour montrer la performance du béton de pouzzolane combiné avec du ciment dosé à 350kg/m³.

Tableau 3- Densité du béton frais et résistance à la compression en 7jours/28jours

Type	Dosage	Poids (g)		Volume (cm ³)	Densité		Rc (Kg/cm ²)	
		7j	28 j		7j	28j	7j	28j
Pouzzolane	350	626	762,5	339,3	1,84	2,2	64,92	248,85
Granite		738	764,5	339,3	2,18	2,25	162,29	252,46
Pouzzolane	250	566	674	339,3	1,67	1,98	39,67	72,13
Granite		737	767	339,3	2,17	2,26	119,02	162,29
Pouzzolane	150	679	689	339,3	2	2,03	72,13	73,20
Granite		683	729	339,3	2,01	2,15	36,06	79,34

(Source *Mandimbiharison A et al., 2014*)

I.3 Généralités sur les différents types des briques

Les briques sont classées en 2 types différents : les briques de terre industrielle et les briques de terre cuite artisanales.

Selon les Normes Malgache sur les Travaux des Bâtiments à Madagascar, ces briques ont des caractéristiques dimensionnelle (tableau 4) et mécanique (tableaux 5 et 6).

Tableau 4 : Caractéristiques dimensionnelles de deux types de briques

Briques de terre industrielle					Briques de terre cuite			
Référence	Arrêté n° 2346 du ministère des travaux publics en date du 26 Octobre 1962				Arrêté 1877-PCH/TR du 26 Juillet 1963 portant les Normes Malgache des briques de terre cuite artisanales			
Définition	Ce sont les produits briques pleines et creuses de terre cuite destinés à être montés soit à bain de mortier puis enduits sur les 2 faces, soit montés à mortier batard enduit ou non sur leurs faces.				C'est un matériau de construction formé par de terre argileuse ou brique pleine de terre cuite dite artisanale			
Normes dimensionnelles [cm]	Briques pleines				Dimension			
					Epaisseur	5,5	7	7,5
					Largeur	11	11	11
					Longueur	21	21	21
					Dimension			
	Briques creuses				Epaisseur	12	9	
					Largeur	12	10	
					Longueur	24	20,5	
					Dimension			
					Epaisseur	5	6,5	8
					Largeur	15	15	15
					Longueur	30	30	30
					Dimension			
					Epaisseur	10	12	15
					Largeur	15	15	15
Longueur	30	30	30					
				Dimension				
				Epaisseur	15	20	25	
				Largeur	20	20	20	
				Longueur	40	40	40	
Poids maximal : le poids d'une brique artisanale n'excèdera pas 2,5 kg.								

Tableau 5 : Les normes sur les caractéristiques mécaniques des briques industrielles à Madagascar

Catégories	Résistance à la compression à sec [Kg /cm ²]		Porosité
	Moyenne sur 7 Briques	Minimum	
Briques pleines : ▪ Porteuse P1 ▪ Porteuse P2 ▪ Porteuse P 3 ▪ Remplissage R	100 70 40 30	80 60 30 20	30%
Briques creuses ▪ Porteuse P1 ▪ Porteuse P2 ▪ Remplissage R1 ▪ Remplissage R2	35 22 15 12	28 18 12 8	22%

(Source : Normes Malgache sur les *Travaux des Bâtiments à Madagascar*)

Tableau 6 : Les normes sur les caractéristiques mécaniques des briques artisanales

CATEGORIES	Résistance en kg /cm ² de section brute	
	Moyenne sur 7 briques	Minimum sur 7 briques
Brique porteuse catégorie 1A ▪ À sec ▪ Imbibition 48 heures	70 50	60 40
Brique porteuse catégorie 2A ▪ À sec ▪ Imbibition 48 heures	40 30	30 20
Brique à remplissage RA ▪ À sec ▪ Imbibition 48 heures	30 20	20 15

(Source : Normes Malgache sur les *Travaux des Bâtiments à Madagascar*)

II- INVESTIGATION EXPERIMENTALE



II.1 Les matériaux utilisés

Les pouzzolanes

Les pouzzolanes utilisées pour l'expérimentation se trouvent dans le fokontany d'Ampamelonana au sein de la Commune Rurale d'Alakamisy Anativato. Elles sont de couleur noire (PN) et rouge mélangé (PRM).

Les caractéristiques de ces points d'échantillonnage sont représentées dans le tableau 7.

Tableau 7 : Description des points d'échantillonnage

N° Echantillon	Localisation Coordonnées Laborde(m)	Poids (kg)	Couleur	
1	X : 449 535 Y : 694 192	7 ,68	Noire PN	
2	X : 448 194 Y : 693 424	6, 34	Mélangée (rouge-noire-brun) PRM	

(Source : *Ramanantsoa T., 2017*)

Le ciment

Le ciment utilisé est «ORIMBATO CEM IV 42,5 COMUM PORTLAND CEMENT AFRICEM EN 197-1/2000 ». Les résultats des essais mécanique-physiques effectués sur ce ciment ont été fournis par le LNTPB. Le tableau 8 précise les résultats.

Tableau 8: Résultats des essais sur le ciment [LNTPB 2017]

Nature de l'essai	Résistance en MPa du mortier					
	48 heures		7 jours		28 jours	
Traction par flexion	4,9	Moyenne : 4,9	6,4	Moyenne : 6,4	7,1	Moyenne : 7,2
	4,9		6,4		7,3	
	5,0		6,5		7,3	
Compression simple	23	Moyenne : 23,6	36,8	Moyenne : 37,3	44,5	Moyenne : 45,8
	23,8		37,3		46,2	
	24,2		38,0		46,8	

(Source : Ramanantsoa T., 2017)

II.2 Déroulement des essais

La méthodologie de la confection de briques

Pour confectionner une brique, il n'est pas juste question de mélanger des pouzzolanes et du ciment avec de l'eau. Mais il faut calculer les dosages convenables de chacun de ces constituants de brique, d'où la notion de «**formulation**».

L'expérimentation nécessite les matériels suivants (Figure 7) :

Balance de précision - Série de tamis avec accessoires - Etuve - Presse de Duriez et Marshall- Appareil d'écrasement, de surfacage et de démoulage - Moule du Duriez et Broyeur.



(Source : Ramanantsoa T., 2017)



Moule de DURIEZ



Appareil de démoulage



Broyeur

Figure 7 : Les différents matériels utilisés pour les essais et expérimentations

Les modes opératoires durant la confection des briques sont résumés dans l'organigramme de la figure 8.



Figure 8 : Mode opératoire au laboratoire (Source : Ramanantsoa T., 2017)

La méthodologie de la formulation de brique

Elle comporte les différentes expérimentations sur des moules de forme cylindrique (Hauteur =7 à 7,5cm ; Diamètre =8cm) lors de la confection des briques. Les paramètres utilisés sont les types de pouzzolane (PN ; PRM), sa granulométrie (4/10 ; 2/4 ; 0,5/2 : 0/0,5), sa masse (Mp[g]), le pourcentage du ciment (6% ; 8% ; 10%), la charge de la presse et la teneur en eau (8 à 11 % Mp[g]). Les formules sont présentées sous forme des tableaux. Les tableaux 9 et 10 en sont des exemples.

Tableau 9 : Un exemple de formulation en variant la granulométrie, les teneurs en ciment et en eau pour la pouzzolane noire (PN) et la pouzzolane rouge mélangée (PRM).

Granulométrie [mm]	Pouzzolane	Mp[g]	Ciment [%]	Me[g]	date	
					Confection	Écrasement
4 /10; 2/4 ; 0,5/2 ; 0/0,5	PN	500	10/8/6	55 à 40	21/08/17	04/09/17
	PRM	500	10/8/6	55 à 40	21/08/17	04/09/17

Tableau 10 : Un exemple de résultat pour la résistance à la compression d'une brique en pouzzolane confectionnée avec un dosage de 10% de ciment.

4/10 [mm]	Poids	Dimension		S [cm ²]	V [cm ³]	Charge en KN	Rc en MPa
		H (cm)	d (cm)				
PN	568	7,5	8	50,24	376,8	20	3,98
PRM	566			50,24	376,8	20	2,98

III- RESULTATS

III-1. Résultats des analyses granulométriques

Les tableaux 11 et 12 exposent les résultats des analyses granulométriques et les figures 9 et 10 correspondent à leurs courbes granulométriques.

Tableau 11 : Résultats d'analyse de pouzzolane noire

Tamis [mm]	Refus partiel [g]		Pourcentage	
	refus	cumulé	Refus cumulé	complémentaire
4	98,163	98,163	98,163	1,84
2,50	1,531	99,69	99,69	0,31
1,60	0,061	99,75	99,75	0,25
PAN	0,080	99,83	99,83	0,16

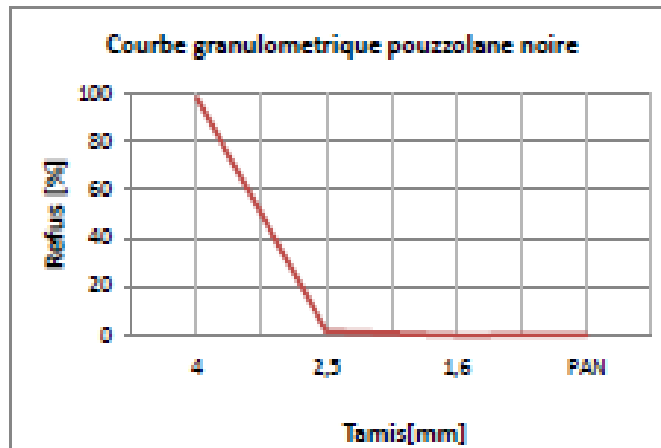


Figure 9 : Courbe granulométrique de pouzzolane noire (PN)

Tableau 12 : Résultat d'analyse de pouzzolane rouge mélangée

Tamis [mm]	Refus partiel [g]		Pourcentage	
	refus	Cumulé	Refus cumulé	complémentaire
4	50,629	50,629	50,629	49,38
2,50	19,605	70,22	70,22	80,40
1,60	15,442	85,66	85,66	84,56
0,5	14,016	99,67	99,67	85,99
PAN	0,222	99,89	99,89	99,78

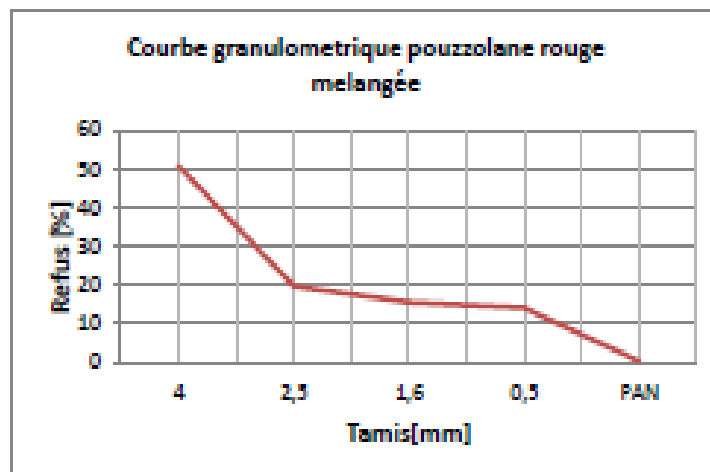


Figure 10 : Courbe granulométrique de pouzzolane Rouge Mélangé (PRM)

III-2 Résultats expérimentaux sur les briques

Les moules utilisés sont de forme cylindrique de hauteur variable et de diamètre constant = 8cm, les briques obtenues après expérimentation sont représentées par la figure 11. Tous les essais et expérimentations ont été faits au Laboratoire National des Travaux Publics et Bâtiments (LNTPB).



Figure 11: Briques en pouzzolane obtenues après expérimentation (forme cylindrique selon la moule)
(Source : Ramanantsoa T., 2017)

Les résistances à la compression en fonction de teneur en ciment et de la granulométrie pour 2 types de pouzzolane PN et PRM sont représentées sous forme de tableau (Tableaux 13,14) et de graphique (Figure 12 et 13).

Tableau 13 : Résistance à la compression de brique en pouzzolane noire en fonction de la teneur en ciment et de la granulométrie.

Résistance à la compression		Rc [MPa] Pouzzolane Noire PN			
Granulométrie		4/10	2/4	0,5/2	0/0,5
Teneur en ciment	6%	2,78	2,58	1,39	1,19
	8%	2,98	3,58	1,79	1,99
	10%	3,98	3,98	2,39	1,79

Tableau 14 : Résistance à la compression de brique en pouzzolane PRM en fonction de la teneur en ciment

Résistance à la compression		Rc [MPa] Pouzzolane Rouge Mélangé PRM			
Granulométrie		4/10	2/4	0,5/2	0/0,5
Teneur en ciment	6%	2,39	1,99	0,99	0,79
	8%	2,81	2,19	1,60	1,70
	10%	2,98	3,78	2,98	1,39

(Source : Ramanantsoa T., 2017)

La représentation graphique de résistance à la compression des briques en pouzzolane obtenue en fonction de la granulométrie et de teneur en ciment pour les deux types de pouzzolane PN et PRM sont illustrées par les figures 11 et 12.

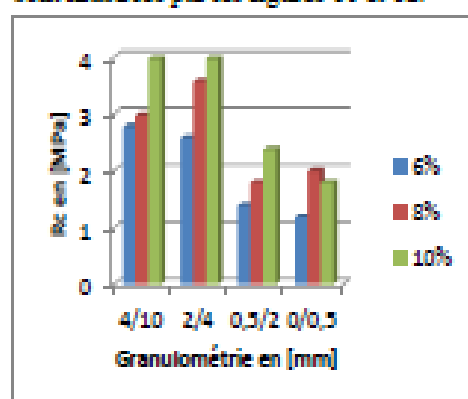


Figure 12: Rc en fonction granulométrie et teneur en ciment pour PN

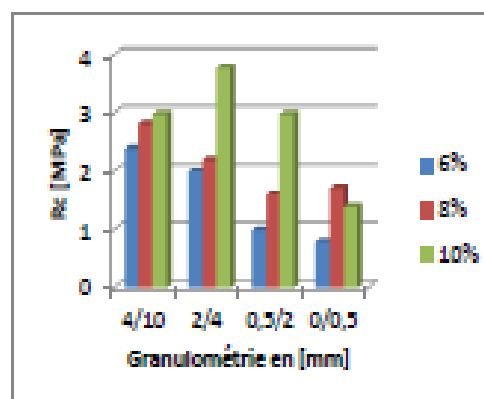


Figure 13: Rc en fonction granulométrie et teneur en ciment pour PRM

La brique de pouzzolane noire (PN) de granulométrie 4/10 ou 2/4 dispose plus de résistance à la compression que celle de pouzzolane rouge mélangé (PRM) pour les teneurs en ciment de 8 et 10%.

IV- DISCUSSION

La discussion est axée sur la comparaison entre la brique en terre cuite artisanale et celle en pouzzolane noire.

Les données moyennes des briques artisanales à Madagascar sont conférées par le tableau 15.

Tableau 15 : Caractéristiques des briques artisanales à Madagascar

Dimension en cm	Poids en g	Section en mm ²	Charge en KN	Rc en MPa
18,5 x 9 x 8	1 382	15 725	36	2,29
19,5 x 9,5 x 7,5	1 403	18 525	28	1,51
19 x 10 x 8,5	1 298	19 000	30	1,57
Moyenne	1 361	17 750	31,33	1,79

La comparaison effectuée avec la norme Malagasy selon TBM et la moyenne des données sur les briques artisanales à Madagascar permet de la montrer sous forme de tableau (Tableau 16).

Pour les deux types de pouzzolane (PN, PRM), la résistance à la compression pour les granulométries 2/4 et 4/10 et avec de teneur en ciment de 8 et 10% dépasse 2MPa (brique de remplissage selon la norme TBM).

Tableau 16 : Comparaison de brique en pouzzolane par rapport à la norme TBM et aux caractéristiques des briques artisanales à Madagascar.

	Dimension en cm	Densité	Poids en kg	Rc moyenne en MPa
Norme Malgache selon TBM	24 x 12 x 12	0,72	2,500	2 (remplissage)
	20,5 x 10 x 9	1,35	1,992	4 (porteur)
Brique en terre artisanale	18,5 x 9 x 8	1,02	1,361	1,79
Brique cylindrique en pouzzolane Si on utilise une moule	H = 7 ; R = 4	1,67	0,587	3,98 (en 14jr)
	18,5 x 9 x 8		2,224	

Les figures 14 et 15 montrent les deux types de brique en terre cuite et en pouzzolane.



Figure 14 : Briques de terre cuite artisanales
10x10x20



Figure 15 : Briques en pouzzolane 20x20x40

Les pouzzolanes noires abondantes dans la zone peuvent être utilisées en tant que brique porteur pour les granulométries 4/10 et 2/4 en utilisant une teneur de 10% de ciment. Mais déjà pour une teneur en ciment de 6%, les briques confectionnées pour les mêmes granulométries peuvent être utilisées en tant que brique de remplissage.

CONCLUSION

Les pouzzolanes considérées comme granulats légers ont des comportements physique, chimique et/ou mécanique différents selon leur couleur et leur granulométrie. La recherche effectuée révèle que les pouzzolanes de la Commune Rurale d'Alakamisy-Anativato sont un très bon matériau de construction et peuvent être utilisé comme brique que ce soit remplissage ou porteur. Par rapport aux briques en terre artisanales, elles sont plus résistantes.

Les briques en pouzzolanes sont économiques financièrement par rapport aux parpaings et le gisement des pouzzolanes est plus accessible. Tout de même, il est recommandable et avantageux d'utiliser des pouzzolanes noires et des ciments.

En conclusion même si les pouzzolanes d'Alakamisy-Anativato ne possèdent pas une très bonne qualité à la cimenterie (Indice de pouzzolanité inférieur à 75), elles sont bien adaptées pour faire des briques porteuses ou remplissages. Elles dépassent de loin les caractéristiques physiques et mécaniques des briques en terre cuite. Ainsi, elles méritent d'être authentifiées et vulgarisées et pourraient être bénéfiques dans le développement des domaines de la construction de notre pays.

