

UNIVERSITE D'ANTANANARIVO FACULTE DES SCIENCES

_ _ _ _ _ _ _ _ _ _ _



DEPARTEMENT DE PALEONTOLOGIE et D'ANTHROPOLOGIE BIOLOGIQUE

Mémoire pour l'obtention du

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES en Sciences de la Terre et de l'Evolution

Option : Paléontologie et Evolution Biologique

Sous-option : Paléontologie et Biostratigraphie

Taphonomie du site *Rapetosaurus krausei* de la région de Berivotra (Bassin de Mahajanga)

Présenté par :

ANDRIANJAFISOA Maminiaina Rodin

Soutenu publiquement le : 14 Novembre 2013

Président	: RASOAMIARAMANANA Armand, Maître de Conférences
Rapporteur	: RAHANTARISOA Lydia, Maître de Conférences
Examinateurs	: ANDRIAMIALISON Haingoson, Maître de Conférences
	RAKOTONDRAZAFY Toussaint, Maître de Conférences



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO FACULTE DES SCIENCES



DEPARTEMENT DE PALEONTOLOGIE et D'ANTHROPOLOGIE BIOLOGIQUE

Mémoire pour l'obtention du

DIPLOME D'ETUDES APPROFONDIES en Sciences de la Terre et de l'Evolution

Option : Paléontologie et Evolution Biologique

Sous-option : Paléontologie et Biostratigraphie

Taphonomie du site *Rapetosaurus krausei* de la région de Berivotra (Bassin de Mahajanga)

Présenté par :

ANDRIANJAFISOA Maminiaina Rodin

Soutenu publiquement le : 14 Novembre 2013

Président	: RASOAMIARAMANANA Armand, Maître de Conférences
Rapporteur	: RAHANTARISOA Lydia, Maître de Conférences
Examinateurs	: ANDRIAMIALISON Haingoson, Maître de Conférences
	RAKOTONDRAZAFY Toussaint, Maître de Conférences

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier particulièrement :

Monsieur Marson RAHERIMANDIMBY, Professeur titulaire, Doyen de la Faculté des Sciences qui m'a accordé la présentation de ce mémoire.

Monsieur Amos Fety Michel RAKOTONDRAZAFY, Professeur titulaire, Responsable de la Formation Doctorale en Sciences de la Terre et de l'Evolution, ayant accordé la soutenance de ce mémoire.

Monsieur Raymond RAKOTONDRAZAFY, Professeur, Responsable de la Formation en Troisième Cycle en Sciences de la Terre et de l'Evolution ayant accordé la présentation de ce mémoire.

Monsieur Haingoson ANDRIAMIALISON, Maître de Conférences, Chef du Département de Paléontologie et d'Anthropologie Biologique pour sa générosité pour toutes les autorisations nécessaires dans la réalisation de ce mémoire et ses conseils.

Monsieur Armand RASOAMIARAMANANA, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire de Paléontologie et de Biostratigraphie, avide de perfection et jamais avare de conseils, toujours souriant, il m'a aidé sans exigences pour réaliser ce mémoire. Il me fait l'honneur, aujourd'hui, de présider le jury.

Monsieur Toussaint RAKOTONDRAZAFY, Maître de Conférences, pour sa bonne humeur et critiques qui m'ont permis d'avancer.

Madame Lydia RAHANTARISOA, Maître de Conférences, Encadreur scientifique et rapporteur ; ses enseignements, ses conseils pratiques et techniques, son support inestimable durant mes études m'ont été d'une aide insoupçonnée. Elle a suivi mon travail avec attention depuis le début et m'a prodigué toutes les recommandations et critiques indispensables pour mon travail. Je lui en suis profondément reconnaissant.

Monsieur David W. KRAUSE, Professeur et ses collaborateurs de l'Université de Stony Brook (U.S.A), qui nous a facilité le travail et la récolte des échantillons sur terrain. Madame Geneviève RAMAKAVELO, Maître de Conférences, Directeur du Laboratoire de Micropaléontologie et de Paléobotanique, ayant accepté sans conditions l'usage de son laboratoire pour l'étude et le lavage des sédiments, je lui tiens ici mes sincères remerciements.

Monsieur Ravalomanda Dolardwl ANDRIAMANDIMBISON, Assistant d'ESR, pour son aide précieuse qui m'a permis de mieux maitriser les techniques et matériels de laboratoire pour les études géologiques.

Je voudrais aussi exprimer mes vifs remerciements :

- A tous les enseignants, le personnel administratif et technique au sein du DPAB, qui m'ont accompagné durant mes études au sein du Département.
- Au Département de la géologie qui m'a autorisé à leurs matériels me permettent ainsi d'effectuer l'ensemble de mes analyses granulométriques.
- Je remercie également tous les étudiants du troisième cycle du DPAB, qui m'ont aidé et soutenu dans la réalisation de ce travail.

Et finalement, je tiens à remercier toute ma famille, qui m'a soutenu durant toutes ces années.

: ANDRIANJAFISOA
: Maminiaina Rodin
: mamrodin@ymail.com
: Taphonomie du site <i>Rapetosaurus krausei</i> de la région de Berivotra
(Bassin de Mahajanga)
: Dr. RAHANTARISOA Lydia.

Résumé

La sédimentologie appliquée à l'étude taphonomique des Sauropodes de la région de Berivotra dans le Bassin de Mahajanga a permis de mieux comprendre les processus qui ont abouti à la formation des gisements fossilifères. L'abondance de Vertébrés fossiles dans le Faciès 2 (constitué par des grès argileux) du Membre Anembalemba (Formation de Maevarano), surtout de Dinosaures, bien conservés explique l'environnement du milieu. Les résultats montrent que les ossements de Dinosaures sont autochtones au départ, puis une grande inondation est venue et ces restes ostéologiques ont subi un léger déplacement après la mort jusqu'à leur fossilisation c'est-à-dire allochtones ou parautochtones. L'analyse morphoscopique des sables confirme la présence du transport marquée par l'abondance des grains de quartz sub-arrondis, et l'aspect luisant montre le transport par l'eau. Du point de vue paléoécologique, l'étude taphonomique des Dinosaures Sauropodes évoque une grande inondation qui a affecté le Bassin de Mahajanga au Crétacé Supérieur. A cette

Mots clés : Taphonomie – Sédimentologie –Paléoenvironnement – Berivotra – Membre Anembalemba.

époque le climat était subtropical c'est-à-dire ni trop chaud ni trop humide.

Abstract

Sedimentology applied to the Sauropods taphonomic study of Berivotra Region in Mahajanga Basin has led to a better understanding of the processes that led to the formation of fossil deposits. The abundance of Vertebrate fossils in Facies2 (consisting of clay-sandstone) of Anembalemba Member (Maevarano Formation), especially Dinosaurs, well preserved due the workplace environment.

The results show that dinosaur's bones are initially autochthonous; followed by a great flooder the osteological remains have undergone a slight shift after death until fossilization is to say a allochthonous or parautochthonous. The morphoscopic analysis confirms the presence of sand marking transport abundance of sub-rounded grains and shiny appearance shows the water transport.

The paleoecological perspective, the taphonomic study of Sauropods dinosaurs suggests a great flood that affecting the Mahajanga Basin during Late Cretaceous. At this time the climate was subtropical it is neither too hot nor too humid.

Keywords: Taphonomy – Sedimentology – Paleoenvironment – Berivotra – Anembalemba Member.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	
Résumé	
Abstract	
PREMIERE PARTIE :	. 1
I. INTRODUCTION	. 1
II.GENERALITES	. 3
II.1. Historique des travaux antérieurs	. 3
II.2. Contexte général	.4
II.2.1. Cadre géographique et traits physiques généraux	.4
II.2.2. Cadre géologique	. 6
II.2.2.1. Bassin de Mahajanga	. 6
II.2.2.2. Le Campanien du Bassin de Mahajanga	. 7
II.2.2.3. La Formation de Maevarano de la région de Berivotra	. 8
a. Le membre Masorobe	.9
b. Le membre Anembalembe	. 10
c. Le membre Miadana	. 11
II.2.2.4. Le Maastrichtien et la Formation de Berivotra	. 11
DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES	. 14
I. METHODES SUR TERRAINS ET EN LABORATOIRE	. 14
I.1. Localisation de la zone d'étude	. 14
I.2. Matériels	. 15
I.3. Méthodologie	. 16
I.4. Lithologie	. 17
I.5. Etats des ossements	. 17
II. DEMARCHE ADOPTEE	. 17
II.1. Prospection	. 17
II.2. Délimitation de la carrière	. 17
II.3. Carroyage	. 17
II.4. Fouille	. 18
II.5 Catalogage	. 18
II.6. Prélèvement des échantillons fossiles	. 18
II.7. Classement des fossiles	. 19
II.6. Prélèvements des échantillons sédimentologiques	. 19
III. TRAITEMENT EN LABORATOIRE	. 19
III.1. Etude granulométrique	. 20
III.1.1. Définition	. 20
III.1.2. Matériels utilisés	. 20
III.1.3. Caractérisation des sédiments	. 21
III.2. Calcul des paramètres granulométriques	. 22
III.2.1. La methode des quartiles III.2.2. Coefficient de mauvais triage So	. 22 22
III.2.2. Coefficient d'asymétrie A	. 23 21
m.2.5. Le coemetent à asymetrie A	. 44

III.3. Le tamisage de sables	24
III.4. Etude morphoscopique	25
III.5. Etude minéralogique	28
TROISIEME PARTIE : RESULTATS	29
I. COUPE	29
II. GRANULOMETRIE	30
III. MORPHOSCOPIE	33
IV. MINERALOGIE	35
V. ETUDE TAPHONOMIQUE	36
V.1. Restes d'ossements de Vertébrés	36
V.2. Etat de conservation	36
V.3. Abondance des fossiles dans le site	36
V.4. Couleur	37
V.5. Orientation des fossiles	38
V.6. Déformations des fossiles	40
QUATRIEME PARTIE : INTERPRETATIONS	41
I. INTERPRETATIONS SEDIMENTOLOGIQUES	41
I.1. Etude sédimentologique	41
I.1.1. Etude granulométrique	41
I.1.1.1. Courbes de fréquences simples	41
I.1.1.2. Courbes cumulatives	41
I.1.1.3. Les indices granulométriques	42
I.2. Morphoscopie	42
I.3. Minéralogie	43
I.4. Conclusion partielle	43
II. CARACTRISTIQUE TAPHONOMIQUE	44
II.1. Taphonomie	44
II.2. Taille des restes	44
II.3. Abondance des fossiles dans le gisement	45
II.4. Corrélation entre sédimentologie et restes d'ossement	46
II.5. Orientation des fossiles	46
II.6. Emplacement des fossiles	47
II.7. Mécanisme de fossilisation et de formation du gisement	47
II.7.1. Echanges internes et circonstances agissants sur eux	48
II.7.2. Echanges externes ou Diagenèses	48
II.7.3. Déformations des couches	48
II.7.4. Déformations des fossiles	49
III. PALEOENVIRONNEMENT	51
CINQUIEME PARTIE : CONCLUSION	52
CONCLUSION	52
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	53
ANNEXE: Résultats des analyses granulométriques des échantillons prélevés sur le site	57
PLANCHES : Illustration des ossements du Rapetosaurus krausei	58

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Classification de Wenthworth	. 20
Tableau 2 : Classification des faciès sédimentaires en fonction du Sorting index selon la	
méthode Ward et Folk (1957)	. 23
Tableau 3 : Tableau des divers indices de caractérisation des sédiments	. 31
Tableau 4 : Morphoscopie des grains du quartz dans les niveaux N1 à N9	. 34
Tableau 5 : Catalogage des fossiles rencontrés dans le site étudié	. 39

