



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Mention : Bassins sédimentaires, Evolution Conservation

Parcours: Bassins sédimentaires, Archives de la terre et Ressources du futur

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de MASTER II



Présenté par : **ANDRIATSILAVO Rado**

Soutenu publiquement, le 28 Octobre 2017

Devant les membres du jury composé de :

Président : Monsieur RAKOTONDRAZAFY Toussaint,

Maître de Conférences

Encadreur-Rapporteur : Madame RAHANTARISOA Lydia Jeanne,

Maître de Conférences

Examinateurs : Monsieur RASOLOFOTIANA Edmond,

Maître de Conférences

Madame RANAIVOSOA Voajanahary

Maître de Conférences



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

Domaine : SCIENCES ET TECHNOLOGIES

Mention : Bassins sédimentaires, Evolution Conservation

Parcours: Bassins sédimentaires, Archives de la terre et Ressources du futur

Mémoire en vue de l'obtention du diplôme de MASTER II



Présenté par : **ANDRIATSILAVO Rado**

Soutenu publiquement le, 28 Octobre 2017

Devant les membres du jury composé de :

Président : Monsieur RAKOTONDRAZAFY Toussaint,

Maître de Conférences

Encadreur-Rapporteur : Madame RAHANTARISOA Lydia Jeanne,

Maître de Conférences

Examinateurs : Monsieur RASOLOFOTIANA Edmond,

Maître de Conférences

Madame RANAIVOSOA Voajanahary

Maître de Conférences

REMERCIEMENTS

En guise de reconnaissance, je tiens à témoigner de mes sincères remerciements à toutes les personnes qui m'ont aidé de près ou de loin au bon déroulement de mon mémoire et à l'élaboration de ce travail.

- Monsieur Marson RAHERIMANDIMBY, Professeur Titulaire, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université d'Antananarivo, de m'avoir autorisé à soutenir publiquement ce mémoire.

- Monsieur Toussaint RAKOTONDRAZAFY, Maître de Conférences, Responsable de la Mention Bassins sédimentaires, Evolution et Conservation, qui m'a fait l'honneur de présider ce jury pour la présentation orale. Ses précieux conseils, ses observations et ses critiques très constructives, malgré toutes ses occupations, m'ont ouvert une nouvelle aventure dans le monde de la recherche. Je lui en suis très reconnaissant.

- Madame Voajanahary RANAIVOSOA, Maître de Conférences, qui m'a fait l'honneur d'examiner ce mémoire et de m'avoir aidé et donné des conseils et des critiques constructifs pendant la rédaction de ce mémoire.

- Monsieur Edmond RASOLOFOTIANA, Maître de Conférences, d'accepter de participer au jury de ce mémoire comme examinateur.

- Je tiens à remercier vivement Monsieur Datian WU, qui m'a beaucoup aidé sur la réalisation de différentes analyses granulométriques pour avoir les données nécessaires pour ce mémoire.

- Je remercie également mon Encadreur-Rapporteur Madame Lydia Jeanne RAHANTARISOA, Maître de conférences, pour sa gentillesse, ses enseignements, ses conseils pratiques et techniques, son support inestimable durant mes études. Elle a suivi de près avec attention mon travail depuis le début et m'a prodiguée toutes les recommandations et critiques indispensables pendant l'élaboration de ce travail. Je lui en suis très reconnaissant.

- Permettez-moi d'exprimer mes gratitude à tous les Enseignants, pour tout le savoir qu'ils m'ont dispensée, ainsi qu'aux personnels de la Mention BEC, à tous mes amis de la promotion, à tous mes amis pour les aides qu'ils m'ont offerts durant mes cursus universitaires.

- Enfin, mes sincères remerciements vont également à mes parents, mes deux frères et ma sœur ainsi que ma petite nièce, qui m'ont soutenus tant moralement que financièrement durant mes parcours universitaires.

DEDICACE

Je dédie ce mémoire :

A notre Dieu Tout- Puissant « Source de toutes les connaissances,

pour tous les bienfaits que j'ai reçus durant mes années d'études »

A ma mère, Mme RAZAFIHERISAMBATRA Nina Eléonore, la

personne qui m'a aidée et soutenue de jour et nuit pendant toute

mes années d'études.

A mes frères et sœur : ANDRIATSILAVO Rina,

ANDRIATSILAVO Tamby, RAZANADRABARY Rojo Malala

Et ma petite nièce Raniah Fandresena BEASSON

A ma famille

Merci beaucoup....