Références bibliographiques

- [1] BAGARRE E. (1987) - Les matériaux volcaniques : utilisation en technique routière – Institut des Sciences et des Techniques de l'Équipement et de l'Environnement pour le Développement ISTED, Paris 84p.
- [2] BENKADDOUR M. (2009) - Durabilité des mortiers à base de pouzzolane naturelle et de pouzzolane artificielle -Département Génie Civil, École normale Supérieure d'Enseignement Technique Algérie, 11pp.
- [3] BESAIRIE H. (1962) - Géologie économique de la Préfecture d'Antsirabe N°156, p108-111. Service Géologique de Madagascar, 70p
- [4] MANDIMBIHARISON A. et al (2014) - Caractéristiques physico-chimiques et mécaniques de pouzzolanes du District de Betafo-Antsirabe, Région Vakinankaratra. Madamines, ISSN 2220-0681, Vol. 6 ,2014
- [5] MOUSSA A. K., (2007) - Contribution à l'étude de valorisation de la pouzzolane, 158p
- [6] MINISTERE DES BATIMENTS ET DES TRAVAUX PUBLICS. (1962) - Travaux des Bâtiments à Madagascar, 430p
- [7] PCD de la Commune Rurale d'Alakamisy-Anativato (2015), Edition inédite 30p
- [8] RAMANANTSOA T. (2017) - Valorisation des pouzzolanes de Betafo en briques , mémoire de Master Mention Sciences de la Terre à l'ASTA,85p.

UTILISATION DES SIG ET DE LA TÉLÉDÉTECTION POUR LA GESTION DE L'ENVIRONNEMENT URBAIN : CAS DE LA VILLE D'ANTANANARIVO (MADAGASCAR)

AURÉLIEN JACQUES MANDIMBIHARISON*1 et LÉA RAHARIJAONA RAHARISON2.

*École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Département de Géologie
Université d'Antananarivo*

Boîte Postale 1500, Antananarivo 101, Madagascar.

Téléphone : (261) 20 22 276 96 ; télécopieur : (261) 20 22 248 54

Courriel (1,2) : mandimbiharison.aurelien@caramail.com ; ljarahari@syfed.refer.mg

(soumis le 25 février 2002 ; révisé le 6 mai 2002 ; accepté le 11 décembre 2002)

** Correspondant principal*

Antananarivo, la capitale de Madagascar est parmi les nombreuses villes d'Afrique où la croissance démographique et les changements urbains évoluent de façon spectaculaire ces quarante dernières années. Antananarivo est une ville très contrastée au point de vue géomorphologique car les zones collinaires sont souvent à fortes pentes, sensibles à l'érosion et aux mouvements de masse (éboulement, glissement de terrain) et les zones basses sont inondables. La défaillance dans l'organisation spatiale entraîne la prolifération des constructions illicites et la détérioration des infrastructures (routes, voiries et réseaux de drainage). Les flancs de collines subissent une forte pression urbaine qui aggrave le phénomène de ravinement, provoquant le colmatage rapide des caniveaux et l'ensablement des bas-fonds. Les vallées envahies par les habitations sont le siège de crues brutales et destructives en période de fortes pluies.

L'objectif de cet article est l'utilisation conjointe des SIG et de la télédétection comme outils d'aide à la décision pour la gestion environnementale de la Commune urbaine d'Antananarivo. Ces outils ont permis d'analyser géographiquement les données et d'identifier les tendances actuelles de l'urbanisation. La méthodologie adoptée est basée sur l'exploitation des données de base disponibles. L'approche analytique repose sur l'interprétation visuelle de l'image HRV de SPOT et sur les relevés de terrain. Par analyse du modèle numérique d'altitude (MNA), la carte de pente est constituée. Les cartes de l'occupation du sol sont obtenues à partir des données ETM+ de Landsat-7.

À partir des données conventionnelles (cartes topographiques et géologiques, plan de la ville) sont extraites les couvertures d'informations qui sont numérisées et superposées aux images satellitaires. Ces informations pourront servir d'appui à l'établissement de plans (plan d'aménagement du réseau routier, plan d'extension de la ville). À partir de ces informations de sources diverses, trois types de cartes thématiques sont produits : une carte de risque d'érosion en fonction de la pente et de l'occupation du sol, une carte de risque d'inondation en fonction des conditions du terrain et des contraintes hydro-climatiques ainsi qu'une carte des contraintes à l'urbanisation en tenant compte des contraintes liées au coût et au contexte général physique et humain du milieu. Par combinaison de plusieurs documents cartographiques les résultats obtenus ont confirmé les possibilités d'application des SIG et de la télédétection pour la gestion efficace du milieu urbain.

Mots-clefs : *SIG ; Antananarivo ; risque ; érosion ; inondation ; Landsat.*

GIS AND REMOTE SENSING FOR URBAN ENVIRONMENTAL MANAGEMENT : EXAMPLE OF THE CITY OF ANTANANARIVO (MADAGASCAR)

MANDIMBIHARISON *et al.*

Antananarivo, the capital city of Madagascar is among the numerous cities of Africa where demographic growth and urban changes evolve in a spectacular way these last forty years. Antananarivo is a city geomorphologically contrasted, one part the hilly zones, often with steep slopes liable to erosion and mass movements (crumbling, landslides), and the other part the low zones liable to flooding.

The failure in spatial organization leads to the proliferation of illicit construction and the deterioration of infrastructures (roads, landfills and drainage networks). Hillsides undergo a strong urban pressure aggravating ravine phenomenon, provoking the rapid plugging of gutters and sanding of shallows. The dwelling invaded valleys are the place of violent and destructive flood during strong rainfall period.

The aim of this study is to use GIS and remote sensing as tools for decision making for the environmental management of the urban commune of Antananarivo. These tools have permitted a geographical analysis of data and the identification of the present tendencies in urbanization. The methodology is based on the exploitation of the available basic data. The analytical approach lies on the visual interpretation of SPOT HRV and field data. The map of slope is made up through an analysis of the digital elevation model. The land use map is obtained from ETM+ of Landsat-7. From conventional data (topographic and geological mapping, city planning) are extracted information which are digitized and superimposed on satellite image. These informations can be used as a support for the plan making (development plan for road network, city expansion plan). From these multisource informations, three types of thematic maps will be produced: a map of erosion risk according to the slope and the land use, a map of flood risk according to land conditions and hydro-climatic constraints and a map of constraints to urbanization taking into account constraints connected to cost and the physical, geographical and human environment. Through combination of several cartographic documents the obtained results have confirmed the possibilities of GIS and remote sensing application for the effective management of urban environment.

Keywords : GIS ; Antananarivo ; risk ; erosion ; flooding ; Landsat.

1. INTRODUCTION

Depuis l'indépendance, Antananarivo, la capitale de Madagascar a subi une forte pression démographique, engendrant ainsi des problèmes d'urbanisation et d'environnement. Si elle a été conçue pour accueillir 400 000 habitants, elle abrite actuellement environ 1 500 000 habitants (communication verbale auprès d'un responsable de la mairie d'Antananarivo). Seule la partie haute a été habitée pendant le royaume d'Andrianampoinimerina, au XVIII^e siècle, la partie basse constituée par la plaine alluviale de Betsimitatatra est le siège actuellement d'une expansion démesurée de l'habitat.

De par ses deux grandes unités géomorphologiques, collines et plaine, les problèmes environnementaux d'Antananarivo se résument en deux mots : « érosion » au niveau des flancs de collines et « inondation » dans les bas-fonds.

Les facteurs d'érosion font intervenir l'action conjuguée de la géomorphologie et de la lithologie, action aggravée par l'agressivité des pluies et les activités humaines. Le relief est très accidenté avec des versants convexo-concaves à pente forte (15 à 45 %) en moyenne. La lithologie de la zone haute, d'altitude moyenne de 1 340 m, est essentiellement composée d'un ensemble granito-gneissique et migmatitique, sensible à l'érosion hydrique dès que la couverture végétale s'amenuise. Les produits d'érosion sont transportés et déposés dans les bas-fonds (Ratsimbazafy, 1970).

Les facteurs d'inondation concernent le climat et la morpho-pédologie. La précipitation moyenne annuelle est de 1 362 mm concentrée sur 90 jours, durant la période allant de novembre à avril (Donque, 1975). Les dangers d'inondation proviennent surtout des pluies cycloniques ou exceptionnelles de 7 à 15 jours. La période de décrue est longue en raison de l'obstruction des égouts et canaux d'évacuation et de la nature imperméable des sols argilo-tourbeux des bas-fonds.

Les cours d'eau naturels (rivière Ikopa) et artificiel (canal Andriantany) à écoulement permanent connaissent annuellement des périodes de grosses eaux, voire des crues pendant la saison cyclonique.

2. DESCRIPTION DU SITE D'ÉTUDE

Située sur 18°55' de latitude sud et 47°32' de longitude est dans le domaine des Hautes-terres Centrales de Madagascar avec une altitude moyenne de 1 340 m, la commune urbaine d'Antananarivo est limitée à l'ouest et au sud par la rivière Ikopa et à l'est par la grande colline d'Ambohibe-Ifafy. Elle couvre une superficie d'environ 78 km² (figure 1).

2.1. Climat

Comme l'ensemble des Hautes-terres de Madagascar, la région d'Antananarivo connaît un climat réglementé par les régimes de l'alizé et des moussons (Donque, 1975). Ainsi, deux saisons très contrastées ont été observées :

- une saison chaude et pluvieuse de mi-novembre à avril ;
- une saison froide et sèche de mi-mai à septembre ;
- une période de transition sèche et chaude de septembre à novembre.

Les précipitations moyennes annuelles sont de 1 362 mm et pendant la période pluvieuse et elles sont réparties comme on le montre sur le tableau 1.

TABLEAU 1 Données pluviométriques des mois les plus arrosés. *Pluviometric data of the most watered months.*

Mois	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
Hauteur en mm	170	363,9	283,7	185,7	261,4
Nombre de jours	15	22	18	15	18

La variabilité interannuelle des précipitations montre une très grande irrégularité dans le domaine des Hautes-terres de Madagascar, irrégularité déjà signalée par Donque (1975) et confirmée par Raharijaona Raharison et Randrianarison (1997).

2.2. Géomorphologie

La région d'Antananarivo est constituée de collines à sommet arrondi ou à crête aiguë et d'une plaine alluviale (Andrianasolo, 2000).

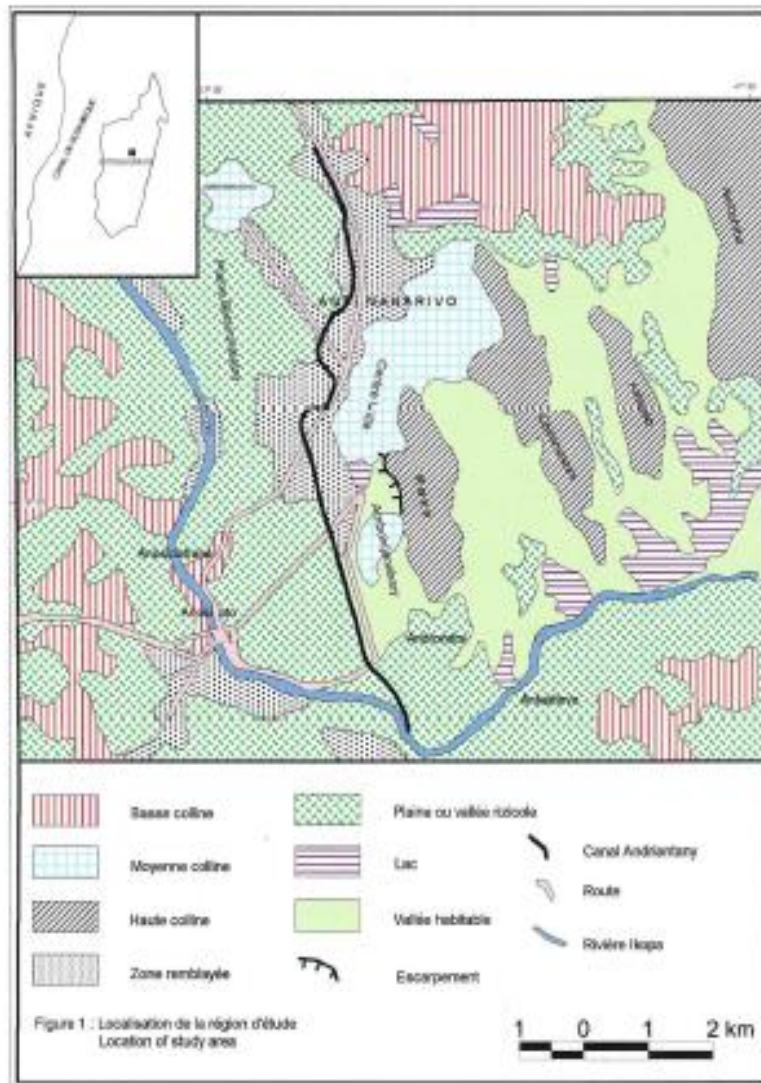


FIGURE 1 Localisation de la région d'étude extraite de la carte FTM, P47, de 1963 à l'échelle du 1 : 50 000. Location of study area issued from FTM map, P47 of 1963 at scale 1 : 50 000.

La zone de collines se situant au nord-ouest et à l'est, est composée :

- de collines résiduelles constituées de massifs érodés de formes irrégulières ou arrondies telles que les collines d'Ankatso, de l'Observatoire, d'Ampasampito et d'Ambohijanahary ;
- des escarpements abrupts limitant la zone haute de la zone basse : tel est le cas de l'escarpement d'Ampamarinana ;
- des interfluvés constitués de vallées peu profondes et comblées par des sédiments de talus sur les flancs de collines à l'exemple de Manakambahiny.

La zone de plaine occupe la partie ouest d'Antananarivo sur une superficie de 30 000 ha. Elle est constituée (figure 1) :

- d'une plaine d'inondation formée de sédiments lacustres et des apports fluviaux à la faveur des crues successives de la rivière Ikopa ;
- des îlots de collines plus ou moins arrondies telles que celles d'Anosipatrana et d'Anosizato .

2.3. Hydrologie

Antananarivo est traversée par la rivière Ikopa et des canaux d'irrigation et d'évacuation. Le canal d'Andriantany collecte les eaux de ruissellement de l'impluvium urbain qui domine la plaine. Cet

impluvium est constitué de trois groupes de bassins versants :

- les bassins versants amont, fortement urbanisés et à fortes pentes (Fort Voyron, Soarano, Mahamasina) ;
- les bassins versants aval, partiellement urbanisés et tamponnés par le marais de Masay ;
- les bassins versants situés entre le canal d'Andriantany et les digues de protection de l'Ikopa, occupés par des rizières et une urbanisation précaire et diffuse.

2.4. Facteurs humains

La vocation rizicole de la zone basse tend à disparaître au détriment des remblais et des constructions illicites. En effet, la promotion des zones franches industrielles et le besoin croissant en matériaux de construction, en occurrence les briques de terre cuite, ont entraîné une profonde destruction à l'intérieur des bas-fonds rizicoles. La transformation plus récente des flancs des collines à pentes raides en espace résidentiel a provoqué une rupture d'équilibre du milieu, engendrant ainsi érosion en nappe et en glissements de terrain. L'urbanisation des sites normalement inconstructibles a fait apparaître des formes d'érosion catastrophique (Blanchard, 1994), telles les ravines dans certains quartiers de la ville d'Antananarivo. Lors des violentes pluies, des quantités considérables de sédiments se répandent dans les rues des bas quartiers et obstruent les canaux d'évacuation.

3. MÉTHODOLOGIE

Les données multisources utilisées dans le cadre de la réalisation de ce travail sont :

- une image ETM+ de Landsat-7 enregistrée le 25 septembre 2000, corrigée géométriquement et radiométriquement ;
- une carte topographique à l'échelle du 1 : 50 000 datant de 1963 (Antananarivo P47).

La démarche méthodologique adoptée relative aux thèmes « érosion et inondation » est représentée dans l'organigramme de la figure 2.

L'image satellitaire ETM+ de Landsat-7 est géoréférencée à la projection UTM 38 sud en vue de faciliter l'exploitation des données existantes.

La carte de l'occupation du sol (voir figure 6) est obtenue par classification dirigée selon le maximum de vraisemblance à partir de la composition colorée 453 qui traduit en nuances de rouge la végétation et en clair les sols nus.

Le modèle numérique d'altitude (MNA) est dérivé de l'interpolation par TIN (*Triangulated Irregular Network*) des courbes de niveau numérisées à partir de la carte topographique P47.

Dans notre hypothèse de travail, la zone basse inondable est définie comme étant une zone dont l'altitude ne dépassant pas 1 250 m. Cette valeur correspond approximativement à la cote d'alerte du plan ORSEC (ORganisation de SECours en cas d'inondation) de la ville d'Antananarivo. Au niveau du pont d'Anosizato, la menace du danger commence en principe au moment où le niveau de l'eau de la rivière Ikopa dépasse la cote 2,7 m, or l'altitude à cet endroit est de 1 248 m.

Pour l'élaboration du SIG, les données sur lesquelles est basé ce travail, sont des documents cartographiques, en particulier la carte topographique d'Antananarivo et des fiches monographiques de la commune concernée.

3.1. Détermination des zones à risque d'inondation

Sur la rivière Ikopa, sont situées des digues appelées « fusibles » qui cèdent automatiquement lors des grandes crues (B.P.P.A., 1985).

Les facteurs qui sont à l'origine des inondations périodiques de la plaine d'Antananarivo sont les facteurs morpho-tectoniques et sociaux.

Les mouvements tectoniques cassants subméridiens et de direction N20°E (Noizet, 1967) sont responsables de l'effondrement dans les gneiss du compartiment occidental et du rehaussement des roches granitiques du compartiment oriental. La géomorphologie actuelle de la plaine d'Antananarivo est héritée de cette tectonique ancienne du socle précambrien malgache.

Une crue en amont de la plaine provoquerait rapidement un rehaussement du niveau d'eau en raison de nombreux étranglements à certains endroits de la rivière Ikopa.

Les digues existantes construites à l'époque du roi Andrianampoinimerina au XVIII^e siècle sont souvent mal entretenues. La géomorphologie plane et la présence des méandres de la rivière Ikopa favorisent un alluvionnement rapide et, par conséquent, un rehaussement constant du lit mineur des cours d'eau endigués (Ratsimbazafy, 1970).