LISTE DES FIGURES

Figure 1 : Carte géologique du Bassin de Mahajanga (Besairie, 1976)	. 5
Figure 2 : Stratigraphie du Crétacé Supérieur d'après Rogers et.al, 2007	. 8
Figure 3 : le membre Masorobe (Rogers et al, 2000)	. 9
Figure 4 : le membre Anembalemba (Rogers.et al, 2000)	. 10
Figure 5 : le membre Miadana (Rogers. et al, 2000)	. 12
Figure 6 : Vue d'ensemble de la Formation de Maevarno (membres Masorobe et	
Anembalemba)	. 12
Figure 7 : Corrélation entre les différents membres de la Formation de Maevarano de	
Berivotra (Rogers et al, 2000)	. 13
Figure 8 : Zone d'étude	. 14
Figure 9 : Organigramme de l'étude	. 16
Figure 10 : Carroyage du site d'étude	. 18
Figure 11 : Séries de tamis	. 21
Figure 12 : Balance électrique Mettler	21
Figure 13 : Tamiseuse électrique	21
Figure 14 : Microscope numérique USB VEHO VMS-001	. 21
Figure 15 : Exemples des courbes d'étalement positif et/ou négatif d'après Skewness	. 22
Figure 16 : Charte visuelle permettant l'estimation de la sphéricité et de l'émoussé des	
graviers et des sables, selon Powers, 1953	. 26
Figure 17 : Profil géologique au niveau du site de Sauropode	. 29
Figure 18 : Coupe lithologique du site de Sauropode	. 30
Figure 19 : Courbes de fréquences simples des niveaux 1 à 5	. 31
Figure 20 : Courbes de fréquences simples des niveaux 6 à 9	. 32
Figure 21 : Courbes de fréquences cumulées des niveaux 1 à 5	. 32
Figure 22 : Courbes de fréquences cumulées des niveaux 6 à 9	. 33
Figure 23 : Différentes formes des grains du quartz dans les niveaux N1 à N9	. 34
Figure 24 : Proportion des formes de quartz dans les niveaux N1 à N9	. 35
Figure 25 : Restes d'ossements de Dinosaures	. 36
Figure 26 : Reconstitution de squelette monté du <i>Rapetosaurus krausei</i> , vue latérale gauche	
(Curry Rogers & Forster, 2006)	. 36
Figure 27 : Ossements du membre supérieur de Dinosaures	. 37
Figure 28 : Répartition et orientation des ossements sur le site étudié.	. 38
Figure 29 : Fémur du Rapetosaurus krausei	. 49
Figure 30 : Marque sur la surface d'ossement	. 50
Figure 31 : Ceinture pectorale du Rapetosaurus krausei	. 58
Figure 32 : Ceinture pelvienne du Rapetosaurus krausei	. 58
Figure 33 : Radius et des côtes du Rapetosaurus krausei	. 58
Figure 34 : Vertèbre cervicale et partie de la ceinture pelvienne du Rapetosaurus krausei	. 58
Figure 35 : Carpe du Rapetosaurus krausei	. 59
Figure 36 : Vertèbre cervicale du Rapetosaurus krausei	. 59
Figure 37 : Radius, côtes et vertèbre cervicale Rapetosaurus krausei	. 59.

SYMBOLES ET ABREVIATIONS UTILES

DPAB	: Département de Paléontologie et d'Anthropologie Biologique		
P K	: Point Kilométrique		
RN	: Route Nationale		
GPS	: Global Positioning System		
HCl	: Acide Chlorhydrique		
MA	: Million d'Années		
NW	: Nord Ouest		
SE	: Sud Est		
NNE	: Nord Nord Est		
SE	: Sud Est		
SSE	: Sud Sud Est		
Alt	: Altitude		

GENERALITES

PREMIERE PARTIE :

I. INTRODUCTION

La région de Berivotra (Bassin de Mahajanga) constitue une zone d'étude très intéressante pour des recherches Scientifiques. Depuis 1993, des études paléontologiques et stratigraphiques ont été effectuées dans cette zone grâce au protocole d'accord entre l'Université de Stony Brook d'une part et l'Université d'Antananarivo, Département de Paléontologie et d'Anthropologie Biologique d'autre part. De nombreux fossiles d'Invertébrés et de Vertébrés ont été découverts, où les fossiles de Dinosaures prennent une place importante.

De tels assemblages fossiles sont fréquemment rencontrés dans la Formation de Maevarano (Campanien) de Berivotra et sont régulièrement étudiés du point de vue taphonomique et paléoécologique.

But et objectifs :

Dans ce travail, nous essayons d'étudier la taphonomie des Dinosaures Sauropodes près du PK 520 de la route nationale RN4

La taphonomie est la discipline de la paléontologie qui étudie tous les processus qui interviennent après la mort d'un organisme jusqu'à sa fossilisation ainsi que la formation des gisements fossilifères.

L'analyse sédimentologique et taphonomique des principaux niveaux a pour but de mieux cerner les modalités de formation de telles couches :

- Caractérisations lithologiques
- Conditions et milieux de dépôts
- Estimation de l'allochtonie.

Résultats attendus

L'approche taphonomique et l'approche paléoécologique des Dinosaures Sauropodes aboutiront à des considérations environnementales et paléogéographiques régionales visant à définir la variété des milieux rencontrés.

Dans cette étude, l'analyse de ces bioaccumulations fournit généralement de précieuses données pour la reconstitution paléoenvironnementale.

II. GENERALITES

II.1. Historique des travaux antérieurs

Les gisements fossilifères de Berivotra sont parmi les plus riches en Vertébrés terrestres et aquatiques, d'où des nombreux chercheurs se sont intéressés à cette région :

- En 1954, René l'Avocat a confirmé que le gisement de Dinosaures est localisé dans le Crétacé Supérieur.
- En 1961, Lehmann dans sa recherche a déduit la présence d'une relation anatomique entre les Dinosaures Sauropodes de Madagascar, de l'Afrique orientale et de l'Amérique du Sud, (Gondwana).
- Les études géologiques réalisées en 1972 par Bésairie ont montré que le Crétacé est représenté par la succession des formations sédimentaires tant marines que continentales.
- En 1991, Ravoavy a fait une étude des Vertébrés fossiles du Crétacé Supérieur continental de la région de Berivotra (fouille 1987-1989).
- Depuis 1993, une reprise de recherches effectuées par les Chercheurs de l'Université de Stony Brook et de l'Université d'Antananarivo du Département de Paléontologie et d'Anthropologie Biologique dans cette région a apporté un nouvel élan sur les études des Vertébrés fossiles de Madagascar.
- Krause et al, (1993, 1996, 1997,2003, 2006, 2007,2010) ont mené des fouilles suivies d'études de Vertébrés tels que : Dinosaures, Tortues, Amphibiens, Crocodiles, Serpents, Oiseaux et de Mammifères de Berivotra.
- Rogers et al, (1997, 1998, 2000, 2003,2005) ont fait des études sédimentologiques et paléoécologiques du Crétacé Supérieur de la Formation de Maevarano (Campanien).
- En 2008, Ratsimbaholison a étudié l'ontogénie crâniofaciale de l'espèce Majungasaurus crenatissimus. Théropode Abelisauridé du Crétacé Supérieur de Berivotra.
- Rabenorosoa, (2009) a fait l'étude de la taphonomie et de la sédimentologie des Vertébrés du site MAD 05-42 de Berivotra.

Le Crétacé Supérieur (Campanien) de la région de Berivotra constitue une zone de recherche intéressante pour l'étude des fossiles de Dinosaures grâce à leur état de conservation et leur abondance dans les sédiments.

II.2. Contexte général

II.2.1. Cadre géographique et traits physiques généraux

Le Bassin de Mahajanga est situé sur la côte Nord-Ouest de Madagascar. Il est limité au Nord par la presqu'île d'Ampasindava et au Sud par l'anticlinal du Cap Saint-André (Bésairie 1972).

Les limites internes du Bassin de Mahajanga sont parfois soulignées par une falaise bordière des hauts-plateaux du socle cristallin dans les zones des plateaux du Kamoro et du Nord de Tsaratanàna.

Il est constitué par une succession de formations monoclinales en auréoles concaves vers la mer, s'étendant du Karoo à l'actuel.

Les bandes de plateaux forment des cuestas, dont les plus marqués sont :

- dans les plaines alluviales, une importante carapace sableuse produite par l'altération des différentes formations, adoucit les petits reliefs.
- dans la partie Sud du Bassin, les cuestas sont composées par les formations du Lias Supérieur, le Bajocien, les grès continentaux (Crétacé moyen), les coulées basaltiques du Turonien et enfin le talus maastrichtien.

La zone littorale allant du Crétacé Supérieur au Miocène est découpée par de nombreuses baies dont celles de Baly, de Bombetoka, de Mahajamba et de Narinda. Ces baies constituent respectivement les estuaires des grands fleuves tels que la Mahavavy, la Betsiboka, la Mahajamba et la Sofia, (Rafara., 1987).



Légende :



Dunes anciennes

opo Pliocène continental

e

e

c¹⁰

Eocène : Calcaire

Calcaires, dolomies

Paléocène : Marne à

Paléocène :

Echinides

Nummulites, Echinides





Crétacé Supérieur



Campanien marin

cC⁸



Maevarano, continental à Dinosaures



Marovoay continental à Mégalosaures

Figure 1 : Carte géologique du Bassin de Mahajanga (Bésairie, 1976).



II.2.2. Cadre géologique

II.2.2.1. Bassin de Mahajanga

Le Bassin de Mahajanga est constitué par des couches monoclinales à faible pendage incliné vers le Nord à Nord-Ouest. Ces couches sont déformées dans sa partie Ouest par un bombement transversal SSE-NNW de la dorsale du Cap Saint-André dont l'axe cristallin représenté par les dômes de Bekodoka et d'Ambohipaky, individualise ce bassin de celui de Bassin de Morondava. Il est interrompu au Nord-Est par l'anticlinal de la presqu'île d'Ampasindava.

Les formations sédimentaires débutent principalement par le grès de l'Isalo, car le groupe de la Sakamena n'apparait que très localement dans des compartiments faillés. Au Nord du Bassin, ce groupe apparait en affleurement, surtout dans les fossés tectoniques, (Hindermeyer, 1959).

Les principales structures visibles en surface sont :

- un système de failles bordières longitudinales SSW-NNE, parallèles à l'allongement du monoclinal. Ces failles sont régulièrement subsidentes et localisées dans la série anté-Crétacée.
- quelques failles transversales dont les plus marquées sont celles de l'Ihopy enracinées sur le dôme cristallin de Bekodoka et de Mitsinjo. La grande flexure côtière, rejoint la faille d'Ambohipaky et la faille de Mahazoma de direction Est-Ouest.
- un fossé d'effondrement du socle entre le Kamoro et la Sofia allongé SSW-NNE, parallèlement à la direction des couches sédimentaires, dans la zone de bordure interne du Bassin.

Les principaux mouvements orogéniques dans ce Bassin sont:

 un mouvement post-triasique inférieur et Sakamena sont mis en évidence par la discontinuité des sédimentations, sur le Permo-Trias dans l'extrême Nord du Bassin. un mouvement cénomanien est mis en évidence par cartographique des grès supérieurs continentaux sur les formations sous-jacentes dans la partie Ouest (Kelifely et Namoroka) du Bassin.

II.2.2.2. Le Campanien du Bassin de Mahajanga

Le Campanien est appelé [«] Série de Maevarano [»] par Bésairie, 1972. Il est localisé entre les fleuves Mahajamba et Betsiboka. Les dépôts sont continentaux, d'épaisseur de 500m. Ils sont constitués par des grès fins à grossiers, surmontés par, des grès argileux et des niveaux de grès à stratifications obliques. Guénot, 1965 y distingue trois séries :

- la série inférieure, épaisse de 200m, qui affleure dans les cuestas, comporte une alternance de grès argileux avec quelques nodules calcaires, de grès à stratifications obliques et des lentilles d'argiles sableuses,
- la série moyenne, épaisse de 200m, constituée de grès feldspathiques avec quelques intercalations de bancs de grès carbonatés,
- la série supérieure, de 100m d'épaisseur, formée de grès à stratifications obliques et de grès argileux.

La série de Maevarano varie d'un secteur à l'autre :

- Entre Mahajamba et Betsiboka : la Série de Maevarano épaisse de 370m, débute par une cuesta. Sa limite supérieure est marquée par le contact avec les marnes maastrichtiennes. La partie inférieure, de 270m d'épaisseur, est formée d'une alternance de grès sableux blancs ou bariolés, feldspathiques, argileux, à grains fins à moyens, et d'argiles grises. L'ensemble est stratifié. Quelques restes d'ossements de Vertébrés et de rares bois silicifiés y ont été retrouvés. La partie supérieure, 100m d'épaisseur, constituée de grès argileux, est riche en niveaux carbonatés.

- Entre Betsiboka et Soalala : la Série de Maevarano transgresse sur les basaltes. Dans la [«] Série de Mitsinjo[»], cette formation, d'une épaisseur d'environ 150 m, diminue vers l'Ouest pour s'amenuiser dans la région de Soalala. Des restes de Vertébrés ont été trouvés près d'Anaboringa sur la Mahavavy et à la base de la falaise d'Ampandrabe. La limite supérieure correspondant au contact des grès continentaux avec les marnes transgressives du Maastrichtien inferieur.