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS	ii
DEDICACE.....	iii
SOMMAIRE	iii
LISTE DES ABREVIATIONS	v
LISTE DES FIGURES	vi
LISTE DES TABLEAUX	viii
INTRODUCTION.....	1
Partie I : GENERALITES	
I-1. Historique	2
I-2. Contexte géodynamique	3
I-3. Bassin de Mahajanga	4
I-3-1. Cadre géographique.....	4
I-3-2. Cadre géologique.....	5
I-3-2-1. Les formations Karoo.....	5
I-3-2-2. Les formations Post-Karoo	7
I-3-2-3. Le Crétacé Supérieur de la région de Berivotra	8
Partie II : MATERIELS ET METHODES	
II-1. Zone d'étude.....	13
II-2. Matériels.....	13
II-2-1. Matériels utilisés sur terrain	13
II-2-2. Matériels utilisés au laboratoire	13
II-2-3. Outils utilisés pour les analyses de données	14
II-2-4. Cadre climatique	14
II-2-5. Cadre géomorphologique	14
II-3. Méthodes	16
II-3-1. Démarche adoptée.....	16
II-3-2. Prospection et acquisition des données	17
II-3-3. Traitements de données.....	17
II-3-3-1. Traitement sur terrain.....	17
II-3-3-2. Traitement au laboratoire	17
II-3-3-3. Analyses statistiques	27
Partie III : RESULTATS et INTERPRETATION	
III-1. Coupes lithologiques.....	32
III-2. Résultats morphoscopiques	32
III-3. Résultats de l'examen minéralogique	33
III-4. Résultats granulométriques	34
III-4-1. Courbes granulométriques	34
III-4-1-1. Courbes de fréquence simple (C.F.S)	34

III-4-1-2. Courbes de fréquence cumulée (C.F.C).....	36
III-4-2. Moyenne Mz	38
III-4-3. Standard deviation So	40
III-4-4. Swekness SK	41
III-4-5. Relation entre So et Mz	41
III-4-6. Relation de KG et Mz	42
III-4-7. Relation de SK et Mz.....	42
III-5. Méthode de quartile	43
III-5-1. Coefficient de classement de TRASK C.....	43
III-5-2. Coefficient d'asymétrie A.....	43
III-6. Classification par statistique multidimensionnel.....	43
III-6-1. Analyse en Composante Principale	44
III-6-1-1. Valeurs propres.....	44
III-6-1-2. Représentation des variables	44
III-6-2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA).....	46
III-6-2-1. Classification des individus par CHA	46
III-6-2-2. Dendogramme	47
Partie IV : DISCUSSION	
IV-1. Lithologie.....	49
IV-2. Morphoscopie et minéralogie	49
IV-3. Paramètres granulométriques.....	50
IV-3-1. Standard deviation So.....	50
IV-3-2. Swekness ou coefficient d'asymétrie SK	50
IV-4. Courbe granulométrique	51
IV-5. L'ACP et la CHA.....	51
IV-6. Paléoenvironnement.....	51
CONCLUSION	52
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	54
REFERENCES WEBOGRAPHIES.....	55
ANNEXE	
Annexe 1 : Tableau du résultat granulométrique par tamisage	I
Annexe 2 : Interface du logiciel GRADISTAT.....	II
Annexe 3 : Principaux milieux de sédimentation.....	II

LISTE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyse en Composante Principale

CHA : Classification hiérarchique Ascendante

E : Est

KG : Angulosité (Kurtosis)

Mz : La moyenne

N : Nord

W : Ouest

Quartiles Q1, Q2 et Q3

S : Sud

SK : Le coefficient de dissymétrie (Skewness, Sk)