Le mode d'écoulement des eaux superficielles n'a été étudié sérieusement qu'à partir des travaux récents effectués par le Bureau pour la protection de la plaine d'Antananarivo (B.P.P.A., 1985).

En cas de rupture de brèche du côté droit de l'Ikopa, au niveau de l'Ivanja, les eaux fluviales vont inonder la plaine d'Androntra et se déverser dans le canal d'Andriantany, provoquant ainsi un débordement dès que le débit dépasse 4 m³/s. Une zone tampon de 2 km par rapport à ce canal a été définie à l'aide de la fonction « buffer » sous l'Idrisi 3.2.

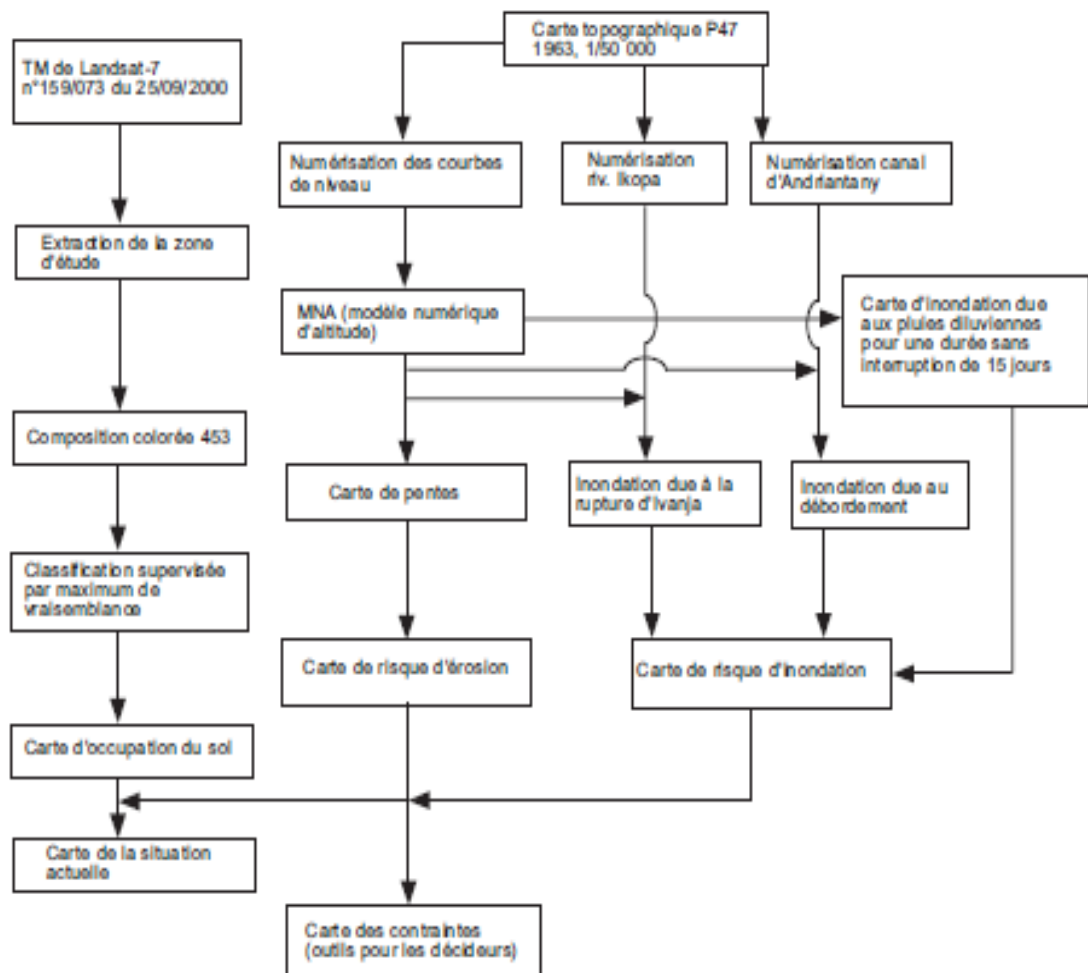


FIGURE 2 Organigramme des différentes étapes de la méthode utilisée. *Flow chart of steps followed for the method used.*

La vérification sur le terrain a permis de constater que :

- la partie orientale du canal d'Andriantany est occupée par des bâtiments administratifs déjà protégés contre les crues ; un masquage préalable a été réalisé sur cette partie ;

- la partie occidentale présente des buttes résiduelles granito-migmatitiques d'altitude supérieure à 1 270 m, qui sont épargnées des inondations et sur lesquelles est appliqué un autre masquage, en vue de limiter les zones inondables ;

- en cas de rupture de brèche de l'Ivanja sur la rive gauche de l'Ikopa, les plaines d'Ankadievo, d'Alasora et de Tanjombato, d'altitude inférieure à 1 260 m, sont submergées.

En cas d'événements pluviométriques exceptionnels, on peut supposer qu'il tombe

400 mm de pluie pendant une période sans interruption de 15 jours (Direction de la météorologie nationale) et les zones susceptibles d'être inondées sont celles favorables à la stagnation d'eau en raison de la vétusté des ouvrages d'assainissement et de la nature morphopédologique du terrain.

Les talwegs à fond plat semés de marécages sont le théâtre des crues brutales et destructrices. Pourtant ces vallées sont envahies par des habitations.

La superposition des trois cartes en format vecteur sous Idrisi a permis d'obtenir la carte de risque d'inondation (figure 3).

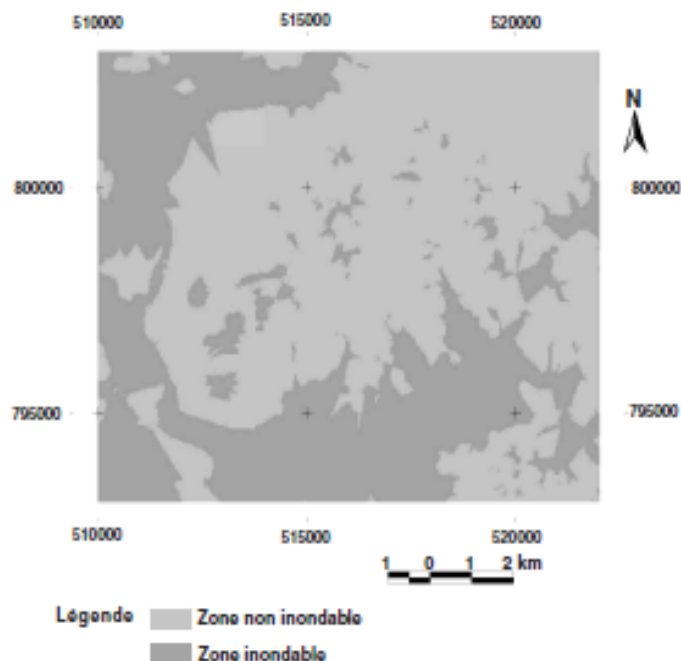


FIGURE 3 Carte de risque d'inondation de la ville d'Antananarivo. *Map of flood risk of Antananarivo.*

3.2. Détermination des zones à risque d'érosion

Les principaux facteurs d'érosion sont de deux types, soit morpho-climatiques et sociaux.

L'agressivité du climat actuel à saisons contrastées, la disparition de la végétation climatique et la pente sont autant de facteurs qui favorisent l'érosion tant en nappes qu'en rigoles au niveau des collines avoisinantes de la plaine.

Outre la plaine alluviale de Betsimitatatra, le relief de la capitale s'organise suivant un réseau d'échines et des vallées principales, plus ou moins parallèles entre elles et de direction générale NNO-SSE (Hoeblich, 1983). Le raccord entre les sommets et les dépressions est assuré par des interfluvies au profil irrégulier faisant alterner des replats ou des sections rectilignes à pente douce avec des sections à pente plus forte, rectiligne ou convexe, siège des formes d'érosion en lavaka.

Les formes qui caractérisent le relief de la région ont souvent des limites qui correspondent à des seuils de pente. Aussi, quatre classes de pente ont été définies comme l'a fait le B.P.P.A. et nous ont permis d'élaborer, à partir du MNA, une carte de risque d'érosion comportant quatre classes (figure 4). La classe à faible risque couvre les bas-fonds et les vallées. La classe à risque modéré coïncide avec la zone de raccordement du versant au bas-fond ainsi qu'aux zones remblayées. La classe à risque élevé et très élevé se superpose au domaine des collines. Sur le tableau 2, on présente la relation entre la pente, les unités

morphologiques, les formations géologiques et les risques d'érosion.

Les bâtis et agglomérations, construits sur les pentes sans tenir compte de la nature lithologique, créent parfois des dégradations plus ou moins importantes (éboulements, glissements).

3.3. Élaboration de carte de contraintes

Le croisement de deux cartes relatives aux risques d'érosion et d'inondation, en format image sous Idrisi et en utilisant la fonction *crosstab*, a produit la carte de contraintes à l'urbanisation (figure 5). Huit classes ont été définies en fonction de deux grandes unités géomorphologiques et des classes de pente (tableau 2) :

- la classe 1 est définie comme étant une zone non inondable, la moins exposée à l'érosion du fait qu'elle a été remblayée ;

- la classe 2 est considérée comme une zone inondable à faible risque d'érosion qui coïncide avec la plaine alluviale ;

- la classe 7 est une zone non inondable à risque d'érosion très élevé qui représente la zone des hautes collines à forte pente (> 15 %) ;

- la classe 8 est la zone inondable à risque d'érosion très élevé ; elle est exceptionnelle car il s'agit du corps d'une digue de protection de la rivière Ikopa soumise à la fois à l'érosion et à l'inondation.

Les autres classes ne sont que des étapes intermédiaires entre ces extrêmes.

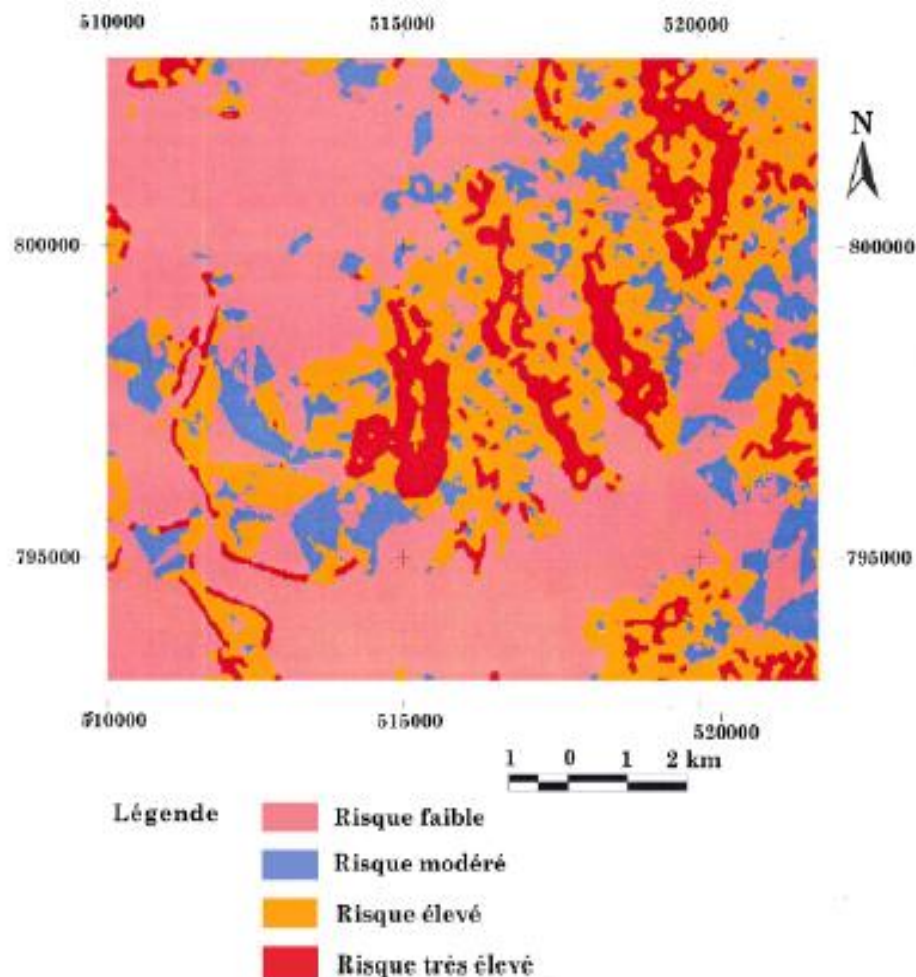


FIGURE 4 Carte de risque d'érosion. *Map of erosion risk.*

TABLEAU 2 Relation entre pente, unités géomorphologiques, formations géologiques et risques d'érosion. *Relationship between slope, geomorphological unit, geological formations and erosion risks.*

Unité morphologique	Classe de pente	Sous unité géomorphologique	Formation géologique	Risque d'érosion
Zone basse (< 1200 m d'altitude)	0 à 8 %	- plaine alluviale - vallées plus ou moins larges - terrasses	Dépôts fluvi-lacustres Produits d'altération gneissiques Sol ferrallitique colluvionné	Faible
Zone de collines (1200 à 1480 m d'altitude)	8 à 15 %	- basses collines (1200-1500 m)	Ensemble granito-migmatique à manteau d'altération de 10 à 20 m d'épaisseur	Modéré
	15 à 20 %	- moyennes collines (1500-1560 m)	Ensemble de gneiss et migmatite à sol ferrallitique profond (20 à 25 m d'épaisseur)	Élevé
		- hautes collines (1560-1480 m)	Granite monzonitique à faible recouvrement d'albite de 0 à 10 m d'épaisseur	Très élevé

3.4. Analyse de l'image satellitaire

Après extraction de la zone d'étude, la composition colorée 453 a été réalisée à partir de l'image TM du 25 septembre 2000. La classification dirigée selon le maximum de vraisemblance de cette composition colorée a permis d'identifier sept classes d'occupation du sol (figure 6) :

1) agglomération urbaine ; 2) cultures de bas-fonds, 3) marais ; 4) plan d'eau ; 5) rizières ; 6) savane arborée ; 7) savane herbeuse. L'agglomération se répartit irrégulièrement, dans les deux grandes unités géomorphologiques, d'une manière anarchique et illicite dans la plupart des cas. Les bas-fonds non aménagés en habitat sont occupés par des cultures de cresson. Les marais se trouvant dans quelques bas-fonds et dans la plaine alluviale sont les sites préférés des jacinthes d'eau. Le plan d'eau peut être un lac, un étang, une rivière (l'Ikopa) ou un canal artificiel (Andriantany). Les rizières, occupant une grande partie de la plaine de Betsimitatatra, commencent à être transformées plus ou moins rapidement en zones industrielles et habitables. Les savanes arborées et herbeuses, très dispersées, se limitent sur les flancs de collines et en occupent rarement le sommet.

4. RÉSULTATS

L'intégration des différents facteurs dans le SIG a permis d'obtenir diverses cartes thématiques (figures 3 et 4) tandis que la carte d'occupation du sol (figure 6) a été établie à partir de la composition colorée 4-5-3 de l'image ETM+ de Landsat-7 par classification du maximum de vraisemblance.

La combinaison des cartes thématiques précédentes a permis d'obtenir la carte de contrainte à l'urbanisation (figure 5) que l'on peut utiliser dans l'orientation de l'aménagement de la ville d'Antananarivo. Mais, déjà, on peut dire que les possibilités d'urbanisation sont un peu limitées en raison du risque d'inondation ou de pentes plus ou moins importantes. Les facteurs sociaux liés à la forte croissance démographique et aux problèmes financiers viennent encore aggraver la situation.

En effet, la zone basse à pente douce de 0 à 8 %, autrement dit à faible risque d'érosion, soumise régulièrement à des inondations dues aux aléas climatiques, est le siège d'une forte concentration urbaine composée en majeure partie d'une population généralement pauvre. Cette zone est généralement dénommée « bas quartiers » où la population la plus vulnérable est évacuée, en cas d'inondation, vers les zones sans risque et prise en charge par le Conseil National de Secours (C.N.S.). À titre indicatif, le nombre de personnes évacuées en 2000 lors de fortes crues est estimé à 8 540

(données recueillies auprès de la Mairie d'Antananarivo-ville).

La zone inondable à risque d'érosion modéré correspond généralement à la partie inférieure des basses collines érigées au milieu de la plaine alluviale de Betsimitatatra. Des constructions anarchiques et illicites commencent à envahir ces zones.

La zone basse inondable à risque d'érosion élevé, correspondant au corps de la digue de la rivière Ikopa, nécessite un renforcement par la mise en place des enrochements et une surveillance régulière.

La zone non inondable à risque d'érosion faible n'est autre que les replats ou terrasses qui correspondent aux zones de raccordement entre la dépression et les sommets. Elle est propice à toute forme de construction et de ce fait elle est très vite envahie et aménagée.

Dans la zone des collines à pente supérieure à 8 %, les sols à fortes épaisseurs d'altérations et à faible cohésion, correspondant aux domaines des gneiss et des migmatites (tableau 2), sont exposés au risque élevé d'érosion et aux mouvements de masse (glissements et éboulements). Après de fortes pluies successives de plus d'une semaine, les maisons construites illégalement et installées anormalement sur des pentes plus ou moins fortes, subissent des dégradations allant jusqu'à l'effondrement ou l'écroulement, causant parfois des pertes de vie humaine.

La zone des hautes collines correspond surtout aux trois échines définies par Hoeblich (1983), dont la première concernant la colline principale à 1 480 m d'altitude et dominant la plaine porte le nom du Rova car le Palais de la Reine s'y trouve. Cette colline est à l'origine de l'implantation urbaine et correspond aux quartiers les plus anciens. La seconde échine englobe les collines de l'Observatoire (1 379 m), du Fort-Duschene (1 378 m) et d'Ampandrianomby (1 338 m). Elle renferme des quartiers résidentiels et des constructions modernes telles que l'Université d'Antananarivo. La troisième échine porte la colline d'Ankatso d'altitude inférieure à 1 384 m. Au pied de cette colline se développe un village.

La zone de collines à haut risque d'érosion nécessite un aménagement préalable avant toute délivrance de permis de construire par la Municipalité.