II.2.2.3. La Formation de Maevarano de la région de Berivotra

Le Campanien correspond également à la Série de Maevarano (Bésairie, 1972) rebaptisée Formation de Maevarano par R. Rogers en 1997. Il fait l'objet d'études au voisinage du village de Berivotra.

Dans le Bassin de Mahajanga, l'affleurement de la Formation de Maevarano recouvre généralement la région de Berivotra. Elle est bien exposée dans ce secteur, surtout près du village de Berivotra où ses affleurements ont été mis en mur brutalement par l'érosion.

Une révision stratigraphique réalisée par Rogers et al, 2000 a permis de subdiviser la Formation de Maevarano (Figure 2) en trois unités ou membres qui sont de bas en haut :

- Masorobe
- Anembalemba
- Miadana.



Figure 2 : Stratigraphie du Crétacé Supérieur d'après Rogers et.al, 2007

a. Le membre Masorobe

Le secteur de Masorobe se situe aux alentours de Berivotra. Dans la coupe type, les coordonnées géographiques sont : S : 15°53'34.8" et E : 46°36'15.4". Ce membre a une épaisseur de 80m, est considéré comme la base de la Formation de Maevarano. Le membre Masorobe est caractérisé par une coloration rouge. Il est constitué de grès grossiers, occasionnellement intercalés par des grès fins, de grès silteux et des argiles indurées. Il est peu fossilifère dans la région de Berivotra, dû à de mauvaises conditions de préservation.

Le contact basal avec la partie sous-jacente est difficile à déterminer, tandis que le contact avec la partie supérieure est caractérisé par la pétrographique. Elle est mise en évidence par le changement des conditions de milieux : la présence de grès fins à grossiers de couleur rouge (riche en feldspath) dans la couche inférieure et des grès grossiers de couleur vert-olive (riche en argile) dans la partie sus-jacente.



Coordonnées géographiques : S : 15°53'34.8" et E : 46°36'15.4" Figure 3: le membre Masorobe (Rogers et al, 2000)

b. Le membre Anembalemba

Dans la localité type (Est du village de Berivotra), ses coordonnées géographiques sont : S : 15°54'14.2" et E : 46°35'45.6". Le membre Anembalemba a une épaisseur de 12m, celle-ci est de 10 à 15m dans la région de Berivotra. Il est caractérisé par deux faciès bien distincts : Faciès 1 et Faciès 2 (Rogers et al, 1997) qui sont, de bas en haut :

- Faciès 1, constitué par des grès à grains fins à grossiers de couleurs blanches et à stratifications obliques. Les composants sont pauvres en grès argileux. Dans ce faciès les fossiles sont rares, il ne contient que des dents et des ossements isolés.
- Faciès 2, formé par des argiles gréseuses à grains fins et à grains grossiers de couleur vert-olive. En général, il présente une structure massive. Les structures des charges sont relativement normales. L'épaisseur des couches varient d'un affleurement à l'autre. Il est riche en fossiles.



Coordonnées géographiques : S : 15°54'14.2" et E : 46°35'45.6" Figure 4 : le membre Anembalemba (Rogers et al, 2000)

Les Vertébrés fossiles sont très abondants dans le membre Anembalemba tels que : (Krause et al., 1994, 1996, 1998,2000, 2007) :

- des Serpents (Madsoia madagascariensis, Madsoia cf M. laurasiae)
- des Crocodiles (Trematochampsa oblita, Araripesuchus sp., Mahajangasuchus insignis, Simosuchus clarki)

- des Dinosaures (Majungasaurus crenatissimus, Masiakasaurus knopfleri, Rapetosaurus krausei.)
- des Oiseaux (Rahonavis ostromi, Vorona berivotrensis),

L'analyse taphonomique (Rogers et al, 1997) a permis de constater que la majorité des fossiles sont concentrés dans le Faciès 2 du membre Anembalemba.

Le membre Anembalemba renferme une quantité importante de fossiles de Vertébrés, de rares Invertébrés fossiles : Lamellibranches et Gastéropodes (Krause & Hartman, 1996). Ce membre est une zone de transition entre formation marine et formation continentale.

c. Le membre Miadana

Le membre Miadana se situe à 4km au Sud-Est de la région de Berivotra sur des collines isolées, ses coordonnées géographiques sont S : $15^{\circ}56'16.2"$ et E : $46^{\circ}38'0.1"$. Il est épais de 24,5m. Le Membre est représenté par des grès hétérogènes, fins à grossiers, de couleur blanche et gris vert dont la base est de couleur rouge. Les couches d'argiles constituent plus de trente pour cent (30%) de la section. Les couches gréseuses sont à grains fins. L'ensemble est massif, la stratification oblique est rare.

Au-dessus de ce membre, on note la présence d'une mince couche (10cm environ) de grès conglomératiques et de dents de Requins cimentés par de la calcite. Enfin, il est surmonté d'une couche d'argile jaune olive qui correspond au début des dépôts de la Formation de Berivotra.

Le membre Miadana est caractéristique du secteur de Miadana. Il est peu fossilifère.

II.2.2.4. Le Maastrichtien et la Formation de Berivotra

La Formation de Berivotra est équivalente au "marnes Maastrichtiennes" de Bésairie (1938, 1972). Cette Formation est une variation latérale. Elle est formée par une d'argile vert olive (à la base), puis grès argileux et de marne. La Formation de Berivotra renferme une quantité importante des fossiles d'Invertébrés tels que : Brachiopodes, Echinides, Bivalves et Gastéropodes et rares des Vertébrés fossiles : Poissons, (Rogers et al., 2000).



Formation de Berivotra

Formation de Maevarano

Coordonnées géographiques : S : 15°56'16.2" et E : 46°38'0.1".

membre Anembalemba membre Māsorebe

Figure 5 : le membre Miadana (Rogers et al, 2000)

Formation de Maevarano

Figure 6 : Vue d'ensemble de la Formation de Maevarano (membres Masorobe et Anembalemba).



Figure 7: Corrélation entre les différents membres de la Formation de Maevarano de Berivotra (Rogers et al, 2000)

MATERIELS ET METHODES

DEUXIEME PARTIE : MATERIELS ET METHODES

I. METHODES SUR TERRAINS ET EN LABORATOIRE I.1. Localisation de la zone d'étude

La zone d'étude se situe à 50Km de l'entrée à la ville de Mahajanga, dans le Fokontany de Berivotra, traversée par la route RN4 au PK.520. (Figure 8)

Ses coordonnées géographiques sont :

S : 15°53'51.6" et

E:046°34'43.1".



Figure 8 : Zone d'étude

La Formation de Maevarano est constituée par la dominance de dépôt gréseux, elle est très riche en fossiles de Vertébrés surtout de Dinosauriens.

I.2. Matériels

- Carte géologique du Bassin de Mahajanga, feuille n°2, échelle : 1 /100.000
- Carnet de terrain pour noter les différentes observations sur terrain
- GPS (Global Positionning System) pour repérer les coordonnées géographiques du site étudié
- Pic pour creuser la carrière
- Marteau de géologue
- Pointes pour enlever la gangue
- Pinceaux pour brosser les ossements
- Colle pour consolider les ossements juste après leur exposition à l'air libre
- Appareil photo numérique
- Une Boussole pour avoir l'orientation des échantillons fossiles sur leur milieu de fossilisation
- Un mètre pour mesurer : la longueur, la largeur, la hauteur de l'affleurement et pour le carroyage
- Stylo marker
- Loupe pour observer les marques sur les ossements
- Papier pour emballer les spécimens
- Sacs à échantillons.

I.3.Méthodologie



Figure 9 : Organigramme de l'étude

I.4. Lithologie

Les dépôts sont essentiellement constitués par des grès-argileux à grains fins à grossiers de couleur gris verdâtre.

I.5. Etats des ossements

La plupart des ossements de Sauropodes fossiles rencontrés dans ce site sont conservés et friables. Tous les ossements sont de couleur brunâtre.

II. DEMARCHE ADOPTEE

II.1. Prospection

La prospection s'avère importante avant de passer à la fouille. La présence d'indices sur terrain tels que les débris des ossements intéressants (dents, vertèbres...), facilite le travail.

II.2. Délimitation de la carrière

Si on trouve des pièces ostéologiques intéressantes en surface ou vue en affleurement, il faut positionner cet ossement avec le GPS puis il faut délimiter la carrière en vue d'une excavation. Mais avant tout, il est indispensable de se débarrasser les sédiments superficiels plus récents; l'excavation se fait niveau par niveau avec précautions.

II.3. Carroyage

Le carroyage se fait à l'aide de piquets et de cordes (Figure 10), le carré de 1m de côté obtenu s'appelle « zone »; puis numéroter chaque carroyage pour repérer l'emplacement, la disposition et l'orientation de chaque fossile découvert. Dans chaque zone les horizons sédimentaires sont décapés les uns après les autres à l'aide d'une pointe et d'un pinceau

Le carroyage se fait à chaque niveau dégagé avec précautions, car il contribue à la réalisation d'une analyse taphonomique fiable.



Figure 10 : Carroyage du site d'étude

II.4. Fouille

La fouille se pratique de façon minutieuse pour éviter d'endommager les ossements. C'est l'étape la plus stricte et délicate pour dégager les fossiles. On utilise des marteaux, des pioches, des pics, des pinceaux et des balais.

Une fois exposés en surface, il est important de numéroter et de photographier tous les ossements afin d'établir les renseignements extrinsèques de chaque carroyage. Les marques laissées à la surface des ossements doivent être décrites en les observant à l'aide d'une loupe.

II.5. Catalogage

Pour éviter la confusion, la prise de photos en place et le catalogage des fossiles sont indispensables (classer, numéroter les ossements par ordre de découverte).

Il est utile aussi de faire une étude descriptive de chaque ossement, de mentionner la date de récupération, l'année de fouille et la code du terrain ou numéro du site. Ensuite, on procède au prélèvement des fossiles et des sédiments.

II.6. Prélèvement des échantillons fossiles

Les fossiles enfouis dans le sédiment sont dans un état de conservation fragile. Avant tout prélèvement, il est nécessaire de les consolider avec de la colle.

II.7. Classement des fossiles

L'étude morphologique des ossements est importante. Elle permet de connaître leur état de conservation.

Le classement adopté est le suivant :

- **bon** : la conservation est bonne c'est-à-dire l'ossement est complet
- assez bon : la conservation est assez bonne c'est-à-dire qu'une partie seulement de l'ossement est endommagée
- mauvais : débris d'ossements.

II.8. Prélèvements des échantillons sédimentologiques

Les sédiments ont été prélevés de bas en haut, à partir de N1, c'est-à-dire niveau de l'emplacement des restes ostéologiques jusqu'à 0,9m au niveau de la surface correspondant à N9.

Le prélèvement des échantillons (300g de sédiments) qui se fait tous les 10cm de profondeur ; les échantillons sédimentologiques sont numérotés de N1 à N9. Les sédiments sont placés immédiatement dans des sacs étiquetés.

La partie superficielle du sédiment est presque toujours altérée et contaminée par les couches en affleurements voisines. Nous avons prélevé à des profondeurs suffisantes pour obtenir des échantillons frais.

Un levé de coupe est nécessaire pour la datation et la compréhension de la succession des dépôts sédimentaires.

III. TRAITEMENT EN LABORATOIRE

Les sédiments récoltés sur terrain sont étudiés au laboratoire pour avoir plus d'informations sur la taphonomie de la zone étudiée.

Les analyses granulométriques et morphoscopiques permettent d'appliquer les notions relatives à l'altération, au transport et au dépôt des sédiments.

III.1. Etude granulométrique

III.1.1. Définition :

L'analyse granulométrique est l'ensemble des opérations permettant de déterminer la distribution des tailles des éléments composant les échantillons.

L'analyse granulométrique a pour objectifs de :

- mesurer la taille des particules élémentaires constituant les dépôts (sables, silt, etc.,...), (Tableau 1).
- définir la fréquence statistique des différentes tailles des grains dans le sédiment
- préciser les conditions dynamiques du dépôt et l'environnement au cours de laquelle la sédimentation a eu lieu.