Les cartes obtenues sont validées à partir des observations sur le terrain et des résultats des travaux antérieurs.

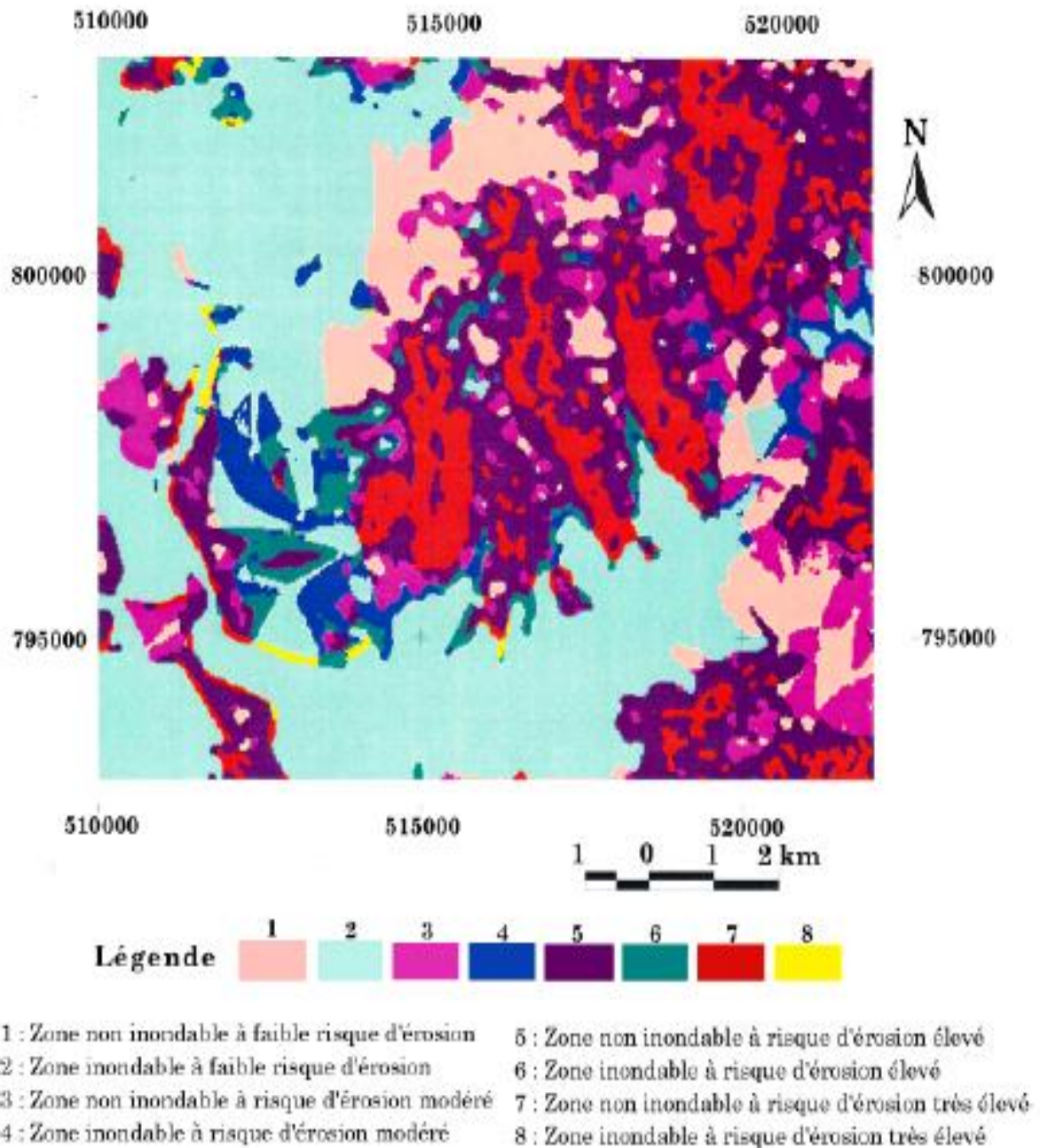


FIGURE 5 Carte de contrainte d'urbanisation. *Map of urbanisation constraint.*

La validation de la carte du risque d'inondation (figure 3) est faite à partir du suivi régulier sur le terrain de l'évolution de la limite des zones inondables à chaque période de forte crue ou de passage de cyclone de 1996 à 2000. À ceci s'ajoutent les données récoltées auprès de la mairie et du B.P.P.A. concernant les inondations antérieures.

Les paramètres de terrain utilisés pour la validation de la carte des risques d'érosion sont : la pente, l'état de dénudation du sol, les formes d'érosion et les mouvements de masse et l'utilisation du sol. La classe d'érosion forte à très

forte correspond, sur le terrain, à des pentes supérieures à 20 % recouvertes de savanes herbeuses dégradées. L'érosion en nappes est la forme d'érosion la plus développée sur les flancs des collines dont la nature pédologique et la structure lithologique sont aussi favorables aux glissements de terrain. Les bâtis construits sur les versants non appropriés à toute construction accentuent l'érosion en nappes qui en outre provoque l'ensablement des bas fonds et des canaux d'irrigation et d'évacuation.

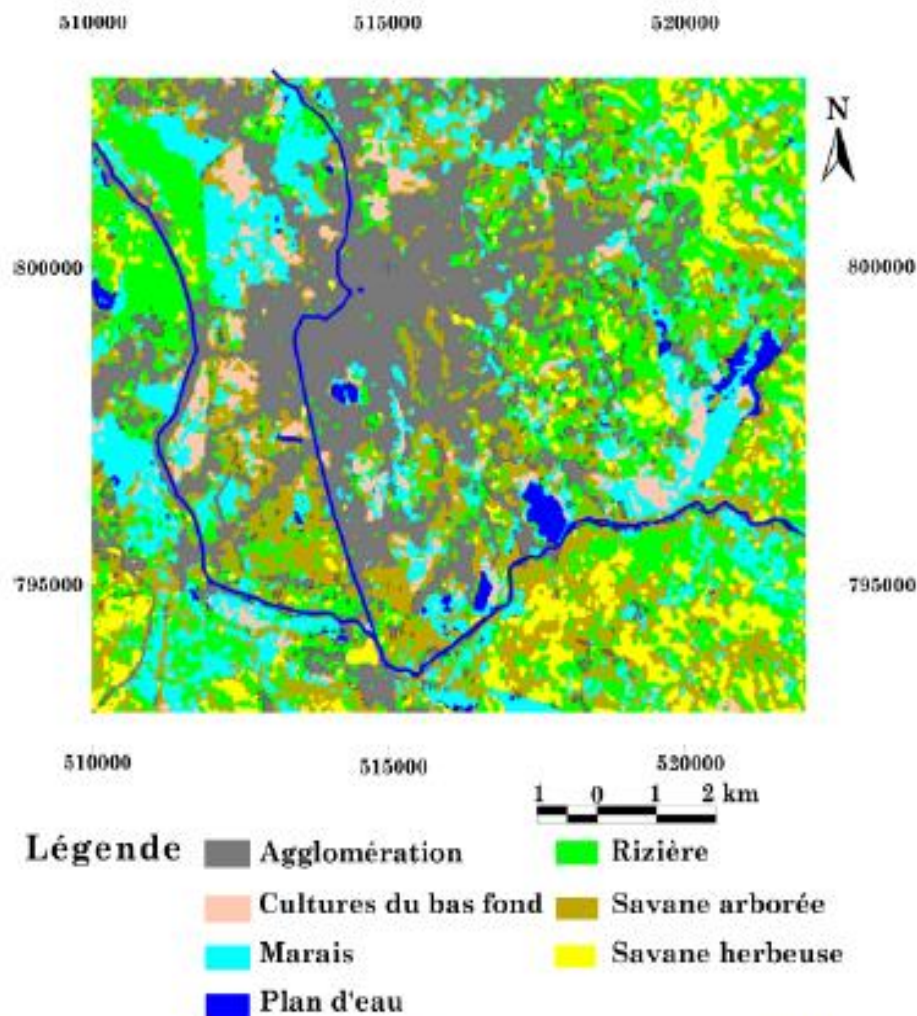


FIGURE 6 Carte d'occupation du sol obtenue à partir de la composition colorée 4-5-3 de EMT+ de Landsat-7. *Land use obtained by colour composite 4-5-3 of ETM+ of Landsat-7.*

5. CONCLUSION

La télédétection a permis de délimiter les zones basses inondables et d'accéder à la description du milieu naturel (occupation du sol, infrastructures, etc.). L'imagerie ETM+ de Landsat-7 offre la possibilité d'identifier les zones de fortes concentrations d'habitation qui se localisent de part et d'autre du canal d'Andriantany et plus particulièrement dans la zone basse marécageuse.

L'utilisation du SIG a permis de mettre en évidence l'importance des notions d'homogénéité des zones basses inondables à faible risque d'érosion et d'hétérogénéité des zones de collines érodables séparées par des vallons susceptibles d'être inondables.

L'apport des SIG a permis l'analyse et le croisement des données sous forme de couvertures

indépendantes et superposables, ainsi que la restitution de ces données sous forme de tableaux et de cartes.

Les produits cartographiques ainsi obtenus constituent des outils précieux de travail permettant de :

- gérer les ressources naturelles en milieu urbain ;
- dresser un plan d'aménagement et d'urbanisation ;
- remettre à jour le plan ORSEC existant.

Pour l'étude de la dynamique des surfaces inondables et de la tendance de l'évolution de l'urbanisation, il sera souhaitable de disposer d'autres images satellitaires de plus grande résolution spatiale acquises à différentes dates.

Remerciements

Ce travail a bénéficié de l'appui matériel du FTM (Institut Cartographique de Madagascar). Nous tenons à remercier, messieurs Andrianjafimbelo Razafinakanga, Directeur général du FTM et Joseph Ramboazanokolona, ingénieur topographe.

Nous saluons également la sincère collaboration des membres du Département de géologie de l'École supérieure polytechnique d'Antananarivo, en particulier Mamy Andriamirija Rajaonarison, physicien.

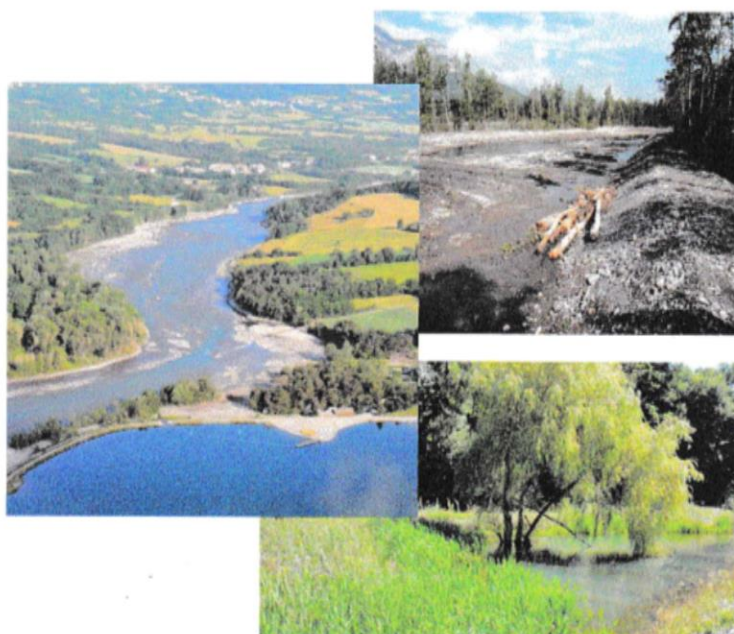
Références

- Andrianasolo, L.P. (2000) La plaine d'Antananarivo et ses environs : cadre géologique et géotechnique. Mémoire d'ingénieur en géologie, Département de géologie, École supérieure polytechnique d'Antananarivo, 133 p.
- Blanchard, F. (1994) Mais qu'a donc de particulier l'environnement en Afrique ? *Pangea*, vol. 27, p. 5-12.
- B.P.P.A. (Bureau pour la protection de la plaine d'Antananarivo) (1985) Rapport d'étude d'avant projet sur l'aménagement de l'Ifkopa dominant la plaine d'Antananarivo. Antananarivo, 89 p.
- Donque, G. (1975) Contribution géographique à l'étude du climat de Madagascar. Nouvelle Imprimerie des Arts Graphiques, Antananarivo, 478 p.
- Hoeblich, J.M. (1983) L'organisation du relief dans les environs de Tananarive, Madagascar. *Revue de Géographie*, juillet-décembre, n°43, p. 11-38.
- Noizet, G. (1967) Étude pour l'aménagement de la plaine de Tananarive. Rapport Annuel du Service Géologique de Madagascar, Antananarivo, 6 p.
- Raharijaona Raharison, L.J. et Randrianarison, J. (1997) Facteurs géologiques et climatiques influençant l'érosion en lavaka et ensablement des rizières : le cas du massif d'Ambositrandriampotry du sud du lac Alaotra. In H. Hurni et J. Ramamoisoa (éd.) IV^e Conférence internationale de l'Association pour les montagnes africaines (AMA). 26 mai-1^{er} juin 1997, Antananarivo, p. 159-172.
- Ratsimbazafy, J.R. (1970) Contribution au projet d'aménagement de la plaine de Tananarive-Madagascar. Thèse de doctorat, Université de Grenoble, 166 p.



Dynamique hydrologique et géomorphologique des cours d'eau DEUXIEME COLLOQUE DE L'ASSOCIATION FRANCOPHONE DE GEOGRAPHIE PHYSIQUE

Aix-en-Provence, France, 2015



Editeur scientifique : Jean-Louis BALLAIS

REVUE INTERNATIONALE DE GEOLOGIE, DE GEOGRAPHIE ET D'ECOLOGIE TROPICALES

Publiée sous le patronage de la Politique scientifique fédérale belge **belspo**
de l'Académie royale belge des Sciences d'Outre-Mer et de l'Africamuseum, Belgique



INTERNATIONAL JOURNAL OF TROPICAL GEOLOGY, GEOGRAPHY AND ECOLOGY

Published with the sponsorship of the Belgian Federal Scientific Policy **belspo**
of the Royal Academy for Overseas Sciences of Belgium and of the Africamuseum, Belgium

SOMMAIRE – CONTENTS

Jean-Louis BALLAIS

Préface : Dynamique hydrologique et géomorphologique des cours d'eau I-II

PASSINRING K.

Effets de l'écoulement des tributaires sur la dynamique des lacs de Léré (Mayo – Kebbi Ouest/Tchad)
The flowing out effects of tributary upon Lere's lakes dynamics (Chad/West Mayo–Kebbi) 191-200

Myriem NOURI, André OZER & Pierre OZER

Etude préliminaire sur le risque d'inondation en milieu urbain (Algérie)
Preliminary study on the flood risk in urban areas (Algeria) 201-208

Antonin MONTANÉ, Freddy VINET, Thomas BUFFIN-BELANGER & Olivier VENTO

Utilisation de la cartographie hydrogéomorphologique : Etat des lieux et perspectives
Hydrogeomorphological mapping: current situation and perspectives 209-214

Christophe ESPOSITO, Ghislaine VERRHIEST-LEBLANC & Michel KAUFFMAN

Crue de janvier 2014 dans le Var (France) : activation des acteurs locaux et nationaux pour un retour d'expérience
Floods of January, 2014 in the Var (France) : Activation of the local and national actors for an experience feedback 215-222

DAVID S., DURIN V. & COLLANGE L.

Dynamiques fluviales en contexte travertineux. Exemples provençaux (France).
Fluvial dynamics in travertine context. Provençal examples (France). 223-234

Aurélien MANDIMBIHARISON

Evolution dynamique de la rivière Ilempona et méthode de protection artisanale des berges
Dynamic evolution of the Ilempona river and artisanal protection of river banks 235-246

François GAZELLE

Gravières et espace de mobilité fluviale. Aspects réglementaires en France
Gravel pits and fluvial mobility space. Regulatory aspect in France 247-250

Olivier VENTO, Frédéric LAVAL & Bertrand BREILH

L'apport de la géomorphologie fluviale aux services de la renaturation des cours d'eau dégradés : exemple du Drac amont (France, Hautes Alpes)
The contribution of fluvial geomorphology serving renaturation of degraded streams : example Drac upstream (France , Hautes Alpes) 251-266



Numéro spécial

Evolution dynamique de la rivière Ilempona et méthode de protection artisanale des berges

Dynamic evolution of the Ilempona river and artisanal protection of river banks

Aurélien MANDIMBIHARISON⁽¹⁾

Abstract: From the three documents (an aerial photographic of 1960, an ortho-photo image of 2009 and an image Google Earth of 2013) and observations and investigations into ground that the evolution of the river Ilempona, a principal affluent of the Onive river, was approached. The integration of these three documents in a geographical information system made it possible to determine the index of sinuosity (Is) and surfaces of the active band, parameters indicating the morphological evolution of a river.

The statistical analysis of these three parameters (year, Index of sinuosity and surface of the band activates) detected 2 types of correlation:

- a very strong negative correlation between the year and surface;
- a strong positive correlation between the year and the index of sinuosity.

With the passing of years, with the erosion of the banks the surface of the active band should increase but here the case is completely the opposite, the peasants put at their profit the existence of the crumbling on the level of the banks to acquire a little more surface arranged in rice plantation. They set up a low wall of 3 lines of basalt or quartzite blocks, products carried by the river. This technique showed a double effectiveness initially in the protection of the banks against the aggressiveness of the river then in the improvement of the incomes.

Key words: Ilempona river, Index of sinuosity, protection, bank, SIG

Résumé : A partir de trois documents (une photographie aérienne datée de 1960, une image ortho-photo de 2009 et une image Google Earth de 2013) et des observations et enquêtes sur terrain, l'évolution de la rivière Ilempona, un affluent principal du fleuve Onive, a été abordée.

L'intégration de ces trois documents dans un système d'information géographique a permis de déterminer l'indice de sinuosité (Is) et les surfaces de la bande active, paramètres indiquant l'évolution morphologique d'un cours d'eau.

L'analyse statistique de ces trois paramètres (année, Indice de sinuosité et surface de la bande active) a décelé 2 types de corrélation :

- une très forte corrélation négative entre l'année et la surface;
- une forte corrélation positive entre l'année et l'indice de sinuosité.

Au fil des années, avec l'érosion des berges, la surface de la bande active devrait augmenter mais ici le cas est tout à fait le contraire : les paysans mettent à leur profit l'existence de l'éboulement au niveau des berges pour acquérir un peu plus de surface aménagée en rizière. Ils érigent un muret de 3 rangées de blocs de basalte ou de quartzite, produits charriés par le cours d'eau. Cette technique a montré une double efficacité d'abord dans la protection des berges contre l'agressivité du cours d'eau, ensuite dans l'amélioration des revenus.

Mots clés : Rivière Ilempona, Indice de sinuosité, protection, berge, SIG.

⁽¹⁾ Département de Géologie, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Université d'Antananarivo B.P. 1500 – Antananarivo – Madagascar.
Email : mandimbiharison.aurelien@gmail.com

INTRODUCTION

La dynamique fluviale est conditionnée essentiellement par :

- Le climat ;
- La superficie, la pente et la nature lithologique du bassin versant.

A Madagascar, 77% de la superficie est occupée par des bassins versants qui ont comme conséquence un drainage dissymétrique (PETIT, 1998) et la formation de cinq principaux bassins fluviaux (CHAPERON *et al* 1993) (figure 1) :

- Versant Nord et Montagne d'Ambre ;
- Versant du Tsaratanana ;
- Versant Est ;
- Versant Ouest et Nord Ouest ;
- Versant Sud.

Dans cet article un sous bassin versant du Versant Est qui occupe une superficie de 4 860 km² été analysé en retraçant l'évolution de la dynamique fluviale de la rivière Ilempona, principal affluent du fleuve Onive et faisant partie du bassin de Mangoro (CHAPERON *et al.*, 1993).

L'Ilempona prend sa source au pied du massif volcanique d'Ankaratra, traverse d'abord la grande plaine rizicole d'Ambohibary puis, après une zone de terrasses alluviales très fertiles, elle dégringole ensuite de nombreux seuils rocheux dans une sorte de vallée étroite et encaissée pour se jeter enfin dans une large vallée à fond plat avant de rejoindre le lieu de confluence avec l'Onive.

Le sous bassin versant où s'écoule la rivière Ilempona est marqué par diverses activités anthropiques telles que la riziculture, tant au niveau de la grande plaine d'Ambohibary que dans les vallées plus ou moins larges rejoignant ce cours d'eau et aussi sur les versants étagés aménagés en culture en gradin (RAUNET, 1997), la construction du réseau routier (un tronçon de la Route Nationale 7), l'édification d'un barrage hydroagricole et la protection des berges par perrés maçonnés.

CONTEXTE MORPHOLOGIQUE ET GEOLOGIQUE DE LA ZONE D'ETUDE

La zone d'étude, correspondant à une portion de 6,5 km de la rivière Ilempona, fait partie du bassin lacustre d'Antsirabe-Sambaina- Antanifotsy (BOURGEAT, 1972) qui s'est constitué après les premières émissions volcaniques d'Ankaratra (BESAIRIE, 1973) (figure 2). Sur ce tronçon, la vallée est étroite, profonde et encaissée et le débit y est fort d'où l'intérêt de la dynamique fluviale. Le versant sur la rive gauche est caractérisé par des rizicultures en gradins qui nécessitent un muret de protection.

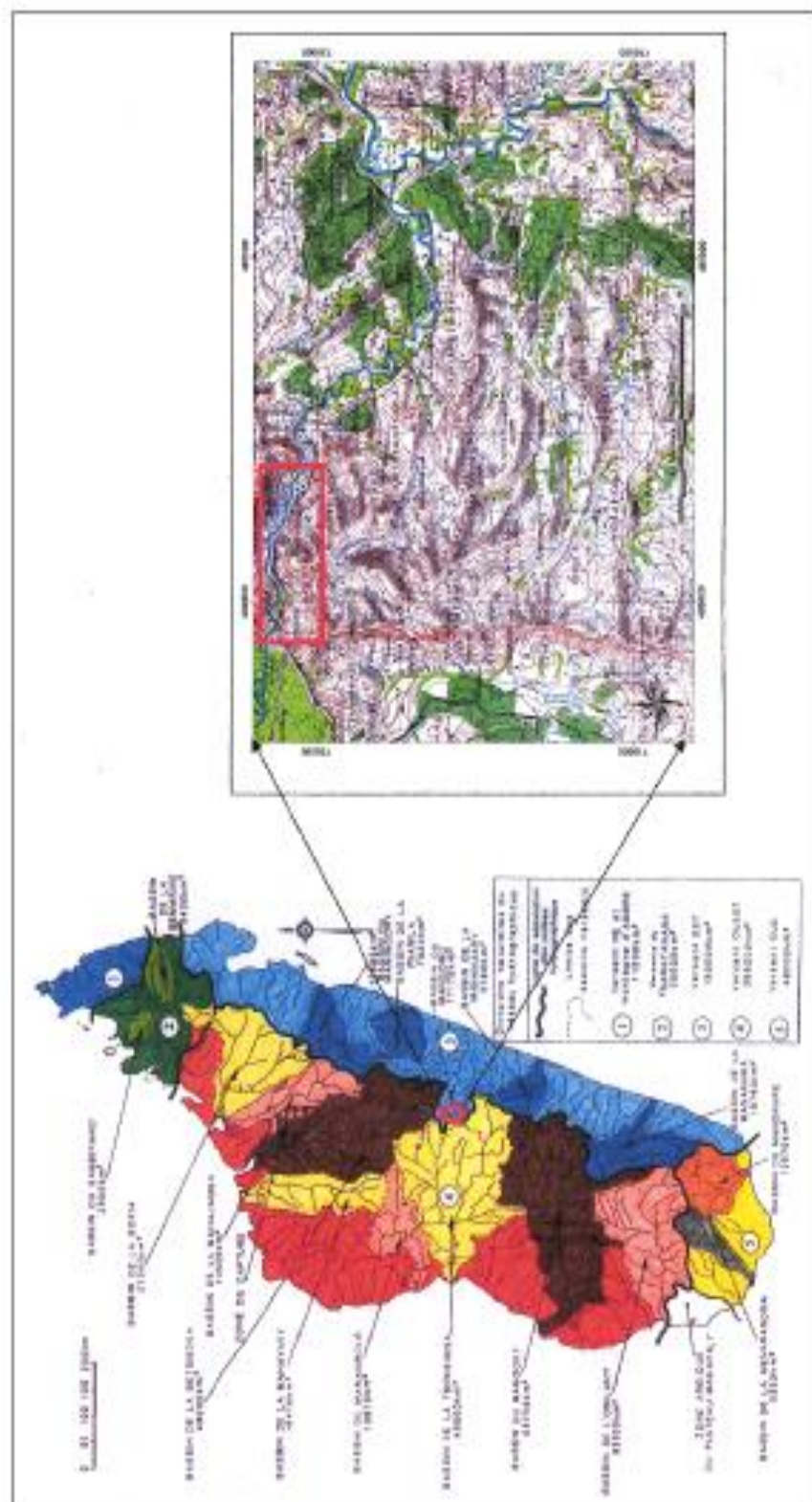


Figure 1 : Les cinq principaux bassins fluviaux malgaches et la zone d'étude (Chaperon P et al 1993).

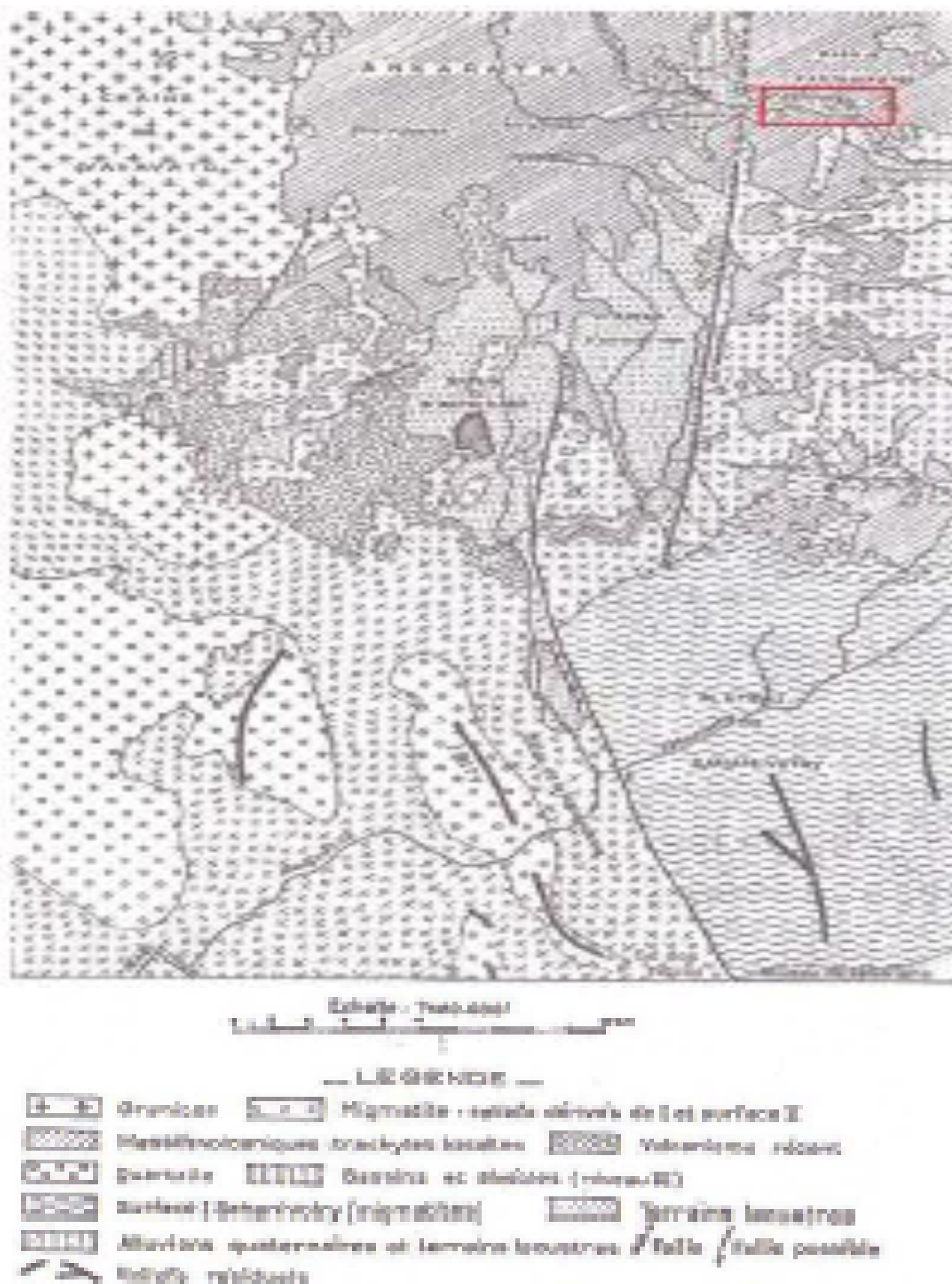


Figure 2: Les formations géologiques du bassin lacustre Antsirabe – Sambaina – Antanifotsy (BESAIRIE H.1973)

MATERIELS ET METHODES

Pour suivre l'évolution de la rivière Ilempona dans le temps, trois (03) documents d'époques différentes ont été utilisés (Figures 3a, 3b et 3c)

- D'abord quelques photographies aériennes de 1960 de la zone d'étude

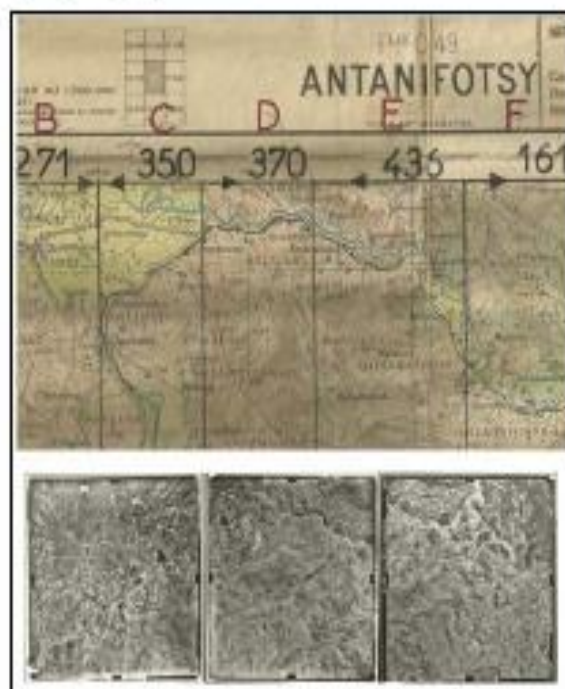


Figure 3a : Disposition des photographies aériennes (Mission O48-53/250 datée de 1960) N°390-370-436 sur la carte topographique d'Antanifotsy, Feuille O49 à échelle 1/100 000.

- Ensuite un extrait de l'orthophoto de Vakimankaratra à échelle 1/40 000 datée de 2009.

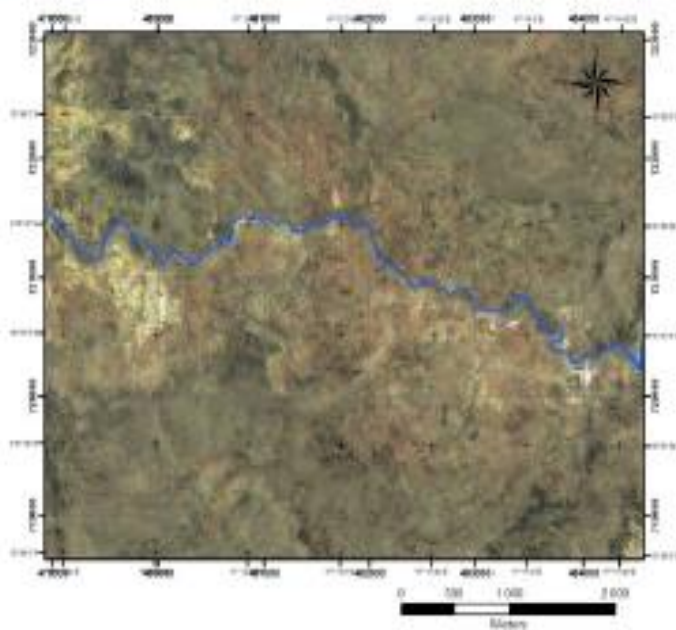


Figure 3b : Image orthophoto de la zone du tronçon étudié

- Enfin une Image Google Earth 2013 de la zone étudiée



Figure 3c : Extrait d'Image Google Earth du tronçon étudié

Ces documents ont été calés et rattachés à un système de coordonnées géographiques WGS 84 et une fois géoréférencés ils sont intégrés dans un Système d'Information Géographique sous forme de couches d'informations indépendantes. Ensuite, le tronçon considéré dans chaque document a été digitalisé et inséré sur fond orthophoto pour mieux distinguer et apprécier la forme, la largeur, la surface et l'allure de la rivière Ilempona. Ainsi avec les informations extraites des différentes couches, il est possible de calculer les indices de sinuosité, la largeur de la rivière tous les 650m (Figure 4) et la surface de la bande active.

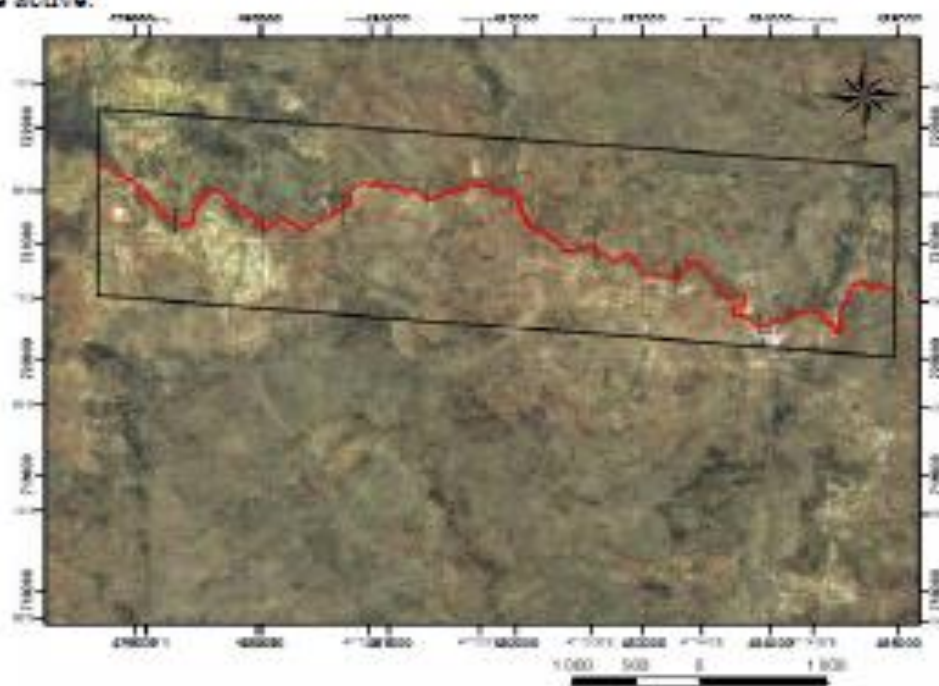


Figure 4 : Découpage tous les 650m du tronçon étudié

RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Caractéristiques du tronçon étudié

Le tableau 1 suivant dresse les altitudes du tronçon étudié tous les 650 mètres et les largeurs selon les années.

Tableau 1 : Altitude et largeur du tronçon étudié selon les années

Distance	Altitude (m)	Largeur(m) 1960	Largeur(m) 2009	Largeur(m) 2013
0	1656	17,36	18,37	15,75
650	1654	19,33	17,86	19,22
1300	1653	28,64	28,24	26,65
1950	1652	22,38	18,64	20,49
2600	1646	25,81	23,29	27,88
3250	1643	18,26	13,31	19,01
3900	1618	22,26	19,27	18,03
4550	1614	23,05	21,05	17,83
5200	1600	16,74	14,4	14,35
5850	1590	20,47	15,68	15
6375	1588	17,33	17,2	17
Moyenne		20,65	18,86	19,20

Même si la largeur fluctue au cours des années, la tendance générale est à la diminution comme l'affirme la matrice de corrélation du tableau 2.