Taille mm	Classe granulométrique	Pa	ticule		Sédiment		Roche sédimentaire
256		E	locs	A	mas de bl	ocs	
250 -	PUDITE	Galei	ts, Cailloux		Caillouti	6	Conglomérats
4 -	KODITE	Gr	aviers		Grave		
2 -		Gr	anules				Microconglomérats
			Très grossier				
	ARENITE	Grains	Grossier				
0,5 -		de roble	Moyen	1	Sable		Grès
0.250 -		adule	Fin	1			
0.125 -			Très fin]			
0,0625-	LUTITE	I			Gros	sier	Siltite
0.031 -				Boue			—Coupure hydrodynamique —
0.0156 -		Pou	ssières	Sill	Moyen	Limons = mélenge	5 S Délite
0.0150 -					Fin	silt moyen /îin + argile	Leure Leure
0.0039 -		Particu			Argile		Argilite

Tableau I : Classification de Wenthwor	au 1 : Classification de Wenthwo	orth
---	----------------------------------	------

III.1.2. Matériels utilisés

- Série de tamis de mailles décroissantes : 5mm à 0,063mm, dans le but de réaliser un classement des sédiments en fonction de la taille des particules, (Figure 11).
- Un mortier pour écraser les sédiments sans écraser les grains.
- Une balance électrique Mettler, (Figure 12).

- Sachets pour chaque fraction.
- Une machine à secousse de type AFNOR, (Figure 13).
- Une loupe binoculaire.
- Un microscope numérique USB VEHO VMS-001, (Figure 14).



Figures 11: Séries de tamis



Figure13 : Tamiseuse électrique



Figure 12 : Balance électrique Mettler



Figure 14 : Microscope numérique USB VEHO VMS-001

III.1.3. Caractérisation des sédiments

La caractérisation des sédiments se fait suivant les critères dimensionnels et les indices :

- le classement (Krumbein, 1936) permet de faire un tri sélectif des particules, dont les formes et tailles sont liées à l'hydrodynamisme.
- la symétrie (Skeweness ; Folk & Ward, 1957) est positive s'il y a prépondérance des éléments grossiers, négative s'il y a prépondérance des grains fins.



Figure 15 : Exemples des courbes d'étalement positif et/ou négatif d'après Skewness

III.2. Calcul des paramètres granulométriques

La méthode d'analyse granulométrique dépend de la nature des grains et de leur taille.

Les résultats de cette analyse granulométrique (voir Annexe) se présentent sous diverses courbes :

- courbes de fréquences simples
- courbes de fréquences cumulées.

Ces courbes permettent de déterminer des paramètres caractéristiques tels que :

- les modes pour les courbes de fréquences simples. Le mode est la dimension des grains correspondant au poids ou pourcentage maximum de tamisât obtenu.
- les quartiles pour les courbes de fréquences cumulées.

III.2.1. La méthode des quartiles

La médiane granulométrique et l'indice de Tri (Trask, 1932), sont déterminés graphiquement à partir des courbes cumulatives obtenues par les fréquences des différents poids de refus cumulés.

Trask a appliqué au sédiment " type sable " la méthode des quartiles

Nous avons travaillé avec des courbes progrades (éléments fins à gauche). La taille des vingt tamis est portée sur l'axe des abscisses et les pourcentages cumulés de différentes fractions sédimentaires sont portés sur l'axe des ordonnées.

 1^{e^r} quartile Q1= point de la courbe où 75% du matériel est de taille supérieure à celle de la taille considérée et 25% de la taille inférieure à cette taille considérée ;

 $2^{\text{ème}}$ quartile Q2 = correspond aussi au diamètre moyen du grain du sédiment. C'est la médiane granulométrique, point de la courbe où 50% du matériel est de taille supérieure à celle de la taille considérée et 50% de la taille inférieure à cette taille considérée ;

 $3^{\text{ème}}$ quartile Q3 = point de la courbe où 50% du matériel est de taille supérieure à celle de la taille considérée et 50% de la taille inférieure à cette taille considérée.

A partir des courbes cumulatives, on peut visualiser les résultats des quartiles et calculer les différents coefficients (A. Vatan, 1967) qui suivent :

III.2.2. Coefficient de mauvais triage So

Ce coefficient appelé Sorting index So ou Standard déviation par P.D Trask. Il exprime la constance ou l'irrégularité du niveau énergétique de l'agent de transport.

$$S_0$$
 = Indice de classement de Trask (1932) ou indice de tri (Sorting index).,
 $S_0 = \sqrt{\frac{Q_3}{Q_1}(mm)}$ apprécie le degré de classement du sédiment :

Valeur de l'indice So	Degré de classement
$S_0 \leq 1,0$	Sédiment très bien classé
$1,0 < S_0 \le 2,5$	Sédiment bien classé
$2,5 < S_0 \le 3,0$	Sédiment normalement classé
$3,0 < S_0 \le 4,0$	Sédiment mal classé
S ₀ > 4	Sédiment très mal classé

 Tableau 2: Classification des faciès sédimentaires en fonction du Sorting index selon

 la méthode Ward et Folk (1957).
III.2.3. Le coefficient d'asymétrie A.

$$A = \frac{Q_1 \ge Q_3}{Q_2^2}$$

Ce coefficient indique la symétrie par rapport à la médiane

- Si A = 1 : le mode coïncide avec la médiane, ce qui indique qu'on a un dépôt par excès de charge dû à la diminution de la compétence de l'agent de transport.
 - A > 1 : asymétrie positive, le classement est maximum du côté des particules fines ;
 c'est la caractéristique du dépôt en milieu calme.
 - A < 1 : asymétrie négative, le classement est maximum du côté grossier ; il s'agit d'un dépôt agité c'est-à-dire à forte énergie.

III.3. Le tamisage de sables

Les sédiments sont constitués de particules des tailles très diverses. Le tamisage de sédiments facilite l'estimation de leur granulométrie, selon les classements définis cidessus (Tableau 1, page 20), puis il faut peser les poids respectifs de chacune des classes.

A partir de ces données, on peut dresser un histogramme de la distribution par classe ou une courbe de fréquence cumulée.

Les étapes suivies pour chaque sédiment sont :

- Réduire les sédiments dans le mortier sans écraser les particules
- Peser 100 g d'échantillon sec
- Puis verser sur la colonne de Tamis (>5 ; 5 ; 2 ; 1.6 ; 1.25 ; 1 ; 0.8 ; 0.63, 0.5, 0.4, 0.315 ; 0.25 ; 0.2 ; 0.16 ; 0.125 ; 0.1 ; 0.08 ; 0.075 ; 0.063 et <0.063mm) de la série AFNOR.

Remarque : Le tamis est composé de trois séries dont l'ordre des ouvertures est décroissant :

- 5mm à 0,800mm (première série)
- 0,630mm à 0,200mm (deuxième série)
- 0,160mm à 0,063mm (troisième série).
- Passer au tamisage électrique (machine à secousse) de l'échantillon, pendant une durée de 15mn pour chaque série. Les refus successifs et l'ultime tamisât sont pesés sur une balance électrique de type Mettler ; le résultat attendu est le poids et non pas le nombre des grains de chaque classe dimensionnelle.
- Verser le tamisât recueilli sur la deuxième série de tamis inférieure et de même pour la troisième série de tamis.
- Enfin, on procède au pesage du tamisât de la dernière colonne de la troisième série de tamis (<0,063).

Pour chaque échantillon, l'opération dure environ 1h 30.

Le refus constitue la partie des grains retenus dans un tamis. Le refus cumulé représente tous les grains bloqués jusqu'au tamis considéré (les grains du tamis considéré avec les grains bloqués dans les tamis de mailles supérieures).

Le tamisât ou passant constitue la partie qui traverse le tamis. Les masses cumulées des différents refus sont exprimées en pourcentage par rapport à la masse initiale de l'échantillon du granulat.

III.4. Etude morphoscopique

Les études microscopiques et morphoscopiques consistent à identifier la nature, l'origine et le degré d'usure des particules sédimentaires.

Les sables placés dans un verre de montre, sont observés à la loupe binoculaire ou au microscope à faible grossissement. Puis, il est examiné au microscope numérique. Le comptage des grains a été effectué sur 100 grains environ.

La comparaison de sables avec la charte visuelle permet de connaître l'histoire des particules sédimentaires détritiques.

L'examen des grains de quartz sous la loupe binoculaire (de grandissement de 5 fois à 80 fois) et au microscope numérique, permet de déterminer la forme et l'aspect de la surface (exoscopie) afin de concevoir la nature de l'agent de transport jusqu'à leur évolution et d'observer les marques dues au transport, les traces du choc entre les grains et les signes de dissolution dus à l'altération.

La forme, l'état de la surface et le degré d'usure sont l'enregistrement de l'histoire du transport des sédiments.



Figure16 : Charte visuelle permettant l'estimation de la sphéricité et de l'émoussé des graviers et des sables. Selon Powers, 1953.

Ce classement tient compte de deux critères :

- la forme des grains c'est-à-dire l'étude morphoscopique
- leur aspect de surface concernant l'étude exoscopique.

On aboutit ainsi à quatre catégories principales de grains :

- les « Non-Usés » (dits « NU »)
- les « Emoussés-Luisants » (dits « EL »)
- les « Ronds-Mats Propres » (dits « RM »)
- les « Rond Mats Sals » (dits « RMS »)

• Les grains « Non-Usés »

Les grains « NU » se caractérisent par leur forme anguleuse, que les cristaux soient automorphes (c'est-à-dire bien formés), ou non. Les arêtes sont les parties saillantes des grains, c'est-à-dire que les grains ne présentent aucune trace de polissage ni d'arrondissement. Leur aspect de surface peut indifféremment être mât ou luisant. Ces grains caractérisent les arènes, les transports dans des cours d'eau douce sur de très faibles distances, les dépôts glaciaires, etc.

<u>Les grains</u> « Emoussés-Luisants »

Les « EL » présentent une dominance d'arêtes arrondies et peuvent parfois acquérir la forme de sphères presque parfaites. Leur aspect de surface est toujours très poli, brillant, luisant à la loupe binoculaire. Ils sont caractéristiques de longs transports en milieux aquatiques continentaux (rivières, fleuves), ou d'évolution en milieux marins (plateau continental, plages, etc.).

<u>Les grains</u> « Ronds-Mats propres»

Les « RM », comme leur nom l'indique, ont une morphologie générale sub-sphérique pouvant parfois atteindre celle d'une sphère parfaite. Leur aspect de surface est dépoli et mât. Ils sont caractéristiques d'une évolution en milieu éolien (transport par le vent), et essentiellement trouvés sur les dunes littorales et dans certains environnements désertiques.

Les grains « Rond-Mats Sales »

Les « RMS », ont une forme ovoïde ou moins arrondie. Leur aspect de surface est toujours dépoli et mât. Ils sont caractéristiques d'une évolution sur place et surtout dans les creux, les grains sont cimentés par des ciments ferrugineux ou quartzeux.

Par ailleurs, l'émoussé d'un grain est exprimé par un indice qui dépend de l'angularité plus ou importante de ces arêtes.

L'indice de sphéricité influe sur le comportement des grains par rapport au fluide en mouvement et sur les conditions de dépôt. Parmi toutes les formes possibles, la sphère est celle qui comporte la plus petite surface pour un volume donné. Par conséquent, le volume et densité égaux, une particule sphérique est abandonnée par le courant porteur plus tôt qu'une autre et se dépose plus vite.

L'indice d'émoussé donne une indication sur le degré d'usure du grain. Ce degré d'usure est sous la dépendance de l'agitation du milieu de sédimentation.

Cependant, l'indice de sphéricité et d'émoussé sont concomitants l'une de l'autre en même temps que la distance.

III.5. Etude minéralogique

Les dépôts sédimentaires de la zone étudiée sont constitués par des grès argileux. L'observation des échantillons sédimentologiques sous la loupe binoculaire permet de voir qu'ils sont formés par des grains de quartz et des minéraux argileux. Ces sédiments sont aussi testés par l'acide HCl (10%).

Cette méthode présente un grand intérêt dans l'interprétation de l'environnement du dépôt ancien.

RESULTATS

TROISIEME PARTIE : RESULTATS

I. COUPE

La coupe que nous avons effectuée, montre que les sédiments sont formés par des grès argileux à grains fins à grossiers de couleur vert gris, des grès de couleur rose, lie de vin et gris blanc, de grains fins à grossiers et d'argile jaune.