Tableau 2 : Matrice de corrélation des largeurs du cours d'eau selon les années

Matrice (coefficient de corrélation de Pearson) :			
	L 1960	L 2009	L 2013
L 1960	1,000	0,889	0,838
L 2009	0,889	1,000	0,784
L 2013	0,838	0,784	1,000

Style fluvial

Pour connaître le style fluvial d'une rivière, le calcul de l'indice de sinuosité (I_s)

$$(I_s) = \frac{\text{Longueur du cours d'eau}}{\text{Longueur de la vallée}} \text{ est déterminant selon le tableau 3.}$$

Tableau 3 : Les différents types de style fluvial selon la valeur de I_s

Valeur de I_s	$I_s < 1,05$	$1,25 < I_s < 1,5$	$I_s > 1,5$
Style fluvial	Style rectiligne	Style sinueux	Style à méandre

Pour le tronçon étudié l'indice de sinuosité selon les années est représenté par le tableau 4

Tableau 4 : Indice de sinuosité selon les années

Année	1960	2009	2013
I_s	1,307	1,313	1,309

Donc pour le tronçon étudié, le style est du type sinueux.

A partir des données altimétriques le profil en long du tronçon étudié a été tracé (figure 5 ci-dessous).

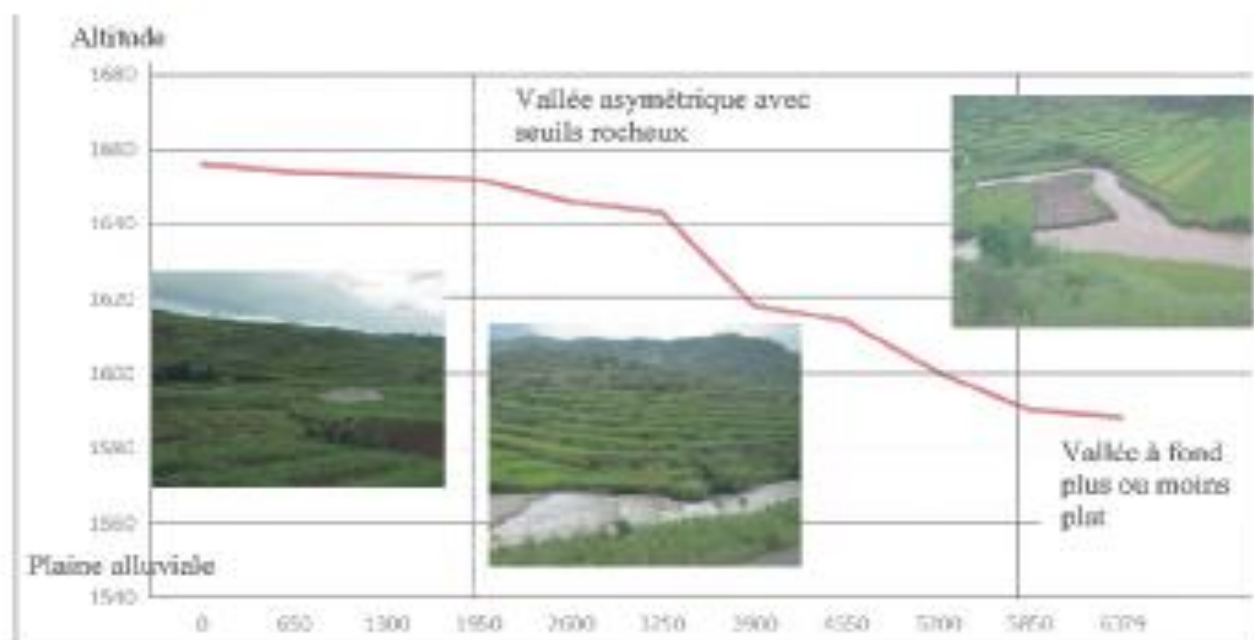


Figure 5 : Profil longitudinal du tronçon étudié

Surface de la bande active selon les années

Le tableau 5 ci-après dresse l'évolution de la surface de la bande active correspondant au tronçon étudié selon les années.

Tableau 5 : Surface de la bande active selon les années

Année	1960	2009	2013
Surface (m^2)	139 797	120 576	114 544

Au fil des années, la surface de la bande active diminue. L'analyse statistique des 3 paramètres (année, I_s , surface de la bande active représentés par le Tableau 6 et la figure 6) a décelé 2 types de corrélation:

- une très forte corrélation négative entre l'année et la surface;
- une forte corrélation positive entre l'année et l'indice de sinuosité.

Tableau 6 : Matrice (Coefficient de corrélation de Pearson) entre les trois paramètres

	Année	Is	Surface (m ²)
Année	1,000	0,710	-0,987
Is	0,710	1,000	-0,506
Surface (m ²)	-0,987	-0,586	1,000

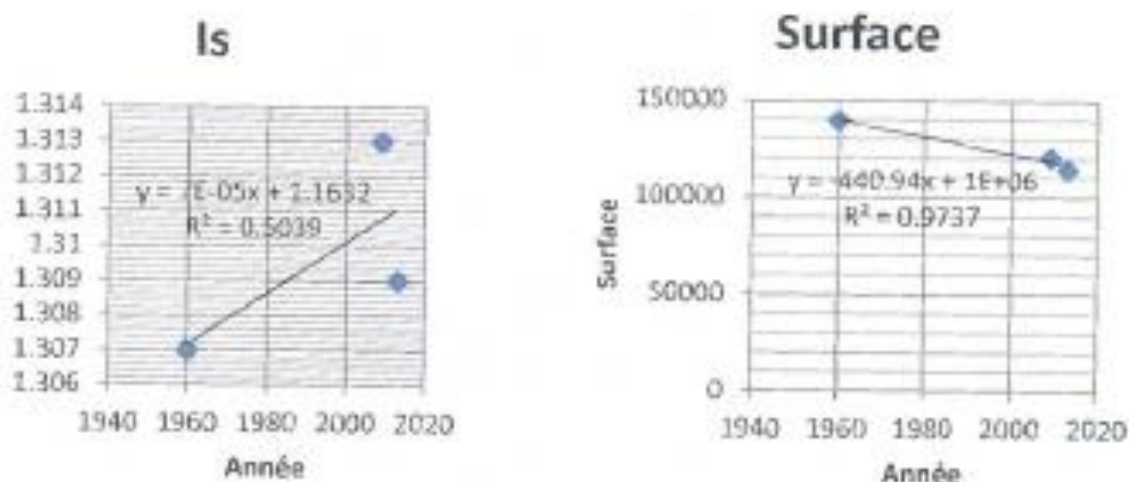


Figure 6 : Droites de régression montrant les deux types de corrélation

Evolution du tracé du tronçon étudié

Les paysans ont mis à profit l'existence des éboulements ou érosion de la berge pour acquérir une petite surface rizicole en y érigeant un muret à partir des blocs de basalte observés partout, sur les versants et dans le lit du cours d'eau. La figure 7 illustre un exemple avec croquis d'un mur de protection des berges.

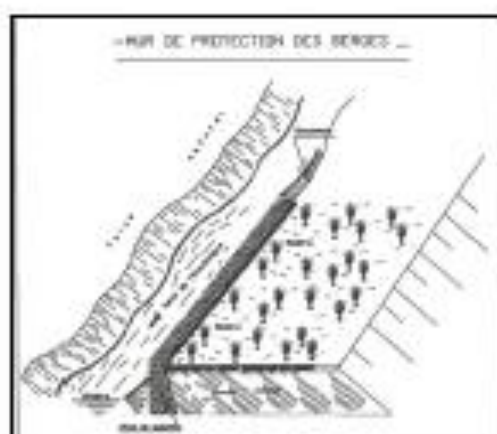


Figure 7 : Aménagement d'un talus éboulé en surface rizicole

La superposition des différentes couches du tronçon étudié selon les années et sur fond ortho photo 2009 a permis d'obtenir le document suivant (Figure 8).

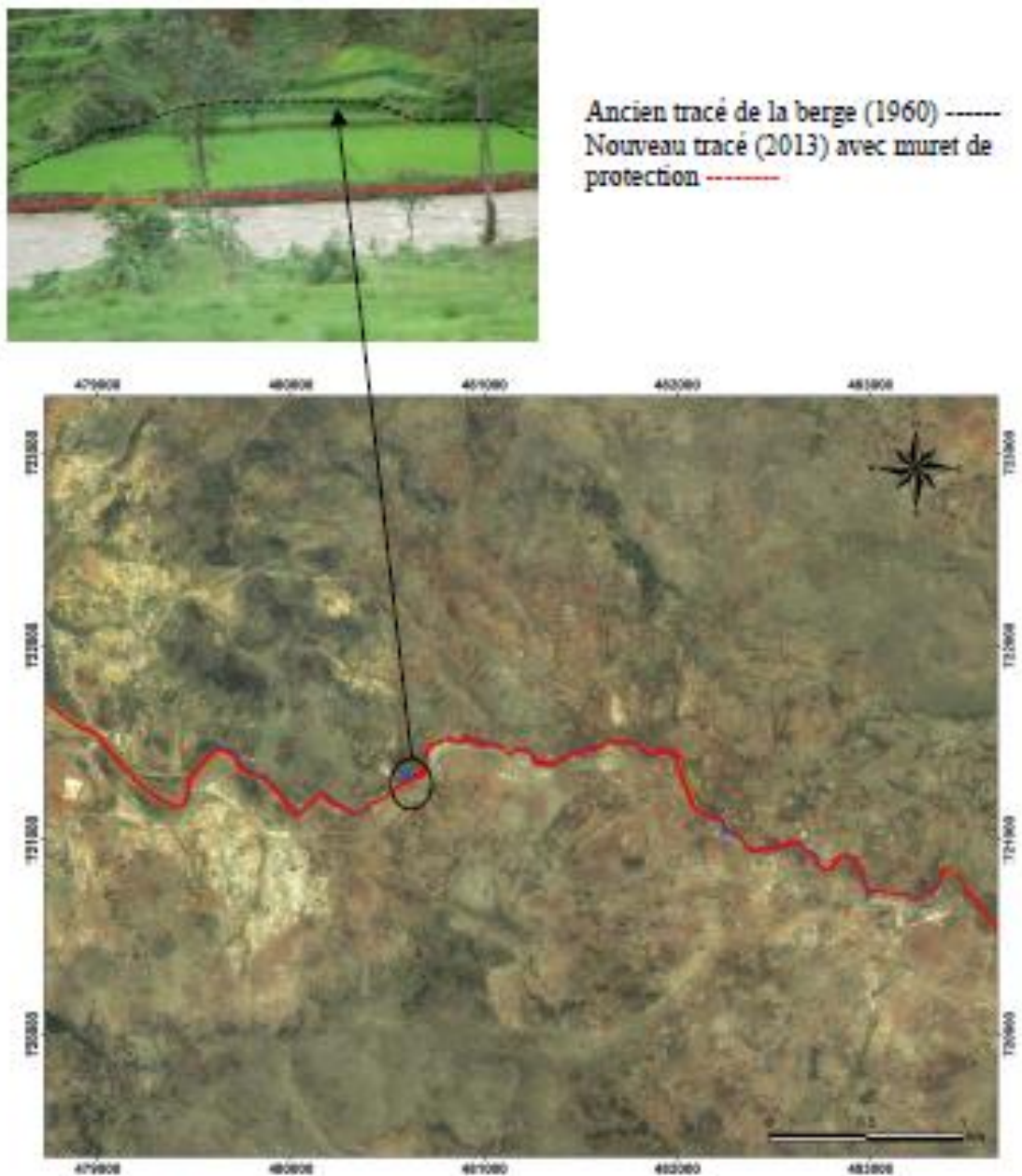


Figure 8 : Evolution du tracé du tronçon étudié sur fond ortho photo de 2009

CONCLUSION

Cette étude montre l'évolution de la rivière surtout la diminution de la surface de la bande active par la combinaison de deux facteurs naturel et anthropique. Pour le facteur naturel, il s'agit de l'éboulement des berges et la présence des blocs de basalte dans les environs immédiats du cours d'eau. Pour le facteur anthropique, les paysans dans cette région de Vakinankaratra aménagent les terrains à pente plus ou moins forte en terrasse et les parties ébouées le long du cours d'eau en rizière en érigeant des murets de protection à partir des blocs de basalte issus de l'éruption volcanique d'Ankaratra. Par suite de l'accroissement démographique, du problème foncier et de la nature du terrain, les paysans cherchent toujours les moyens de survivre et, dans notre cas, c'est de l'évolution de la rivière par l'éboulement de ses berges dont ils profitent pour aménager un nouveau terroir rizicole.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BESAIPIE, H. 1973. Précis de géologie malgache. *Annales géologiques de Madagascar*, 36, 140p.
BOURGEAT, F. 1972. Sols du socle ancien à Madagascar. *Mémoire ORSTOM*, 57, 338 p.
CHAPERON, P., DANLOUX, J. & FERRY, L. 1993. Fleuves et rivières de Madagascar. Ed. IRD, DMH, CNRE, 874 p.
PETIT, M. 1998. Présentation physique de la grande île Madagascar. Ed. FTM, 192p.
RAUNET, M. 1997. Les ensembles morphopédologiques de Madagascar. Ed. CIRAD-ONE-FOFIFA ANAE, 107p.

GEOCULTURE AND GEOSCIENCES IN THE REGION OF ANALAMANGA IN MADAGASCAR

MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques *¹ RASOLONJATOVO Mirantsoa Toavina.²

1 Department of Geology at the Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, ESPA

2 Natural Sciences at the Ecole Normale Supérieure, ENS

ABSTRACT

Many names of localities in Madagascar recall the words "stone or rock" whose meaning in Malagasy is "vato" (Vatomandry, Ambatohe, Ambatolampy, Ambatomainty, Ambatonilato, Ambatofinandrahana, Ambatondradama, Ambatomitrangana...). These names are evocative and / or related to an event.

In his speeches, his proverbs, his habits and customs, his beliefs the malagasy have often referred to the "vato" ("Vato nasondrotry ny tany", "Vato namelan-kafatra", "Nitsady toka ka sendra vato", "Vato kiboribory", "Vatolahy", "Ambato bevoahoka"...).

From these facts and observations that we want to emit in this communication, the concept "Geoculture", the link and the meaning of this culture on stones or rocks with the geosciences.

But in Madagascar this culture on stones or rocks change according to ethnicity, regions, events or circumstances and history.

Keywords: geoscience, culture, worship, vato, doany, geoculture, Analamanga, Madagascar.

1. INTRODUCTION

Since his appearance towards 3 million years, the man has been able to tame the surrounding nature and environment. The caves served as a refuge or shelter while the rollers and the rocks were used as tools of defense and hunting.

In contemporary civilization, the world's cultural richness has been expressed through the art of building (Pyramid of Egypt, the "moai", the monumental statues of Easter Island in Polynesia, the Mayan culture with its ability to build huge works using rudimentary techniques...).

From the material of survival, the stones became objects crowned for certain ancestral beliefs, to the materials of construction, of decoration, ornamentation and even of therapeutic objects.

In Madagascar, our ancestors were famous for their sense of observation, their respect for the environment and nature. They referred to this biotic world (living) and abiotic (not living like stones) that surround it to express themselves by creating and imagining word games in their speech many of which evoke the words stones or rocks (vato).

Linking geological knowledge with traditional Malagasy culture based on contemplation and observation of the natural environment, allows us to define a new concept that is "geoculture".

In the Central Highlands of Madagascar, especially in the region of Analamanga, the stones occupied an important place in the daily life of the population, in their belief and for the ancestors worship. The places of these cults deserve to be valued in "geosites".

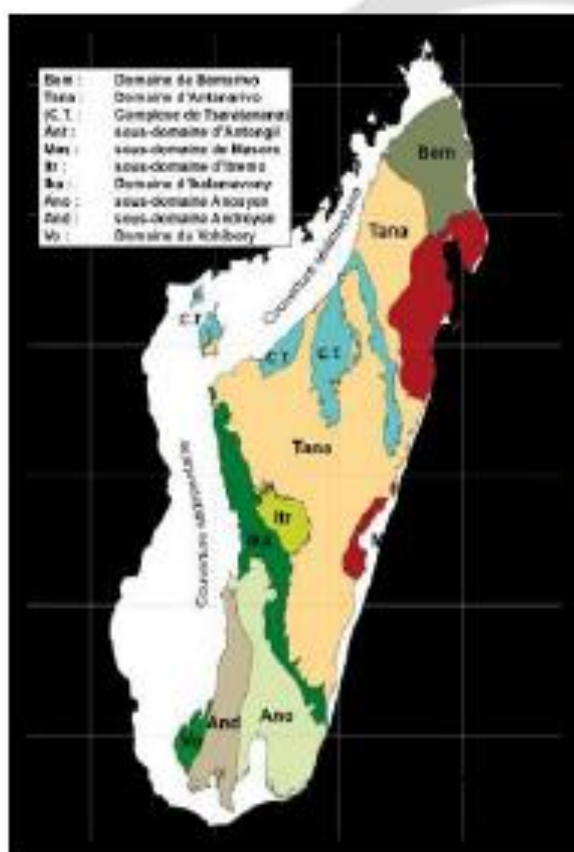
2. METHODOLOGY

Generally the methodology is based on observations and bibliographic research.

2.1- Framework of study

The geological history of Madagascar is summarized by a succession of events: cratonization (Dharwar craton), fragmentation and insularization. The island is made up of two distinct geological formations: the crystalline basement in the east and the sedimentary formation in the west.

The Precambrian basement occupying two-thirds of the island is divided into six areas according to recent work [1] (Fig- 1). It has an Archean frame consisting essentially of tonalitic gneisses and granite orthogneisses. These are the oldest known rocks in Madagascar forming the Malagasy shield defined as being the domain of Antongil-Masora. The extensive range of Antananarivo consists of orthogneiss and Neoproterozoic paragneisses in green to granulitic facies [1]. The Analamanga Region, part of this area of Antananarivo, is composed of gneissic and migmatitic formations intersected by many intrusions and granitic veins.