Echelle : 1 cm = 5 m

Coordonnées géographiques : S : 15°53'51.6"

E:046° 34'43.1"

Légende :

- Banc gréseux Grès fins à grossiers Grès argileux
 - Argile

 $\mathbf{F} =$ Fossiles de Dinosaures



La couche fossilifère est formée par de grès argileux. Ces dépôts sont meubles peu indurés alors, ils sont faciles à éroder où les fossiles sont presque en surface. L'échantillonnage (N1 à N9) a été effectué dans ce gisement.

Age	Formation	Membre	Echantillon	Coupe	Description
					lithologique
C A M P A N I E N	M A E V A R A N O	A N E M B A L E M B A	175m 174,9m 174,7m N6 N5 174,3m 174,3m N2 174m	\mathbf{F} Coordonnées géographiques S : 15°53'51.6" E : 046° 34'43.1" Alt : 174m	- Grès argileux à grains fins à grossiers de couleur vert gris

Echelle : 1 cm = 0,1m

Légende :

- Grès argileux
- **F** : Fossiles de Dinosaures

Figure 18 : Coupe lithologique du site de Sauropode.

II. GRANULOMETRIE

Les ossements sont localisés dans les niveaux (N1 à N3) de grès argileux. La majorité des sédiments sont constitués par des grains du quartz de diamètre compris entre 2mm à 0,063mm

L'étude de grains permet d'évaluer les paramètres, dans le tableau 2, page 23.

Les quartiles Q1, Q2 et Q3 ont servi au calcul des indices So et A, sachant que A représente le coefficient d'asymétrie ou coefficient de pente et So est l'indice de classement de Trask ou indice de tri.

ECHANTILLON	N1	N2	N3	N4	N5	N6	N7	N8	N9
Q1	0,464	0,328	0,430	0,459	0,498	0,359	0,336	0,659	0,141
Q ₂	0,587	0,519	0,559	0,618	0,580	0,490	0,527	0,746	0,448
Q ₃	0,893	0,846	0,697	0,948	0,722	0,765	0,928	0,786	0,611
$So = [Q_3/Q_1]^{1/2}$	1,387	1,606	1,273	1,437	1,104	1,460	1,662	1,093	2,081
$A = [Q_1 X Q_3] / Q2^2$	1,202	1,032	0,958	1,139	1,071	1,145	1,127	0,930	0,430

Tableau 3 : Tableau des divers indices de caractérisation des sédiments

L'indice de classement So varie de 1,093 à 2,081. Cet indice de classement est compris entre ($1 < So \le 2,5$). Ainsi, les sédiments sont bien classés.

La valeur du coefficient d'asymétrie est subdivisée en trois parties :

- de N1 à N3 : les valeurs du coefficient d'asymétrie A sont décroissantes (1,202 ≥ A ≥ 0,958), des positives à négatives.
- de N4 à N7 : les valeurs du coefficient d'asymétrie A sont plus ou moins constantes (≥ 1).
- de N8 à N9 : les valeurs du coefficient d'asymétrie A sont négatives (<1).



Courbes de fréquences simples :

Figure 19 : Courbes de fréquences simples des niveaux 1 à 5



Figures 20 : Courbes de fréquences simples des niveaux 6 à 9

L'étude de la courbe de fréquences simples (Figures 19 et 20) permet de regrouper les échantillons N1 à N9 en une catégorie.

Les courbes des échantillons (N1 à N9) ont une tendance unimodale, le mode principal est 0,25.

Elles présentent une symétrie par rapport à la médiane c'est-à-dire qu'on a un dépôt par excès de charge dû à la diminution du transport, sauf pour la courbe de fréquence N9, qui montre une asymétrie négative (Figure 20) cela signifie que le classement est maximum du coté grossier.



Courbes de fréquences cumulées :

Figure 21 : Courbes de fréquences cumulées des niveaux 1 à 5



Figures 22 : Courbes de fréquences cumulées des niveaux 6 à 9

Les courbes de fréquences cumulées (Figure 21 et 22) sont plus ou moins semblables, sauf pour les échantillons N7 et N9 qui présentent des pentes assez faibles.

Les résultats donnés par les courbes cumulatives des échantillons prélevés montrent :

- une dispersion des grains de diamètre inferieur à 0,063mm jusqu'à 1,6mm
- une proportion importante des grains fins et des grains moyens, selon la classification granulométrique, (Tableau 1, page 20).

III. MORPHOSCOPIE

L'étude morphoscopique des sables permet de distinguer plusieurs formes du grain de quartz : Quartz anguleux, quartz sub-anguleux, quartz sub-arrondi, et quartz arrondi, (Figure 23).

L'observation des grains du quartz a mis en évidence la présence de grains émoussés et luisants. Elle montre aussi la présence des traces du transport et de traces de chocs entre eux.



Légende :

- Qtz an : quartz anguleux
- Qtz s-an : quartz sub-anguleux
- Qtz s-ar : quartz sub-arrondi
- Qtz ar : quartz arrondi.

Figures 23 : Différentes formes des grains du quartz dans les niveaux N1 à N9.

Le comptage des différentes formes de grains du quartz dans chaque niveau (N1 à N9) donne les résultats suivants :

Niveaux	Qtz an	Qtz s-an	Qtz s-ar	Qtz ar
N1	4	38	51	7
N2	7	42	49	2
N3	8	45	47	0
N4	3	37	52	8
N5	0	40	51	9
N6	0	38	57	5
N7	2	39	53	6
N8	4	53	40	3
N9	5	54	41	0

Légende:

- Qtz an : quartz anguleux
- Qtz s-an : quartz sub-anguleux
- Qtz s-ar : quartz sub-arrondi
- Qtz ar : quartz arrondi.

Tableau 4: Morphoscopie des grains du quartz dans les niveaux N1 à N9.

Le comptage des grains permet de voir que les quartzs sub-arrondis sont les plus abondants dans les sédiments de la zone étudié.



Légende :

Qtz an	: quartz anguleux
Qtz s-an	: quartz sub-anguleux
Qtz s-ar	: quartz sub-arrondi
Qtz ar	: quartz arrondi.

Figure 24 : Proportion des formes de quartz dans les niveaux N1 à N9.

Le tableau 4 et l'histogramme (Figure 24) des différentes formes de grains de quartz dans les niveaux N1 à N9 montre que :

- les quarts sub-arrondis ont une proportion de 40 à 57%, avec une moyenne de 49%. Ils sont les plus abondants
- les quartzs anguleux ont une proportion maximale de 8%, avec une moyenne
 3,66%. Ils sont rares.

IV. MINERALOGIE

Les sédiments prélevés sur terrain sont testés à l'aide de l'acide Chlorhydrique (HCl) 10%. Le test est négatif, d'où l'absence du carbonate.

Le tamisage des échantillons a permis de dire que 80% des grains sont constitués par de quartz ; le reste (20%) est représenté par la fraction argileuse.

V. ETUDE TAPHONOMIQUE

V.1. Restes d'ossements de Vertébrés

Les restes des ossements étudiés sont de moyenne à grande taille. Parmi les restes ostéologiques, notons : le fémur, le tibia, la ceinture pectorale, la ceinture pelvienne, le radius, le cubitus, les vertèbres cervicales, les côtes, le carpe et le métacarpe.



Figure 25 : Restes d'ossements de Dinosaures.

V.2. Etat de conservation

Les ossements rencontrés dans le site étudié sont plus ou moins conservés.

Le classement de ces restes ostéologiques est établi en fonction de leur état de conservation (altération et détérioration).

V.3. Abondance des fossiles dans le site

L'abondance des ossements est remarquable dans le site, ils appartiennent à l'espèce de *Rapetosaurus krausei*.



Figure 26 : Reconstitution de squelette monté du *Rapetosaurus krausei*, vue latérale gauche (Curry Rogers & Forster, 2006)

Rapetosaurus est un genre de dinosaure sauropode qui vivait à Madagascar entre 70 et 65 millions d'années, à la fin de la période géologique du Crétacé. Une unique espèce, *Rapetosaurus krausei*, a été identifiée. Comme d'autres sauropodes, *Rapetosaurus* était un herbivore quadrupède ; de taille environ de 15 mètres. (Curry Rogers & Forster, 2001).

Classification:

Règne	: Animalia
Embranchement	: Chordata
Sous-embranchement	t.: Vertebrata
Classe	: Reptilia
Super-ordre	: Dinosauria
Sous-ordre	: Saurischia
Sous-ordre	: Sauropodomorpha
Clade	: Titanosauria
Clade	: Lithostrotia
Famille	: Nemegtosauridae
Genre	: Rapetosaurus
Espèce	: krausei

V.4. Couleur

Au moment de l'excavation, les fossiles sont encore pris dans les sédiments. Ils présentent une coloration brunâtre. (Figure 27)



Figure 27 : Ossements du membre supérieur de Dinosaures.

V.5. Orientation des fossiles

L'orientation des ossements dans le gisement varie selon leur forme et leur taille :

- les os courts à tailles moyennes sont orientés en direction NW-SE.
- la majorité des os longs à grandes tailles sont orientés en direction NE-SW

Un tri sélectif est à noter suivant la dimension de chaque pièce ostéologique, les ossements de grandes tailles (fémur, tibia, ceintures pelvienne et pectorale, cotes, radius et cubitus) sont déposés au horizon supérieur et les restes au-dessous (vertèbres cervicales, carpe et métacarpe)

Le carroyage consiste à mieux analyser et à mieux comprendre les phénomènes ayant participés à la mise en place des fossiles



Les ossements plats (ceinture pelvienne) sont dispersés dans le gisement.



Figure 28 : Répartition et orientation des ossements sur le site étudié.

L'inventaire de la mesure de l'orientation des ossements ainsi que le sens du courant a permis de dire que la direction du courant est de SE-NW.

Coordonnées	N°	Genre	Ossements	Formation	Membres	Date
géographiques						
	1	Rapetosaurus	Radius	Maevarano	Anembalemba	07/07/10
	2	Rapetosaurus	Tibia	Maevarano	Anembalemba	07/07/10
	3	Rapetosaurus	Radius	Maevarano	Anembalemba	07/07/10
	4	Rapetosaurus	Côte	Meavarano	Anembalemba	08/07/10
	5	Rapetosaurus	Côte	Maevarano	Anembalemba	08/07/10
	6	Rapetosaurus	Fragment du	Maevarano	Anembalemba	08/07/10
	13		cubitus			11/07/10
	15					11/07/10
	7	Rapetosaurus	Fragment de la	Maevarano	Anembalemba	08/07/10
	10		ceinture pelvienne			09/07/10
S : 15°53'51.6"	12					11/07/10
E : 46°34'43.6"	14					11/07/10
	16					11/07/10
	8	Rapetosaurus	Fémur	Maevarano	Anembalemba	09/07/10
	9	Rapetosaurus	Fragment de la	Maevarano	Anembalemba	09/0/10
			ceinture pectorale			
	11	Rapetosaurus	Fragment de la	Maevarano	Anembalemba	09/07/10
			côte			
	17, 18,	Rapetosaurus	Vertèbres	Maevarano	Anembaemba	11/07/10
	19, 20,		cervicales			
	21, 22, $23_{0} \pm 24$					
	2501 24	Rapetosaurus	Métacarpe	Maeyarano	Anembalemba	11/07/10
	25	Depeter	Game	Iviac varallu		11/07/10
	26	Kapetosaurus	Carpe	Maevarano	Anembalemba	11/07/10

 Tableau 5 : Catalogage des fossiles rencontrés dans le site étudié.

V.6. Déformations des fossiles

Une fois enfoui dans les sédiments un os peut subir des déformations, telles que : fragmentation, et/ou usure, fissure, cassure, marque et perforation.

> Fragmentation

Le mode de fractures est divers, plusieurs cas ont été observés : les ossements de grande taille se fracture et se fragmente facilement (cas du fémur, du tibia, des ceintures pelvienne et pectorale, des côtes, des radius, du cubitus,), alors que les autres ossements ont pu résister (cas des vertèbres cervicales, de carpe et de métacarpe).

> Cassure

La cassure des ossements sont bien observées dans le site étudié. En général les fossiles sont inclinés vers le même sens. La cassure des ossements dépend du degré de leur inclinaison.

> Usure

L'usure des fossiles est peu remarquable sur la surface des ossements.

> Marques

La surface de certains restes d'ossements présente des marques laissées par les insectes et ces traces d'organismes sont bien préservées.