The six domains of the Malagasy Precambrian basement:

- In the North, the Bemarivo domain;
- To the east, the Antongil - Masora domain, subdivided into two sub - domains;
- At the Center, the Antananarivo domain;
- In the West the Andohahelo domain;
- In the South the domain of Andohahelo - Andohahelo, subdivided into two subdomains

Fig-1: The six domains constituting the framework of the Malagasy Precambrian basement.

Fig- 2 showing the different geological formations around Antananarivo and Manjakandriana [2] are included in the Analamanga Region. From this map, it appears that the area is very rich in rock materials, which confirms the saying of Rajemisa Raelison [3] "Tany bevato i Madagasikara" (Madagascar is full of stones or rocks). Due to its island position and its tectonically unstable geologically, Madagascar has a large biodiversity that can be valued in "geosite".

2.2- Concept of geosites [4]

The concept of "geosite" was introduced by UNESCO and defined it as: «A punctual site or an area of a few square meters to a few square kilometers that can extend at the level of the landscape and which has an important geological point of view (mineral, structural, ...) geomorphological, physiographic, etc. which meets one or more exceptional criteria, whether precious, rare, vulnerable or threatened».

These are sites of scientific interest, particularly geological and geomorphological, offering landscapes of scientific, cultural and aesthetic value.

Geosites are so many riches that can be classified as World Heritage.



Fig-2: Geological formations around Antananarivo and Manjakandriana

Fig-3 shows some examples of Madagascar: the ruiniform massif of Isalo (3a), the Tsingy or Lapiéz of Bemahara (3b), the crater lake of Tiritiva (3c)



Ruiniform massif of Isalo (3a) Lapiéz of Bemahara (3b) Crater lake of Tiritiva (3c)

Fig-3: Some geosites in Madagascar

2.3- Beliefs and religious life

The traditional Malagasy civilization proper to religious life is based on the belief in "Zanahary" or "Andriamanahary" which designated divine beings. The primitive religion was built around the belief in the immortal soul that separates from the body to the death of man, becoming "sacred". The ancient funerary cults celebrated the separation of the sacred dead from the world of the living. The ancient societies of Madagascar thus venerated their dead who according to the regions were considered as "gods" and "spirits" water, stones and forests, spirits that can haunt and possess living beings. Some people also believe that souls dwell in specific places (for example, in high mountains like Ambondrombe, in the waters, in the forests and in the caves) These places become sacred and are surrounded by taboos, hence the name "tany ady". These are the places that turn into "Doany". Our ancestors respected the space they considered sacred.

This civilization has evolved, especially with regard to the role of Zanahary through the creature (human being) and nature (water, stone, relief, forest ...). In this logic the traditional Malagasy lived in a universe that connects the living and the dead. Death is an unavoidable step to access the status of ancestor, a symbol of spiritual power. The Malagasy Ancestors, long before the entry of christianism, had their beliefs, they believed in "supernatural forces" superior to them and that can be beneficial or evil in relation to the acts and behaviors of each one.

3. RESULTS

3.1 The place and role of stones in everyday life and traditional Malagasy society [5]

3.1.1 Stone as building materials and protection of the village

In the entrance of the villages of Highlands Central are always observed of "Hadivory" (ditches of defense). In addition to these ditches that surrounded the village, there is the presence of the "Kodivato" (portal stone disc, Fig- 4).



Fig- 4: The stones used as gate for an old village in the Central Highlands of Madagascar

3.1.2 The stone marks power and territory

A sovereign who ascended the throne should ascend to the "Vatomasina" (sacred stone) to deliver his speech. This action meant to the people that the sovereign had full power, that all the land belonged to him and that the people must obey him.

In some localities, other than in the vicinity of the Analamanga Region, the raised stones "Vatolahy" also mark the territory of a kingdom. It can also symbolize other situations such as the commemoration of events or people, the witness of an act of solidarity of the population.

3.1.3 The stone in the names of localities

Many place names carry the word "vato" and have a value or meaning depending on the color, quality or characters of the stone or rock.

Examples:

- Ambatofotry (white stone) Ambatomasina (red stone), Ambatomanga (blue stone), Ambatomainty (black stone);
- Ambatotonahana: place showing rocks with natural holes;
- Ambatondradama (Radama stone): name of locality located in the North West of Ambohimanga. It is a place where Radama played during his childhood and became sacred (doamy);
- Ambatomasina (sacred stone) located east of Andohalo, northwest of Ambohitantly. Our ancestors think that this rock shelters *vazimba* so they sanctify it;
- Ambatomisatroka a hat-shaped rock on the road to Andramasina;
- Ambatomiantandro: (in Ambohimanga) it is the summit of the great rock south of Ambohimanga and southeast of the palace. According to its name, it is the rock at the top of the village;
- Ambatomitsangana: where there is a rock shaped elongated and placed as a pillar. This rock is a symbol of memory of someone with an important history;
- Ambatobevohoka (pregnant stone) is to evoke a project or an unrealized or unfulfilled promise.

3.1.4 The stone in proverbs and sayings

The elders are known for their wisdom and knowledge based on the observation of the environment. These two characters were manifested in part by oratorical forms called "Kabary" which consists in making puns by using word game or example. They are figures of styles used during a speech.

Many proverbs evoke the word stone "Vato". Here are some examples:

- "Izy mitambatra vato, izy misaraka fanaka" (Literally: those who unite are like the rock and those who separate are like sands);
- "Vato ambany riana: try mikorontana fa mifanamboatra toerana" or "Vato an-dava-drano: try miady fa mifanajary toerana" (Literally: Rocks under a waterfall: they are not in confusion but are amalgamating with each other);
- "Mandry ivohony vato" (Literally: sleeping on stone)
- "Vato namelan-kafatra" (literally: stone where one left the messages).
- "Ny tanora vato mandondona, ny antitra hazo amoroa-terama, ka try hita izy hianjera aloha." (Literally: The young man is like a stone overhanging and the old man like a tree on the edge of the precipice: we do not know which one of the two will fall first).
- "Aza mitaitry ny ho sola, fa vato no hololohavina" (Literally: Do not be afraid to be bald while carrying stones on your head);
- "Mitari-bato try miboraka: vary ny androatokon'aina" (Literally: Shooting a big block without screaming makes you lose half of your energy).
- "Ny vato manatra ny vato, ny hazo manatra ny hazo" (Literally: A rock is ashamed of a rock and the tree of a tree).
- "Vato an-tanimbary ka na try voan'ny anty fizarano aza, ho tratra ny angady lohatsena" (Literally: A stone in the rice field: if the sickle of the harvest saves it in autumn, the spade will take care of it at spring).
- "Aza atao fihavanana-bato: raha tapaka try azo atoly, fa atovy fihavanana-dandy: raha madilana, azo tohisana" (Literally: That friendship is unlike that of stone, once broken, it does not mend anymore but rather to that of silk threads because if they are too much we can always strengthen them).

3.1.5 The stone in the games

In traditional society, the "Tanisa", a game that involves juggling at least two stones is for boys while the "Trobate" a game that consists of knowing how to juggle five small stones at least in order to accumulate points is exclusively for the girls. The stone was really linked to the Malagasy civilization. This is visible in many situations in the daily lives of our ancestors. The old Malagasy gave an important place to the different elements of their nature and their environment. This importance is proved by the idea of *Manan-jina* or *Miny Tsimy* (who are sacred). Many places across the Big Island, for example, have their taboos that should not and should in no way be desecrated or transgressed. Malagasy knew perfectly associate the "Materials" of their entourage with the cults and the needs necessary to the dailies. Preventing attacks and aggression from outside and protecting the people, ditches and walls with gates were built with stone discs; stones were erected in village foundations, markings of territory or in children's games. We can thus conclude that the stone was used almost in all facets of

the daily life of the ancients. Certainly, the stone was really linked to our civilization by its presence in the daily life of the Malagasy yesterday. However, there were still limits because it was linked to a prohibition.

3.2 Doany and offerings [6]

"Ny vato aza mba nahitana soa hoveva-manaka", is said of a kind of Malagasy culture that is worship on the rocks. These cults will be held in sacred places that are usually rocks or in caves where people ask what they want and make promises (fig-5). If their demands come true, they will fulfill their promises and bring offerings. Here, these are considered "oil". These sacred places have ties to Malagasy royal stories and many people think that the souls of these Kings are still roaming these places commonly called "Doany". For example: The place where the soul of Randriamitety lives is called "Doany de Randriamitety" (it is in a cave on the southern slope of Andringitra).



5a Rock as a ball



5b Randriamitety cave

Fig- 5: Places of offerings

4. DISCUSSIONS

4.1 Significances and scientific explanations of these sacred places

Most "Doany" in the study area are located on a hill and made up by rocks and / or water around which are some vegetation such as *Afromomum guineense* (longoz), banana, nonoka (a species even family as the *Ficus*), *Ambora*, *vahy*, *Nonoka*, *Dracaena radradaka* sp, *Kalanchoe* sp, *Lantana camara*, This water comes from the fracture sheet.

The dominant geological formations in the central part of the island are granitoid migmatites and granitic intrusions. These formations are massive rocks traversed by fractures or cracks (Fig-7). Fractures cut out granitic (or migmatitic) rock into angular blocks and can be used for entrance (Fig-6). The edges of these angular blocks are dulled and the granite massif debits into "balls".



Figure 6: Raketamanga cave entrance



Figure 7: Fractured rock with a pond

Fig-8 illustrates the different stages and components of the granitic massif disintegration.

- At the base is distinguished the intact solid rock without any deformation;
- Then occur fractures that cut out the granitic rock into blocks and thus constituting the fracture sheet;
- These fractured rocks are surmounted by angular blocks which finish by the shape in ball;
- The granite becomes more and more rotten but the original structure is still preserved to constitute a loose mass called "Isalterite or granitic Arena". On the level of this granitic arena we can meet the arena tablecloth;
- The alteration becomes much more extensive and the original structure of the granite (bed rock) is completely erased, the loose material thus formed is called "alloterite" which is often surmounted or not by a cuirasse. The leaching of loose materials into the interstice of the blocks by runoff leaving an empty space and thus forming caves.

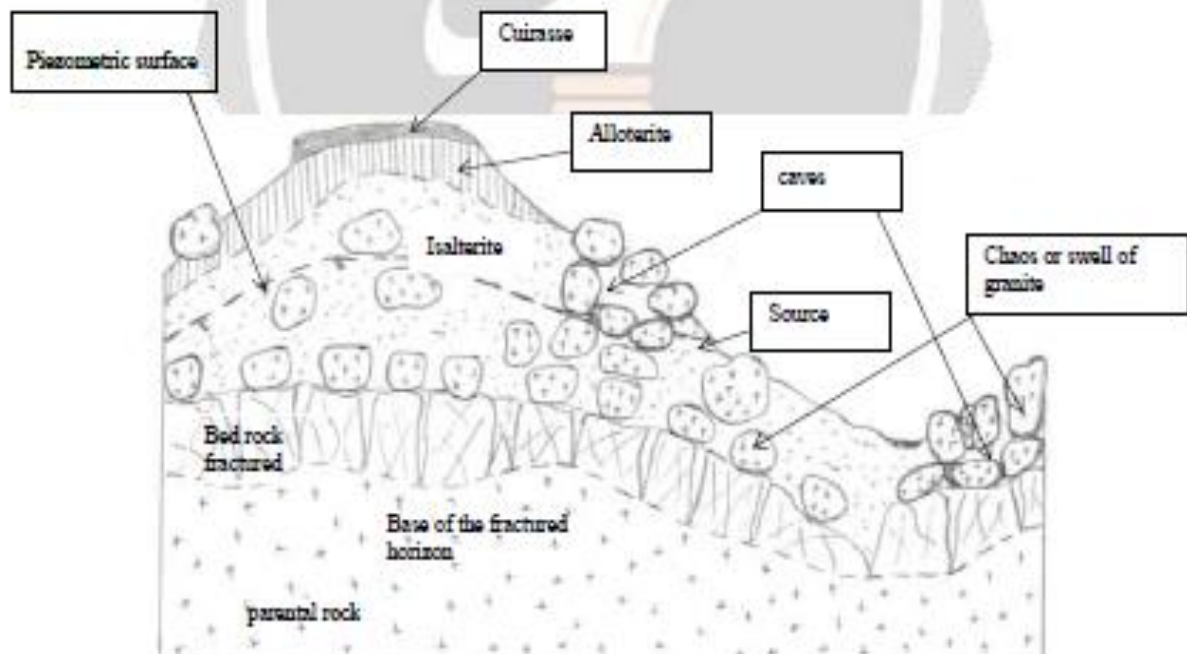


Fig- 8: Schematic drawing of disintegration into a ball of a granite massif

4.2 Cultural and scientific significances of water and rock [5]

Water and rocks (Vato) have various significances whether cultural or scientific

Table-1: Significances cultural and scientific of Water and Rock

	Cultural significance	Scientific significance
Water	It represents all the forces procured by the Creator. She is a healer, protector and purifier (she erases the sins and difficulties of believers) so water means life. Water also brings goods that is why a Malagasy affirmation insists that "ny tao-drano zava-mahery" (The blessing is sacred thing)	Water is a chemical compound. According to studies explaining the genesis of life, we can see that the appearance of life on Earth depends on the existence of water. Water always precedes the appearance of life so it is a source of life.
Rock	It is: – a model: "Izay mitambatra vato, izay misaraka fasika" (its coherent formation means solidarity and its loose formation means that there is a break in solidarity). "Vato nasondrotry ny tany" (rocks released from the ground): is said of a person or a family having made a great effort before reaching an important place in the social life. – useful for memorizing a crucial event. "Vato nampalam-kafatra" (rocks that we left messages). For the Malagasy, lifted stones are ways to memorize crucial events or stories for the new generation to know and remember "Vato kiboribory" (rock as a ball): refers to a person who has no family, child or friend	. A rock is an assemblage of minerals. In general, its formation is said to be coherent or hard: there is a solidarity or cohesion but after alteration and disintegration, the formation becomes loose, that is to say the solidarity is broken. Example: Sands (sedimentary rocks) are formed from metamorphic rocks and magmatic rocks that break up. The magmatic rocks come from the cooling of the magma. If it cools down deep during its rise, we will have a formation of the rocks of depth (or plutonic). In general, these rocks appear on the surface by erosion that is to say by the removal of their cover (ground). The stelae or raised stones are made by hard rocks. They are more resistant to erosion. So, from generation to generation, they can still see the works of their ancestors that make them know their origin. The ball shape comes from the alteration of rocks rich in silicate (example: granite, gabbro ...)

5. CONCLUSION

Geoculture makes it possible to appreciate the value of various Malagasy cultures in relation to the rock or stone. The sacred character attributed to the rock "Vato" by the Malagasy society is recognized in the "Doany", tomb of the dead Kings.

In order to better preserve and enhance the geological heritage with cultural appeal, environmental education and public awareness of its importance and its links with the environment are needed. Educating also serves to support scientific research and its dissemination by encouraging dialogue between geo-scientists and the local population.

6. REFERENCES

- [1] PGRM. 2012. New geological and metallogenic maps from Madagascar to 1/1 000 000 with explanatory note. Geological Survey of Madagascar Antananarivo
- [2] BESAIHIE H. 1973. The various interpretations of the Malagasy basement. Geological Service of Madagascar.
- [3] RAJEMISA RAOLISON R. 1985. Rakibolana Malagasy. Bookshop Amboasontany Fianarantsoa. 1061p.

- [4] MANDIMBHARISON A.J. et al 2016. For a better knowledge of the new concepts relating to the "Earth" as: Geodiversity, Geosite, Geoconservation, Geotourism, Geopark and Geoseducation in Madagascar. *MadaHary*, vol 5, 2016 p 19-37
- [5] RAJERISON H. 2011. Studies of cut stone through the commemorative temples of Antananarivo: ethnology essay on techniques. Master's thesis. Fliu. University of Antananarivo.
- [6] RASOLONJATOVO M. T. 2014. Links between culture on "vato" or rocks and their scientific significance (geoculture). Cases in the area of Andringitra, Ambohidratrimo District, Analamanga Region. Memory CAPEN CER Natural Sciences ENS.



3^e colloque de l'Association francophone de Géographie physique
organisé par l'Université de Liège et l'Università degli studi di Sassari

La géographie physique et les risques de pertes et préjudices liés aux changements climatiques

Castelsardo (Sardaigne - Italie) du 19 au 21 mai 2016



Éditeurs scientifiques : Pierre Ozor, Sergio Giménez et André Ozor

Evolution du trait côte de la partie ouest de Madagascar

Mandimbiharison Aurélien

Madagascar est une île qui dispose plus de 5600 km de côtes dont leur recul a été estimé entre 5,71m et 6,54 m en 1997. Elle est aussi exposée annuellement aux cyclones tropicaux. Entre 1990 et 2004, 50 cyclones de catégorie 4-5 ont été enregistrés contre 18 pour la période allant de 1975 à 1989. Ces cyclones ont des effets tant sur les activités socio-économiques de la population que sur les diverses infrastructures mais aussi et surtout sur le trait des côtes.

Dans cette communication, nous allons prendre le cas de la ville de Mahajanga et ses environs. C'est la deuxième ville portuaire de Madagascar et très prisée aussi par les vacanciers car elle offre 5 km de plage de sables fins alternés par des rares endroits d'escarpements rocheux et quelques zones de mangroves. Mais une partie de cette plage appelée « Village touristique » a été maintes fois modifiée non seulement par son instabilité géologique mais surtout par les effets des courants marins et des cyclones.

A part l'utilisation des images « Google Earth » multi-dates et leur intégration dans un Système d'Information Géographique (SIG) permettant de tracer les différents traits de côtes, les impacts du cyclone Hellen en 2014 sur les activités socio-économiques ainsi que la cartographie des zones inondables dans la ville de Mahajanga seront décrits.