Par ailleurs, la surcharge des dépôts au-dessus des ossements et les figures de charges au niveau du gisement peuvent provoquer aussi des déformations telles que : fissure, fracture et cassure. **INTERPRETATIONS**

QUATRIEME PARTIE : INTERPRETATIONS

I. INTERPRETATIONS SEDIMENTOLOGIQUES

I.1. Etude sédimentologique

Les dépôts sont constitués par des grès-argileux qui correspondent au Faciès 2 du Membre Anembalemba. Ces dépôts sont riches en ossements de Dinosaures et d'autres Reptiles.

I.1.1. Etude granulométrique

I.1.1.1. Courbes de fréquences simples

L'étude granulométrique des échantillons prélevés a permis de déterminer la dominance de grains fins à moyens de la classe des arénites (Tableau 1). La taille de grains dépend de la puissance et du dynamisme de la force du courant. Le classement granulométrique permet d'estimer l'importance des actions du tri au cours du transport et du dépôt (Chamley. H., 2000)

Les courbes granulométriques des niveaux du site (N1 à N9) montrent une tendance unimodale plus ou moins similaires où les grains appartiennent toujours à la classe des arénites. L'analyse de ces courbes granulométriques permet de dire qu'une nouvelle reprise de la force du courant a donnée naissance un dépôt de sables légèrement grossiers (0,5 à 1mm).

Les courbes de fréquences simples des niveaux N1 à N8 sont relativement en forme de cloche ce qui indique que les grains sont distribués de façon normale. Alors que la courbe N9 présente une asymétrie négative c'est-à-dire qu'il y a prépondérance des grains grossiers dans le milieu à forte énergie.

I.1.1.2. Courbes cumulatives

Les courbes cumulatives des sédiments ont la forme d'un S couché avec une pente assez faible, bien redressée et régulière. Les dimensions des grains de sables sont semblablement égales. Il s'agit de sables bien classés (classe des arénites) dans un milieu peu agité. La dispersion de grains est normale.

La proportion importante de grains fins à moyens montre que les dépôts ont eu lieu dans un milieu de moyenne à faible énergie

I.1.1.3. Les indices granulométriques

Les valeurs de classement de l'indice So sont comprises entre 1 à 2,5. Cela signifie que les sédiments sont bien classés avec des valeurs significatives (1,093 à 2,081). Ces valeurs montrent que les sables déposés sont distribués normalement.

En général la valeur du coefficient d'asymétrie A est positive. Il y a dominance des grains fins indiquant un milieu calme. Tandis que l'asymétrie négative (N3, N8 et N9) montre que les grains sont abondants du côté grossier qui marque un milieu agité.

Tous ceux-ci montrent qu'il présente une variation des forces du courant dans ce site fossilifère. Au début, la valeur d'asymétrie A est décroissante (N1 à N2) mais elle tend vers 1, le transport du sédiment est dans le milieu faible à moyenne énergie puis elle devient négative (0,958) dans le niveau N3 qui marque le dépôt agité à forte énergie. Dans les niveaux N4 à N7, cette valeur est fluctuante (oscillante) mais positive cela traduit une faible à moyenne énergie. Enfin, dans les niveaux N8 à N9, la valeur du coefficient d'asymétrie est négative (<1) qui montre l'augmentation des forces du courant. La variation de ces valeurs témoigne la présence d'une pente assez faible pendant le transport des sédiments.

I.2. Morphoscopie

Les études ont été effectuées sur des grains fins à moyens. La dimension granulométrique varie entre 0,315 et 1mm.

En général, l'aspect de la surface des grains est luisant, c'est-à-dire que le transport des sédiments se fait par l'eau. L'abondance des grains du quartz nous informe la présence d'apport détritique provenant du milieu environnant (Miall, 1978). Les grains de quartz sub-anguleux et sub-arrondis sont les plus abondants dans les sédiments. Ces formes expliquent que le transport des sédiments par de l'eau sur une distance peu éloignée, (Petit-John, 1957).

Les tailles de grains sont relativement petites c'est-dire que l'énergie de transport est moyenne à faible. Lors de ce transport :

Les grains de quartz montrent des traces du choc visible au microscope numérique, qui témoignent du transport et des chocs intergranulaires. La présence d'un ciment ferrugineux sur quelques grains montre le début d'une latérisation.

I.3. Minéralogie

Le test des échantillons (N1 à N9) à l'aide de l'acide chlorhydrique montre l'absence de carbonate dans les sédiments, cela signifie que les sédiments sont essentiellement constitués par des dépôts continentaux.

Les argiles constituent 20% des sédiments dans le site étudié. La présence de ces argiles traduit un dépôt par décantation (par excès de charge dû à la diminution de la compétence de l'agent de transport).

I.4. Conclusion partielle

L'étude sédimentologique des grains de sables a permis de distinguer que les sédiments sont distribués normalement, avec un indice de classement So compris entre 1 à 2,5. Il est interprété comme des sédiments bien classés. L'intensité des agents du transport des sédiments est de faible à forte.

Les grains de quartz sont émoussés luisants qui traduisent l'importance du transport fluviatile. L'abondance des quartzs sub-anguleux et sub-arrondis indique un transport sur une distance moins longue.

II. CARACTERISTIQUE TAPHONOMIQUE

II.1. Taphonomie

La taphonomie est la discipline de la paléontologie qui étudie tous les processus qui interviennent après la mort d'un organisme jusqu'à sa fossilisation ainsi que la formation des gisements fossilifères.

Plusieurs facteurs interviennent dans l'étude taphonomique des restes d'ossements, tels que :

- Les processus physiques : érosion mécanique, transport par l'eau et fragmentation.
- Les processus chimiques : oxydation ou réduction du milieu.
- Les actions biologiques qui interviennent après la mort de l'animal jusqu'à son enfouissement définitif.

Cette étude consiste à déterminer les formes, les positions et les orientations des fossiles contenus dans une couche de grès-argileux fins à grossiers, des roches sédimentaires, de manière que les ossements sont fossilisés sur place ou transportés.

L'étude des ossements sur le site s'avère important pour connaître la taille relative des fossiles transportés, l'abondance des organismes fossilisés et les transformations des pièces ostéologiques pendant l'enfouissement. D'après Prucca. A, 2007, trois points sont très importants tels que :

- profils squelettiques relevés sur ce site
- importance de la concentration osseuse
- état des restes (fragmentation, cassure, usure et perforation)

II.2. Taille de restes

La taille de restes des éléments osseux est importante pour établir l'approche taphonomique entre les différents niveaux étudiés. Du point de vue sédimentologique tous les niveaux sont plus ou moins identiques, influant ainsi sur la composition faunistique de Dinosaures et l'hydrodynamisme du milieu (Voorhies 1969 ; Dodson et al.,1975), dans notre étude, les sédiments sont constitués par des grains fins à grossiers (une proportion importante des grains fins à moyens) et les éléments squelettiques du Sauropode sont de moyenne à grande taille, ainsi, les ossements fossiles ont subi un léger déplacement après leur mort.

II.3. Abondance des fossiles dans le gisement

Les gisements fossilifères dans la région de Berivotra sont extraordinaires. Les fossiles des Vertébrés sont très abondants et bien conservés. Les fossiles de Vertébrés sont riches dans le membre Anembalemba (Formation de Maevarano), surtout dans les dépôts grès-argileux qui correspondent au Faciès 2, (Rogers et al, 2000).

Le site d'étude, où nous avons effectués notre travail ne renferme qu'une seule espèce, l'espèce : *Rapetosaurus krausei*.

La concentration des ossements fossiles est bien marquée sur le site étudié. L'accumulation d'ossements sur le gisement fossilifère reflète l'image des individus des tailles différentes.

Enfin, l'entassement peut dériver de l'occupation d'un lieu par une population constituée d'une seule espèce.

Au Crétacé Supérieur, la région a été aussi victime d'une grande inondation accompagnée de flots de boues laiteuses et de sables (Krause et Rogers.2007). Après, il y a changement brutale du climat qui devient chaud et sec entraînant ainsi l'assèchement du fleuve, d'où le fort taux de mortalité des animaux dans cette région, tels que : les Dinosaures, les Crocodiles, les Serpents, les Amphibiens, les Poissons, et même les Oiseaux.

D'autres facteurs aussi peuvent intervenir à cette mortalité :

- une déshydratation irréversible due à une grande chaleur,
- une malnutrition par la disparition des substances nécessaires pour les nourrir
- un empoisonnement provoqué par des algues toxiques qui abondent dans l'eau stagnante.

II.4. Corrélation entre sédimentologie et restes d'ossements

L'analyse granulométrique témoigne que les dépôts sont constitués par des grains fins à grossiers, mais il y a prépondérance des grains fins à moyens qui sont favorables à la conservation d'ossements de Vertébrés.

L'analyse morphoscopique montre que les sables ainsi transportés présentent des traces de polissage et des traces de chocs entre eux. (Figure 23,page 34).

Les tris sélectifs des ossements, la fragmentation et la dispersion de la ceinture pelvienne sur toute la zone et la concentration des divers éléments squelettiques dans ce site montrent la présence de transport.

D'après les résultats du carroyage :

- l'une des portions de la ceinture pelvienne a été trouvée dans la zone numéro 1A et les autres dans les zones 3A et 3B
- le fémur, la ceinture pelvienne, les côtes, le radius et métacarpe sont concentrés dans la zone numéro 1A

Le transport constitue le facteur primordial de la concentration, de la redistribution et de la sélection des restes fossiles.

II.5. Orientation des fossiles

Les ossements du site sont de moyenne à grande taille. Il est important de considérer l'orientation de chaque pièce ostéologique dans le gisement. Cette orientation a été mesurée à l'aide d'une boussole pendant la fouille. Le dénombrement de la mesure est indispensable pour la détermination de la direction du courant.

Le déplacement des fossiles dans leur gisement est en fonction de leur taille et de leur forme

D'après les résultats il y a deux directions préférentielles des ossements :

 les os courts à tailles relativement moyennes sont généralement orientés vers la direction NW-SE, de même que le coefficient d'asymétrie est de 1,032 signifie que l'intensité des agents de transport des fossiles est moyenne. Dans ce cas, le sens du courant suit la direction SE-NW de la partie développée des ossements. Si l'énergie de traction est insuffisante, les ossements sont déposés.

les os longs à grande taille sont orientés en moyennes vers la direction NE-SW, le coefficient d'asymétrie est négatif (< 1) cela signifie que l'énergie du transport est forte, d'où les sens du courant est perpendiculaire à la direction des ossements de SE-NW. Ainsi, lorsque l'agent de transport n'a plus assez d'énergie pour transporter l'ossement, celui-ci se dépose, (Figure 28).

En résumé, l'orientation préférentielle des courants suit la direction SE-NW. Ceci indique que le sens d'écoulement des eaux suit la direction SE-NW. Il s'agit du courant unidirectionnel.

II.6. Emplacement des fossiles

Les ossements de Dinosaures rencontrés dans la zone d'étude sont-ils fossilisés sur place (autochtone) ou transportés (allochtone) ou entre les deux (parautochtone) c'est-àdire un léger déplacement ?

Les fossiles présentent une position entre autochtonie et allochtonie c'est-à-dire paraautochtonie. Ces ossements sont concentrés dans un même endroit, mais les tris sélectifs entre les pièces ostéologiques sont bien observés. Un léger déplacement par rapport à leur emplacement initial a eu lieu, ceci est dû, d'une part, à la taille de l'animal, et d'autre part, au dynamisme du milieu.

Ainsi donc, le transport de fossiles est en fonction de leur taille, de leur forme, de leur poids et également de la force du courant de l'eau.

II.7. Mécanisme de fossilisation et de formation de gisement

Après leur mort, les éléments squelettiques des organismes sont détruits ou enfouis dans les sédiments et peuvent se fossiliser.

D'après l'étude de l'orientation des fossiles, nous avons pu constater que le milieu est plus ou moins agité ce qui signifie que l'énergie de transport est forte à faible. Ceci est témoigné de la présence des dépôts de grès-argileux. Les particules fines (argiles) sont déposées par décantation, lorsque l'énergie de transport est très faible à nulle, alors que les grains grossiers (sables) sont accumulés suivant l'augmentation de la force du courant de retour (courant unidirectionnel) par mécanisme de gravité et par vannage de ces éléments, d'où ils s'enfoncent dans la boue (sédiment mou) peu maturée.

II.7.1. Echanges internes et circonstances agissants sur eux

Les éléments squelettiques s'enfoncent rapidement dans le sédiment mou. L'abondance des grains fins à moyens dans les sédiments montre que les échanges d'eaux interstitielles sont faibles car la porosité des sédiments est petite.

La présence des argiles (imbibées l'eau à l'intérieur du sédiment) empêche les échanges d'oxygène à l'air libre.

En résumé, les conditions optimales pour la fossilisation des ossements sont atteintes. Ainsi les éléments squelettiques sont conservés.

II.7.2. Echanges externes ou Diagenèses

Après l'enfouissement, les restes du Sauropode subissent des transformations lentes et progressives par des échanges de substances. Au moment de la fossilisation des ossements, les échanges de substances entre le sédiment encaissant et les ossements sont faibles (porosité faible). L'ensemble de ces réactions aboutissent à un remplacement progressif de substances organiques par de substances minérales (minéralisation ou recristallisation).

II.7.3. Déformations des couches

Pendant la fossilisation, les ossements accumulent des gaz. L'expulsion des gaz et d'eaux contenues dans le sédiment lors de la compaction entraînent les déformations de deux couches superposées. D'après la coupe lithologique, la couche inferieure est moins plastique que la couche (hydroplastique) supérieure contenant les fossiles, d'où la couche encaissante des fossiles s'enfonce dans le niveau sous-jacent. Le changement des structures est dû aux effets de la superposition de deux couches de plasticité différente (figure de charge).

Ce changement de structures des couches peut être à l'origine des déformations des ossements.

II.7.4. Déformations des fossiles

Le changement des structures entres les deux couches provoque la déviation de la direction des ossements et l'inclinaison de chaque pièce ostéologique.

En général, les fossiles sont inclinés vers le même sens et la même zone. La cassure et la fracture des ossements dépendent des degrés de leur inclinaison :

- si l'angle de l'inclinaison est fort, certains ossements présentent des cassures, (Figure 29).
- si l'angle de l'inclinaison est faible, la fracture de l'os est bien observée, (Figure 27).

Les restes ostéologiques dans le gisement montrent aussi des fissures et des fragmentations. Ces dégradations sont dues à diverses causes :

- l'abondance des sédiments qui se déposent en même temps que les cadavres entraîne la fissuration et la fragmentation des ossements au cours de leur fossilisation.



Figure 29 : Fémur du Rapetosaurus krausei

- la fragmentation et la dispersion de la ceinture pelvienne sont causées par la violence du courant de l'eau car l'ossement est aplati.

- les éléments chimiques contenus dans les sédiments provoquent la fragmentation sous forme de craquelure c'est-à-dire une sorte de desquamation de la surface de l'ossement, (Figure 27).
- l'action des prédateurs s'avère aussi importante comme les insectes qui ont laissé des marques sur la surface des ossements, (Figure 30).



Figure 30 : Marque sur la surface d'ossement.

Les sédiments argileux sont favorables à la bioturbation. Le déplacement de la boue en forte concentration de particules dans l'eau constitue le courant de turbidité. Lorsque les actions hydrodynamiques interviennent peu, les particules fines se décantent très lentement et préservent des traces d'organismes à la surface de substratum ; cette préservation témoigne alors d'une vitesse d'écoulement faible et de l'autochtonie des fossiles.

En conclusion, la concentration d'ossements dans le site d'étude aurait eu lieu pendant une période de grande inondation. Cette inondation entraîne la mort d'un grand nombre d'organismes, parmi lesquels les Dinosaures étaient les plus atteints à cause de leur taille gigantesque. L'existence des tris, des distributions et des marques sur la surface des ossements témoignent de la présence d'un transport non loin de l'emplacement initial (lieu ou l'animal meurt). Il s'agit ici d'une parautochtonie. Les marques peuvent résulter aussi d'une action biologique intense (bioturbation) dans le sédiment.

L'augmentation du niveau de l'eau (inondation) provoque l'accroissement de l'espace d'accommodation, ce dernier favorise l'augmentation rapide des dépôts par l'accélération de subsidence (compaction).

III. PALEOENVIRONNEMENT

La présence de domaines paléogéographiques différents et la multiplicité des biotopes nécessitent une analyse fine du milieu. Les fossiles et les sédiments constituent des bons indicateurs du milieu de dépôts. La détermination du milieu est basée sur la nature et les caractères des sédiments et de leurs constituants.

La reconstitution de l'environnement du milieu d'étude est ici faite à partir de l'étude taphonomique des ossements de Sauropodes. Les sédiments ont été déposés par des courants sous une grande tranche d'eau. Les lits gréso-argileux, sombres et peu épais ont été installés pendant des périodes de l'inondation, par des courants de faible à forte énergie. La zone étudiée représente un environnement particulier qui reflète l'influence d'un genre du cataclysme naturel sur une configuration continentale (Signor, 1985). La présence de Dinosaures dans cette région nous indique que le climat est subtropical c'est-à-dire ni trop chaud ni trop humide (Krause et al, 2007).

CONCLUSION

CINQUIEME PARTIE : CONCLUSION CONCLUSION

Les dépôts constitués par des grès argileux du site étudié indiquent qu'ils appartiennent au Faciès 2 du membre Anembalemba.

L'analyse granulométrique des sédiments montre qu'ils appartiennent à la classe des arénites de sables bien classés dans un milieu peu agité de moyenne à faible énergie et les forces du courant oscillantes sont de faible à moyenne puis forte énergie sur une pente assez faible. La prépondérance des grains fins à moyens avec des particules argileuses dans les sédiments permet aussi de conclure qu'ils sont favorables à la conservation des ossements.

La morphoscopie des sables est caractérisée par l'abondance des quartzs subanguleux et sub-arrondis c'est-à-dire émoussés-luisants. Elle indique que les sédiments sont transportés dans un milieu aqueux sur une distance peu éloignée.

Les fossiles présentent une position entre autochtonie et allochtonie c'est la parautochtonie c'est-à-dire un léger déplacement des éléments squelettiques après la mort.

L'étude taphonomique des Reptiles dinosauriens du membre Anembalemba (Formation de Maevarano) du Bassin de Mahajanga a permis de caractériser la taphocoenose (assemblage d'animaux enfouis, vivants là où ils ont vécu autochtone) et la thanatocoenose (assemblage d'animaux post-mortem dont certains sont autochtones et d'autres sont allochtones) de la zone d'étude.

La concentration des ossements est bien marquée sur le site. L'accumulation des ossements sur le gisement fossilifère reflète l'image des individus de tailles différentes. L'entassement peut dériver de l'occupation d'un lieu par une population constituée d'une seule espèce.

Du point de vue paléoécologique, l'étude taphonomique du site évoque une grande inondation qui a affecté le Bassin de Mahajanga au Crétacé Supérieur. La zone étudiée représente un environnement particulier qui suppose l'influence d'un cataclysme naturel (une grande inondation). A cette époque le climat est subtropical c'est-à-dire ni trop chaud ni trop humide.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- ANDRIAMAHAZO R., 2002. Dynamique Paléoenvironnementale de l'Holocène du site Ankilibehandry (Belo-Sur-Mer) : Approche Micropaléontologique et Sédimentologique. Mém. D.E.A., Univ Tana., 61p, 37figs., 11tbl., 3pls.
- AUGUSTAIN & LOMBARD A., 1972. Série Sédimentaire : genèse évolution. Tome VI. Paris Masson et C^{ie}, Editeurs. 120, Boulevard – Saint – Germain, p.19-22, 89 figs.
- BERTRAN P. et al., 2006. Composition granulométrique des assemblages lithiques, application à l'étude taphonomique des sites paléolithiques. Paléo., n°18., 29p, 2tabl,31figs.
- BESAIRIE H., 1952. Géologies de Madagascar.- Le Bassin de Mahajanga. Travaux du Bureau Géologique Tananarive., n°38, 92p.
- BESAIRIE H., 1972. La géologie de Madagascar. Tome I, Les terrains sédimentaires. Les bassins de Mahajanga. Annales géologiques de Madagascar, fasc. n° XXXV, p.88-205, 15pl.
- 6. CAILLEUX A & VERGER F, 1961. Graphiques Granulométriques. Centre de documentation Universitaire et SEDES Réunis 5 place de la Sorbonne. Paris tome V.
- CAILLEUX A & TRICART J, 1959. Initiation a l'étude des sables et des galets. C.D.U. Edition, Tome III, 5 Paris V^e, p.139-175.
- 8. CAILLEUX A., 1942. Détermination Sédimentologique. Géologie 74, p.81-83.
- CARCAILLET C & TALON B., 1996. Aspects taphonomiques de la stratigraphie et de la datation de charbons de bois dans les sols : exemple de quelques sols des Alpes. Géographie physique et Quaternaire., Vol.50, n°2, p.233-244, 7figs, 2 tabl.
- CHAMLEY H., 1988. Les milieux de Sédimentation. Ed. BRGM-TEC & DOC., 171p, 165figs.
- 11. CHAMLEY H., 1990. Eléments de sédimentologie et de Pétrologie Sédimentaire.285p.
- COLLIGNION M., 1951. Le Crétacé Supérieur d'Antonibe. Couche de passage du Crétacé au Tertiaire. Annales géologiques de Madagascar, Serv.des Mines, fasc.I, pl.VIII, 64p.
- CURRY ROGERS and FORSTER C., 2004. "The skull of *Rapetosaurus krausei* (Sauropoda Titanosauria) from Late Cretaceous of Madagascar". Journal Vertebrate Paleontology. Vol.24, n° 1, p.121-144.
- CURRY ROGERS K.A., FORSTER C.A., 2001. The last of the Dinosaur Titan: A new Sauropod from Madagascar. Nature. Vol.412., p.530-534.

- DEPERET C., 1896. Note sur les Dinosauriens Sauropodes et Théropodes de Madagascar.
 Bull. Soc. Géol. Fr., t XXIV, p.176-194 et CR. Ac., Paris, CXXII, p.483.
- EFREMOV J. A., 1950. Taphonomie et annals géologiques. Inst. Paléont. Acad.Sci. U.R.S.S., 24, n°1, 178p, 45fig, 4pl.
- 17. GINSBURG L. et al.,2000. Les Vertébrés des sables continentaux d'âge Orléanien inferieur (MN3) de Mauvières à Marcilly-sur-Maulne (Indre-et-Loire), La Brosse à Meigné-le-Vicomte (Maine-et-Loire) et Chitenay (Loir-et-Cher). *Geodiversitas 22(4)*. p.597-631.
- HINDERMEYER J. et al., 1959. Préreconnaissance de Mahajanga, Rapport de fin de mission (Campagnes 1957 et 1958). Mission B.R.P.- S.P.M. Institut Français du Pétrole.
- HOLZ M & SOUTO-RIBEIRO., 2000. Taphonomy of the South-Brazilian Vertebrates. Revista Brasileira de Geocências 30 (3)., vol.30, p.491-494.
- 20. INTES., ARNAUDIN H., 1987. Esquisse sédimentologie du lagon in Contribution à l'étude de l'atoll de Tikehau : IV. ORSTOM *.Notes et documentations*, n°35, p.71-100.
- KRAUSE D. et al., 2006. Late Cretaceous terrestrial Vertebrates from Madagascar: Implication for Latin American Biogeography. Ann. Missouri Bot Gard , vol.93, Number 2, p.179-208.
- KRAUSE D. et al., 1998. Titanosaurid (Sauropoda) Osteoderms from the late Cretaceous of Madagascar. Journal of Vertebrate Paleontology ., vol.18, N°3, p.563-568.
- 23. KRAUSE D., HARTMAN J., 1996. Late Cretaceous fossiles from Madagascar and their implications for biogeogrphic relationships with the Indian subcontinent. In Shani, A., ed. Memoir. Geological Society of India, Vol.37, p.135-154.
- KRAUSE D., RASOAMIARAMANANA A., 2006. Late Cretaceous vertebrates of Madagascar: Implications for Gondwanan biogeography. Mesozoic Terrestrial Ecosystems, 1fig., p.59-62.
- 25. LAROULANDIE V., MALLYE J.-B., DENYS C., 2009. Taphonomie des petits Vertébrés : Référentiels et Transferts aux fossiles. Oxford, British .Arhaelogical Reports, International. Séries 2269., p.181-194. ISBN 978 1 4073 0843 2.
- LAVOCAT R., 1955. Etude des gisements de Dinosauriens de la région de Mahajanga (Madagascar). Service Géol., Tananarive, n°69, 16p., 3figs.
- 27. MARTAIN & RONALD E., 1999. Taphonomy: A Process Approach. Cambridge Paleobiology. Series.4. Series editors, D.E.G Briggs university of Bristol.,508p. ISBN 0 521 59171 6. - ISBN 0 521 59833 8 (paperback.).