Mots-clés : Mahajanga, plage, cyclone, trait de côte, SIG

Mandimbiharison Aurélien, Département de géologie, Ecole supérieure polytechnique d'Antananarivo, Antananarivo, Madagascar, mandimbiharison.aurelien@gmail.com





GEO-ECO-TROP

ISBN 1370 - 6071

<http://www.geocotrop.be>

Revue internationale de Géologie, de Géographie et d'Ecologie tropicales
publiée sous le patronage de la Politique scientifique fédérale belge (Belspo)
et de l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer de Belgique

International Journal of tropical Geology, Geography and Ecology
published with the sponsorship of the Belgian Scientific Policy (Belspo)
and of the Royal Academy for Overseas Sciences of Belgium



20.12.2015

Pr.Dr. Aurélien J. MANDIMBIHARISON
Maître de Conférences
Chef du département de Géologie de l'ESPA
BP 1500
101 ANTANANARIVO

Cher Professeur,

Sur proposition du Professeur André OZER, de l'Université de Liège, le Conseil d'Administration de GEO-ECO-TROP a décidé, lors de sa dernière réunion du Bureau tenue le 10.12.2015, de vous accepter comme membre du Comité de Rédaction de notre revue.
Cette décision prend effet dès à présent.

Confraternellement.

Pr.Dr.Emile ROCHE
Président du C.A.

Gestion générale - General Management:

Dr. E.ROCHE - ULg, Palaeontology - Sart Tilman, Allée du 6 Août, B18 / P40 - B.4000 LIEGE 1 (Belgium)
Phone: 32-4-366.53.91 / 0478-94.11.46 - Fax: 32-4-366.53.38 - e-mail: rocheemile@yahoo.fr

Trésorerie - Treasury:



Association de Palynologues

E.ROCHE
Secrétaire-Trésorier
Ulg Paléontologie - Sart Tilman
Allée du 6 Août B 18/P40 - B.4000 LIEGE 1

Compte bancaire-Bank account:

ING 310-0783847-76
IBAN: BE91 3100 7838 4776
BIC: INGB3333



GEO - ECO - TROP



Présentation

Comité

Publications

Actualités

Ressources

Revue internationale de géologie, de géographie et d'écologie tropicales
International journal of tropical geology, geography and ecology

ISSN 1370 - 6071

Revue publiée sous le patronage scientifique de
l'Académie royale des Sciences d'Outre-Mer de
Belgique Journal published with the scientific
sponsorship of the Royal Academy for Overseas
Sciences of Belgium

Membres fondateurs.

Founder members.

- Jean Alexandre (Université de Liège, Belgique)
- François Malaise (Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Belgique)
- Sybille Pyre (Université de Liège, Belgique)

Bureau.

Management committee.

- Emile Roche (U.Liège, Belgique)
- Thierry De Putter (Africamuseum Tervuren, Belgique)
- Eric Warner (Musée Royal de l'Afrique Centrale, Belgique)
- Morgan De Dapper (U.Gent, Belgique)
- André Ozer (KAOW-ARSOM, Belgique)
- Pierre Ozer (U.Liège, Belgique)

Comité de rédaction.

Editorial board.

- Jules Aloni Komanda (U. Kinshasa, R.D. Congo)
- Kheloufi Benabdeli (U. Mascara, Algérie)
- Taieb Boumeaza (U. Mohameddia, Maroc)
- Donatella Carboni (U. Sassari, Italie)
- Bruno Digbehi Zeli (U. Cocody, Côte d'Ivoire)
- Christian Dupuis (U. Mons-Hainaut, Belgique)
- François Habyiaremeye (I.r.Sc.n.B., Bruxelles, Belgique)
- Chantal Kabonyi Nzabandora (U.O. Bukavu, R.D. Congo)
- Aurélien Mandimbiharison (ESPA, Madagascar)
- Mokili Mbuluyo (U. Kisangani, R.D. Congo)
- Jean-Claude Micha (KAOW-ARSOM, Belgique)
- Andrés Pardo Trujillo (U. Manizales, Colombie)
- Trinh Phan Trong (Academy of Sciences, Vietnam)
- Florence Quesnel (BRGM Orléans, France)
- Jurgen Runge (U. Frankfurt a.M., Allemagne)
- Abdelkader Sbati (U. Oujda, Maroc)
- Tahar Sghaier (INRGREF, Ariana, Tunisie)

Edition, mise en page, photocomposition.

Printing, layout, photocomposition.

- Emile Roche (U. Liège, Belgique)

Publié par.

Published by.

- Université de Liège (Belgique)

Gestion.

Management.

- Emile Roche (Université de Liège, Belgique)

Site internet.

Website.

- Marc Salmon (Service public de Wallonie & Université de Liège, Belgique)

Liège, le 22 décembre 2013.

M. Mandimbiharison Aurélien
Chef du Département Géologie à l'ESPA
Université d'Antananarivo- Madagascar
+261343185296, +261320402451

OBJET: lettre d'invitation dans le cadre de la bourse de mobilité 'DREAM'

Cher M. Mandimbiharison Aurélien,

Par la présente, nous avons l'honneur de vous inviter à visiter notre Département de Géologie au sein de la Faculté des Sciences à l'Université de Liège à partir de l'année 2014 pour une durée d'un mois. Cette visite sera une opportunité pour vous de voir le déroulement de la formation sur les géorisques et la géologie de l'environnement que nous disposons (ce pourquoi je vous suggère de faire la visite soit en mars 2014 soit en octobre-novembre 2014 lorsque je donne des cours qui pourraient vous intéresser). Elle sera aussi une occasion de voir ensemble la faisabilité du projet de cotutelle (déjà démarré pour Mr. Andriherindrainy) et de partenariat pour le démarrage du parcours « Géologie de l'Environnement et d'Aménagement » que vous allez mettre en œuvre à partir de l'année 2014.

Durant votre visite nous vous aiderions à accomplir les activités suivantes :

- visite des chantiers, laboratoires et centres relatifs aux géorisques ;
- assister ou prendre part à la formation sur les géorisques, géologie de l'environnement ;
- se documenter sur les thèmes relatifs à la géologie de l'environnement, à la géomorphologie littorale et à son aménagement et aux géorisques (partie donnée en géographie).

Je vous prie Monsieur de croire, à l'assurance de ma sincère considération.



Hans-Balder HAVENITH

MANDIMBIHARISON Aurélien

Enseignant à l'ESPA Université d'Antananarivo

RAPPORT D'ACTIVITES

Date d'arrivée à Liège : 01 octobre 2014 à 19heures (Heure locale) accueilli à la gare Liège Guillemins par un représentant de l'Unité Géorisques et Environnement du Département de Géologie de l'Ulg ;

Visites de courtoisie : au niveau du Département de Géologie et de l'Unité Géorisques et Environnement (Sart Tilman), au niveau des Autorités Universitaires (Place du XX Août) ;

Au niveau académique :

- assister au cours de Neotectonics and seismology du Prof Hans Balder Havenith ;
- assister à un séminaire donné par Marie Heeren , doctorante au sein de l'Unité sur le thème « caractérisation de la zone faillée de Hockai et évaluation de son potentiel géothermique » ;
- assister à un compte rendu annuel sur un projet concernant les géorisques en Afrique Centrale GEORISCA, financement fédéral et effectué par l'Ulg, ULB, VUB et coordonné par le Musée Royal d'Afrique Centrale (MRAC) ;
- effectuer une descente sur le terrain concernant les glissements du terrain dans les environs de Battice, en rapport avec le séminaire donné par Marie Heeren ;

Au niveau recherche :

- utilisation de Google Earth dans la cartographie de quelques 282 ravins ou lavaka avec quelques glissements dans la Région Alaotra ;
- utilisation sommaire de quelques logiciels ArcGis, QGis, Envi avec les données ramenées ;
- démonstration de l'utilisation de tous ces outils pour notre cas ;
- la finalité doit être l'élaboration de la carte de susceptibilité mais le temps nous fait défaut ;
- recherche bibliographique au niveau de la Bibliothèque des Sciences et Techniques (BST).

Autres contacts :

Quelques contacts ont été faits avec d'autres Professeurs du Département Géologie (Frédéric Boulvain, Nathalie Fagel, François Fontaine) et du Département de la Géographie (André Ozer, François Petit).

Contact au niveau de la BST qui nous a fait don de quelques revues sur la Géologie de l'Ingénieur.

Commentaire :

Si d'une manière générale le principe et la démarche sont compris, beaucoup de détails et surtout la maîtrise de ces logiciels ainsi que les interprétations restent à faire.

Pour conclure, notre séjour en Belgique est fructueux mais nous laisse sur notre faim. Faute du temps et aussi des logiciels (ArcGis et Envi) sur notre ordinateur personnel, nous n'avons pas pu faire des applications à la maison.

Remarque du Professeur Havenith

Le Professeur Hans Balder Havenith pense également qu'il faudrait prévoir des séjours de 3 mois minimum pour qu'une collaboration fructueuse puisse s'établir.

Liège le 30 Octobre 2014



Hans-Balder Havenith



Mandimbiharison Aurélien

PROGRAMME

French and Portuguese Curriculum Development Workshop for the Regional Masters Programme in Integrated Water Resources Management (IWRM)

**19 – 20 March 2015, City Lodge Hotel, Hatfield, Pretoria,
South Africa**

Day 1: 19 March 2015

Time	Presentation	Presenter	Facilitator
08:00 – 08:45	Registration		Krasposy Kujinga
08:45 – 09:00	Introductions	Krasposy Kujinga	Krasposy Kujinga
09:00 – 09:15	Welcoming Remarks	Dr Jean-Marie Kileshye Onema	Krasposy Kujinga
09:15 – 09:45	Overview of the WaterNet Phase III Strategy	Dr Jean-Marie Kileshye Onema	Krasposy Kujinga
09:45 – 10:00	Discussion	All	Krasposy Kujinga
10:00 - 1030	TEA/COFFEE BREAK		
10:30 – 11:00	Experiences from UDSM	Dr Joel Nobert	Krasposy Kujinga
11:00 – 11:30	Experiences from UZ	Dr Hodson Makurira	Krasposy Kujinga
11:30 – 12:00	Discussion	All	Krasposy Kujinga
12:00 – 12:30	Presentation from Angola	TBA	Krasposy Kujinga
12:30 – 12:45	Discussion	All	Krasposy Kujinga
12:45 – 14:00	LUNCH		
14:00 – 14:30	Madagascar Presentation	MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques &	Dr Joel Nobert

		RAMANARIVO Solofofomampionina,	
14:30 – 14:45	Discussion	All	Dr Joel Nobert
14:45 – 15:15	DRC Presentation	Prof Christian Ndolwa Katwika & Mr Adelino Meli	Dr Joel Nobert
15:15 – 15:30	Discussion	All	Dr Joel Nobert
15:30 – 15:45	TEA/COFFEE BREAK		
15:45 – 16:15	Mauritius Presentation	Ms Yashwaree Moonshiram & Prof R. Thanika D. Juwaheer	Dr Joel Nobert
16:15 – 16:45	Discussion	All	Dr Joel Nobert
16:45 – 17:15	Mozambique Presentation	Prof Firmino Mucavele and Prof Denis Juizo	Dr Joel Nobert
17:15 – 17:30	Discussion		Dr Joel Nobert
Day 2: 20 March 2015			
08:30 – 09:00	Discussion of emerging issues from all the presentations	All	Krasposy Kujinga
09:00 – 10:30	French and Portuguese group work on way forward e.g.: <ul style="list-style-type: none"> • Translation of material • Hosting the programme • Specialisation/s • WaterNet and English co-host assistance required University regulations	Group Work	Krasposy Kujinga
10:30 – 11:00	TEA/COFFEE BREAK		
11:00 – 11:30	French Presentation		Krasposy Kujinga
11:30 – 12:00	Portuguese Presentation		Krasposy Kujinga
12:00 – 12:30	General Discussion	All	Krasposy Kujinga
12:30 – 13:00	Next steps and closing	Dr Jean-Marie Kileshye Onema	Krasposy Kujinga
13:00	CLOSING AND LUNCH		

ASSOCIATION FRANCOPHONE DE GÉOGRAPHIE PHYSIQUE



Liège, le 18-04-2016

Invitation au Colloque de l'Association francophone de Géographie physique.

« La géographie physique et les risques de pertes et préjudices liés aux changements climatiques »

Par la présente, j'ai l'honneur d'inviter le Dr. Aurélien Mandimbiharison de l'Université d'Antananarivo- au colloque de l'AFGP qui se tiendra en Sardaigne à Castelsardo du 19 au 21 mai 2016.

Il y présentera une communication :

« Evolution du trait de côte de la partie ouest de Madagascar »

Ses frais de transport et de logement sur place seront pris en charge par une bourse de l'AUF.

Pour servir à qui de droit,

Prof. André OZER (Université de Liège)

Co-Président du comité d'organisation du 3^{ème} colloque de l'AFGP

UNIVERSITÉ DE LIÈGE
DEPARTEMENT DE GÉOGRAPHIE
UNITÉ DE GÉOGRAPHIE PHYSIQUE ET QUATERNAIRE
QUARTIER VILLAGE 4
CLOS MERCATOR, 3 - BÂTIMENT B1
B-4000 LIÈGE (Sart-Tilman)
Parking 12 & 13 - Tél: +32 4 366 54 78 & +32 4 366 54 79

ARRETE N° 169/16/UA/PR/VPRP/DRH

Portant nomination des Membres du Conseil d'Etablissement au sein du Domaine « Sciences de l'Ingénieur » (E:SPA) de l'Université d'Antananarivo.

LE PRESIDENT DE L'UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

- Vu la Constitution ;
- Vu la Loi n° 2004-004 du 26 Juillet 2004 modifiée par la Loi n° 2008-011 du 17 Juillet 2008 portant orientation générale du Système d'Education, d'Enseignement et de Formation à Madagascar ;
- Vu l'Ordonnance n° 92-030 du 17 Juillet 1992 portant création des Universités ;
- Vu le Décret n° 2002-565 du 04 Juillet 2002 modifié par les Décrets N° 2010-129 du 11 Mars 2010, n° 2012-688 du 10 Juillet 2012 et n° 2015/1510 du 09 Novembre 2015 fixant l'organisation et le fonctionnement des Universités et des Etablissements d'Enseignement Supérieur ;
- Vu le Décret n° 2016-093 du 10 Février 2016 portant nomination des Présidents des Universités ;
- Vu le Décret n° 2016-094 du 10 Février 2016 portant nomination des Doyens de Faculté et Directeurs d'Ecole à l'Université d'Antananarivo ;
- Vu l'Arrêté n° 10341/2016-MESupReS du 29 Avril 2016 portant nomination des Vice-Présidents de l'Université d'Antananarivo ;
- Vu l'Arrêté N°036/16/UA/PR/VPRVU/DRH du 23 Mars 2016 portant nomination des Responsables de Mentions au sein du Domaine « Sciences de l'Ingénieur » (E:SPA) de l'Université d'Antananarivo ;
- Vu l'Arrêté N°168/16/UA/PR/VPRP/DRH du 07 Juillet 2016 portant nomination des Responsables de Mentions au sein du Domaine « Sciences de l'Ingénieur » (E:SPA) de l'Université d'Antananarivo ;
- Vu la Lettre N°033-E:SPA/AC/SP/16 en date du 08 Juin 2016 ;
- Vu la Lettre N° 032-E:SPA/AC/SP/16 en date du 08 Juin 2016 ;
- Vu les Notes de Présentation en date du 08 Juin 2016 ;
- Vu les résultats des élections en date du 22 Janvier 2016.

A R R E T E :

Article Premier. - Sont nommés pour une durée de 3 ans, Membres du Conseil d'Etablissement au sein du Domaine « Sciences de l'Ingénieur » (E:SPA) :

Représentants du Personnel Enseignant :

- Professeur RANDRIANJA Roger, IM. 224 109, Professeur Titulaire ;
- Professeur ANDRIANARY Philippe Antoine, IM. 253 162, Professeur Titulaire ;
- Professeur ANDRIANAIVO Lala, IM. 292 347, Professeur ;
- Professeur RABARIMANANA Mamy Herisoa, IM. 311 761, Professeur ;
- Docteur RANDRIANTSIMBAZAFY Andrianirina, IM. 224 111, Maître de Conférences ;
- Docteur RANDRIANA Nambinina Richard Fortuné, IM. 245 133, Maître de Conférences ;
- Docteur MANDIMBIARISON Aurélien Jacques, IM. 289 963, Maître de Conférences ;
- Docteur RANAIVOSON Léon Félix, IM. 206 484, Maître de Conférences ;
- Docteur RANDRIANARIVelo Frédéric, IM. 200 509, Maître de Conférences ;
- Docteur RAMAROZATOVO ANDRIANTSARATANY Vonjy Fanomezana, IM. 343 712, Maître de Conférences ;
- Docteur RAMANARIVO Solofomampionona, IM. 200 822, Maître de Conférences ;
- Docteur RAKOTOMALALA Mamy Alain, IM. 327 205, Maître de Conférences ;
- Docteur RAKOTOSAONA Rijalalaina, IM. 311 767, Maître de Conférences ;
- Monsieur RAMELINA Lala Arimonjy, IM. 250 574, Assistant d'Enseignement Supérieur ;
- Docteur RAMBININTSOA Tahina Michel, IM. 352 407, Maître de Conférences ;
- Mademoiselle RAKOTOMANANA Dina Arisoa, IM. 348 724, Assistant d'Enseignement Supérieur ;
- Monsieur ANDRIAMANANTSOA Guy Danielson, IM. 349 938, Assistant d'Enseignement Supérieur ;

Représentants des Personnalités Extérieures :

- Monsieur RABENANAHARY Mamy, Président de l'Ordre des Ingénieurs.
- Monsieur RANDRIAHERINDRAINY Selmer, Institut Supérieur de Technologie.

Représentants du Personnel Administratif et Technique :

- Monsieur RAZAFIMANDIMBY Joël Patrique, IM. 296 152, Assistant de Service.
- Monsieur ANDRIAMIRAHIO Solofomanana Mamy Nirina, IM. 240 654, Assistant de Service.

Représentants des Etudiants :

- Monsieur RAKOTONDRAIBE Harison Sammy Nirina, Président.
- Monsieur RANDRIANOMANANA Setra Arinesa, Vice Président.

Article 2. - Toutes dispositions contraires au présent arrêté sont et demeurent abrogées.

Article 3. - Le présent arrêté sera enregistré et communiqué partout où besoin sera./-

Fait à Antananarivo, le 07 Juillet 2016

Signé : Le Président de l'Université d'Antananarivo

Panja RAMANOELINA
Professeur Titulaire

POUR AMPLIATION CONFORME