- MATTHEWS T., 2006. Taphonomic Characteristics of Micromammals Predated by Small Mammalian Carnivores in South Africa: Application to Fossil Accumilations. *Journal of Taphonomy*. Vol.4, n°3, p.143-161.
- 29. MAURICE E., TUCHER., 2003. Sedimentary Rocks in the Field. Geological Field Guide Series. Third Edition. p.234.
- 30. MHAMMDI N., ACHAB M., HAMOUMI N., AZZA A., 2005. Les sables titanifères du littoral et de l'estuaire de l'Oum Er-Rbia (Côte Atlantique Marocaine) : sédimentologie et potentiel d'exploitation. Bull.de l'Institut Scientifique. Sciences de la terre. n°27., p.83-91, 8fgs.
- 31. MIREILLE E. A. et al., 2010. Analyse sédimentologique et Diffractométrique des sédiments superficiels de la Lagune Digboué de San Pedro (Côte d'Ivoire). European Journal of Scientific. Research.Vol.44. N° 4, pp. 527-540., ISSN 1450-216X.
- PASCAL. et al., 2006. Composition Granulométriques des assemblages lithiques, application à l'étude taphonomique des sites Paléolithiques. Paléo., Vol.18, pp.1-30.
- 33. PIQUE A. et al., (1999). L'évolution géologique de Madagascar et la dislocation du Gondwana : une introduction. Journal of African Earth Sciences, vol. 28, N°4, pp. 919-930. Ed. Pergamon.
- PIVETEAUX J., 1968. Recherches Paléohistologique sur les os Longs de Tétrapodes.
 Annales de Paléontologie., t. LIV. Masson et Cie, Editeurs. p.131-145.
- POMEROL CH., 1975. Stratigraphie et Paléogéographie Ere Mésozoïque ParisDoin Ed., Univ. Paris, 372p., 360figs.
- 36. RABENOROSOA M. V., 2009. Apport de la Taphonomie et de la sédimentologie dans l'étude du site MAD 05-42 Berivotra Mahajanga. Mém. D.E.A., Univ. Tana, pls XXIV, 64p, 4tbl.
- RAHANTARISOA L. J., 2007. Biostratigraphie et Paléoécologie du Maastrichtien de Berivotra (Mahajanga). These de Doct. Univ. Tana., 132p, 19 pls, 23fgs.
- RATSIMBAHOLISON N. O., 2008. Ontogénie crâniofaciale de Majungasaurus crenatissimus Theropode Abelisauridae du CretacéSupérieur de Berivotra-Mahajanga. Mém. D.E.A., Univ. Tana, 82p, 71figs, 3tbls.
- 39. RAVOAVY F., 1991. Identification et mise en catalogue des Vertèbres fossiles récoltés dans le Crétacé Supérieur continental de la région de Berivotra Mahajanga. Mém.D.E.A. Univ Tana.

- 40. ROGERS R. R. et al., 2007. Paleoenvironment and Paleoecology of *Majungasaurus crenatissimus* (Theropoda : Abelisauridae) from the Late Cretaceous of Madagascar. Journal of Paleontology., Vol.27, Supplement to Number 2., p.21-31.
- ROGERS R. R., 2005. Fine-grained debris flows and extraordinary vertebrate burials in the Late Cretaceous of Madagascar. *Geology*. Vol.33, n°4, p.297-300,3fgs.
- 42. ROGERS R. R., KRAUSE D. W., CURRY ROGERS K., 2003. Cannibalism in the Madagascar Dinosaur *Majungatholus atopus*. Nature, vol. 422, p.515-518.
- 43. ROGERS R., HARTMAN J., KRAUSE D., 2000. Stratigraphic analysis of Upper Cretaceous rocks in the Mahajanga basin, northwestern Madagascar. *The journal of* geology., Vol .108, p. 275-301.
- 44. ROGERS R.R., SAMPSON S.D. and E.M., 1997. Taphonomy of semi-arid depositional settings: A case study from the subtropical Late Cretaceous of Madagascar. *Journal of Vertebrate Paleontology*. 17 (3, supplement): 71A.
- 45. SAMPSON S. D. et al., 1998. Predatory Dinosaur Remains from Madagascar: Implications for the Cretaceous Biogeography of Gondwana., Sciences.vol.280, p.1048-1051.
- 46. SANKEY & JULIA. T., 2007. Faunal Composition and Significance of High Diversity, Mixed Bonededs Containing *Agujaceratops mariscalensis* and other Dinosaurs, Aguja Formation (Upper Cretaceous), Big Bend, Texas. In Press. In: *New Perspectives on Horned Dinosaurs*. M. Ryan, B. Chinnery-Allgeier, and D. Eberth (eds). p.1-47.
- 47. SOURDAT M., MAHE J., DELAUNE-MAYERE M., 1975. Etudes granulométriques par les méthodes classiques et par l'analyse factorielle des correspondances : application aux formations superficielles du Sud-Ouest de Madagascar.Cah. ORSTOM, sér. Géol., vol. VII, n° 2, p.125-143.
- 48. VOORHIES M. R. 1969. Taphonomy and populations dynamics of an early Pliocene vertebrate fauna, Knox County, Nebraska. University of Wyoming Contributions in Geology. Vol 1 p.1-69.
- 49. VREMIR M & CODREA V.A., 2002. The first Late Cretaceous (Maastrichtian) Dinosaur footprints from Transylvania (Romania). Geologia. Vol.2. t XLVII., p.93-104.
ANNEXE : Résultats des analyses granulométriques des échantillons prélevés sur le site

TC : Tamisât cumulé

T % : Tamisât en %

N° ECH : Numéro des échantillons

N° ECH	TAMISAT	OUVERTURE DU TAMIS EN MILLIMETRE																			
		<0,063	0,063	0,075	0,08	0,1	0,125	0,16	0,2	0,25	0,4	0,315	0,5	0,63	0,8	1	1,25	1,6	2	5	>5
1	ТC	6,4	8,38	8,58	11,83	15,98	24,02	31,12	43,88	57,63	69,37	78,63	86,08	91,42	94,98	97,26	98,56	99,06	99,1	99,1	99,1
	Т %	6,4	1,98	0,2	3,25	4,15	8,04	7,1	12,76	13,75	11,74	9,26	7,45	5,34	3,56	2,28	1,3	0,5	0,04	0	0
2	ТС	5,96	8,31	8,56	10,99	14,83	21,72	30,66	42,33	55,76	66,41	75,33	83,31	89,81	93,21	96,17	97,92	98,42	98,62	98,62	98,62
	Т %	5,96	2,35	0,25	2,43	3,84	6,89	8,94	11,67	13,43	10,65	8,92	7,98	6,5	3,4	2,96	1,75	0,5	0,2	0	0
3	ТС	6,78	9,12	9,35	12,33	16,47	22,12	30,77	43,42	57,16	68,92	72,2	85,55	91,52	94,67	97,07	98,27	98,82	98,94	98,94	98,94
	Т %	6,78	2,34	0,23	2,98	4,14	5,65	8,65	12,65	13,74	11,76	9,28	7,35	5,97	3,15	2,4	1,2	0,55	0,12	0	0
4	ТС	5,54	7,54	7,79	11,09	16,83	24,28	33,4	44,55	57,53	69,25	78,5	86	91,85	95,15	97,35	98,55	98,95	99	99	99
	Т %	5,54	2	0,25	3,3	5,74	7,45	9,12	11,15	12,98	11,72	9,25	7,5	5,85	3,3	2,2	1,2	0,4	0,05	0	0
5	ТС	5,45	7,18	7,38	10,8	15,45	27,01	31,85	43,95	57,15	70,11	78,34	85,88	91,73	95,13	97,33	98,53	98,93	98,98	98,98	98,98
	Т %	5,45	1,73	0,2	3,42	4,65	6,56	9,84	12,1	13,2	12,96	8,23	7,54	5,85	3,4	2,2	1,2	0,4	0,05	0	0
6	ТС	6,71	8,75	9	12,18	16,92	22,77	30,88	42,34	56,08	68,82	76,94	84,78	90,54	93,66	96,14	97,79	98,39	98,69	98,69	98,69
	Т %	6,71	2,04	0,25	3,18	4,74	5,85	8,11	11,46	13,74	12,74	8,12	7,84	5,76	3,12	2,48	1,65	0,6	0,3	0	0
7	ТС	7,65	11,29	11,54	16,69	24,04	33,3	43,28	56,23	68,19	77,14	83,34	88,58	92,63	95,57	97,3	98,42	98,76	98,81	98,81	98,81
	Т %	7,65	3,64	0,25	5,15	7,35	9,26	9,98	12,95	11,96	8,95	6,2	5,24	4,05	2,94	1,73	1,12	0,34	0,05	0	0
8	ТС	6,25	8,23	8,58	11,04	14,99	22,34	33,38	46,05	59,21	71,19	79,64	86,07	91,41	94,64	96,82	98,07	98,62	98,77	98,77	98,77
	Т %	6,25	1,98	0,35	2,46	3,95	7,35	11,04	12,67	13,16	11,98	8,45	6,43	5,34	3,23	2,18	1,25	0,55	0,15	0	0
9	ТС	5,75	6,8	7,12	15,09	24,44	34,42	43,2	55,04	65,79	74,43	81,51	87,33	91,98	94,91	97,06	98,11	98,41	98,41	98,41	98,41
	Т %	5,75	1,05	0,32	7,97	9,35	9,98	8,78	11,84	10,75	8,64	7,08	5,82	4,65	2,93	2,15	1,05	0,3	0	0	0

PLANCHES : Illustration des ossements du *Rapetosaurus* krausei



Figure 31 : Ceinture pectorale

Figure 32 : Ceinture pelvienne



Figure 33 : Radius et des côtes

Figure 34 : Vertèbre cervicale et partie de la ceinture pelvienne.





Figure 36 : Vertèbre cervicale



Figure 37 : Radius, côtes et vertèbre cervicale.

: ANDRIANJAFISOA
: Maminiaina Rodin
: mamrodin@ymail.com
: Taphonomie du site <i>Rapetosaurus krausei</i> de la région de Berivotra
(Bassin de Mahajanga)
: Dr. RAHANTARISOA Lydia.

Résumé

La sédimentologie appliquée à l'étude taphonomique des Sauropodes de la région de Berivotra dans le Bassin de Mahajanga a permis de mieux comprendre les processus qui ont abouti à la formation des gisements fossilifères. L'abondance de Vertébrés fossiles dans le Faciès 2 (constitué par des grès argileux) du Membre Anembalemba (Formation de Maevarano), surtout de Dinosaures, bien conservés explique l'environnement du milieu. Les résultats montrent que les ossements de Dinosaures sont autochtones au départ, puis une grande inondation est venue et ces restes ostéologiques ont subi un léger déplacement après la mort jusqu'à leur fossilisation c'est-à-dire allochtones ou parautochtones. L'analyse morphoscopique des sables confirme la présence du transport marquée par l'abondance des grains de quartz sub-arrondis, et l'aspect luisant montre le transport par l'eau. Du point de vue paléoécologique, l'étude taphonomique des Dinosaures Sauropodes évoque une grande inondation qui a affecté le Bassin de Mahajanga au Crétacé Supérieur. A cette

Mots clés : Taphonomie – Sédimentologie –Paléoenvironnement – Berivotra – Membre Anembalemba.

époque le climat était subtropical c'est-à-dire ni trop chaud ni trop humide.

Abstract

Sedimentology applied to the Sauropods taphonomic study of Berivotra Region in Mahajanga Basin has led to a better understanding of the processes that led to the formation of fossil deposits. The abundance of Vertebrate fossils in Facies2 (consisting of clay-sandstone) of Anembalemba Member (Maevarano Formation), especially Dinosaurs, well preserved due the workplace environment.

The results show that dinosaur's bones are initially autochthonous; followed by a great flooder the osteological remains have undergone a slight shift after death until fossilization is to say a allochthonous or parautochthonous. The morphoscopic analysis confirms the presence of sand marking transport abundance of sub-rounded grains and shiny appearance shows the water transport.

The paleoecological perspective, the taphonomic study of Sauropods dinosaurs suggests a great flood that affecting the Mahajanga Basin during Late Cretaceous. At this time the climate was subtropical it is neither too hot nor too humid.

Keywords: Taphonomy – Sedimentology – Paleoenvironment – Berivotra – Anembalemba Member.