So: Déviation Standard

U : Le coefficient d'uniformité

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Bassins Est-africains et Malagasy (REEVES et al. 1988)	4
Figure 2: Délimitation et carte géologique du bassin de Mahajanga (BESAIRIE, 1996 modifié par l'auteur)	5
Figure 3: La Formation de Maevarano (Campanien)	8
Figure 4: Un affleurement du Membre Anembalemba.....	10
Figure 5: Localisation de la zone d'étude (source : google earth).....	13
Figure 6: Matériels utilisés au laboratoire	14
Figure 7: Réseaux hydrographiques du bassin de Mahajanga (BD 500 modifié par l'auteur).....	15
Figure 8: Carte géomorphologie de la zone d'étude (BD 500 modifié par l'auteur)	15
Figure 9: Organigramme de la méthodologie adoptée	16
Figure 10: Charte visuelle permettant l'estimation de la sphéricité et de l'émoussé des graviers et des sables. (POWERS, 1953)	18
Figure 11: Exemple de granoclassement normal dans des dépôts fluviatiles.....	21
Figure 12: Classement des particules	21
Figure 13: Exemple d'étalement positif et négatif (SWEKNES).....	22
Figure 14: Classement des formations détritiques (FOLK ,1957).....	25
Figure 15: Représentation des variables sur dans un plan factoriel.....	28
Figure 16: Représentation des individus sur un plan factoriel	29
Figure 17: Représentation graphique du principe de la CHA.....	30
Figure 18: Coupe lithologique de la zone d'étude	32
Figure 19: Morphoscopie des grains de quartz.....	34
Figure 20: C.F.S pour les couches M1 jusqu'à M5	35
Figure 21: C.F.S pour les couches M6 jusqu'à M10	35
Figure 22: C.F.S pour les couches M11 jusqu'à M16	36
Figure 23: C.F.C pour les couches M1 jusqu'à M5.....	37
Figure 24: C.F.C pour les couches M6 jusqu'à M10.....	37
Figure 25: C.F.C pour les couches M11 jusqu'à M16.....	38
Figure 26: Représentation des échantillons selon le diagramme de FOLK.....	39
Figure 27: Répartition des sédiments d'après le diagramme de FOLK.....	40
Figure 28: Relation entre So et Mz.....	41
Figure 29: Relation entre KG et Mz	42
Figure 30: Relation entre SK et Mz.....	42
Figure 31: Représentation graphique des valeurs propres et pourcentage cumulée de leurs variances absorbées	44

Figure 32: Distribution des variables dans le plan factoriel formé par F1 et F2	45
Figure 33: Représentation graphique du nuage des points de chaque couche sur plan factoriel formé par F1 et F2	46
Figure 34: Représentation graphique de la variation des indices de niveau en fonction de l'agrégation des classes selon CHA des individus.....	47
Figure 35: Arbre hiérarchique issu de la classification réalisée à partir des 16 couches.....	47
Figure 36: Paléoclimat du globe au Crétacé supérieur (SCOTESE, Paleomap, 2000).	50

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Classifications des faciès sédimentaires en fonction de la Moyenne selon la méthode WARD ET FOLK (1957).....	23
Tableau 2: Classification des faciès sédimentaires en fonction du Sorting index selon la méthode Ward et Folk (1957)	24
Tableau 3: Classification des faciès sédimentaires en fonction du Skewness selon la méthode Ward et Folk (1957).....	24
Tableau 4: Classification des roches détritiques	26
Tableau 5: Résultats de la morphoscopie des grains	33
Tableau 6: Classification des couches selon les valeurs de Mz	39
Tableau 7: Classification des couches selon la valeur de So.....	40
Tableau 8: Classification des couches selon la valeur de SK.....	41
Tableau 9: Résultat de tamisage.....	43
Tableau 10: Résumé de la classification des couches par CHA.....	48

INTRODUCTION

La partie Ouest de Madagascar est constituée par des formations sédimentaires et représente l'un-tiers de la superficie de l'Ile. Ces roches sédimentaires sont d'origines détritique, chimique ou biochimique et carbonée qui représentent de nombrables opportunités dans La grande île.

Afin d'apporter plus d'informations sur ces roches sédimentaires, l'étude paléontologique, qui est une étude des êtres vivants existés au cours des diverses époques géologiques a été faite dans ce mémoire. En effet, cette discipline est fondée sur l'étude des fossiles et constitue une des méthodes les plus importantes tant au niveau de caractérisation des dépôts sédimentaire tant au niveau de datation.

Comme notre site d'étude se situe dans le bassin de Mahajanga, depuis 1993, la région de Berivotra a attiré de nombreux chercheurs scientifiques, surtout les paléontologues, pour la découverte de nombreux gisements de dinosaures associés à d'autres fossiles avec l'équipe de Professeur KRAUSE à partir de 2007. Et vue l'occupation moins étendue et l'isolation du Membre Miadana dans cette région, les recherches y faites ne sont pas nombreuses et détaillées contrairement aux autres Membres c'est pourquoi, ce mémoire a pour objectif de caractériser les sédiments du Membre Miadana de la Formation de Maevarano afin de pouvoir établir une reconstitution paléoenvironnementale de ce Membre. Avant la réalisation de cette étude, des bibliographies concernant la zone ont été faites et les résultats obtenus sont corrélés avec ceux des travaux pour avoir plus d'informations précises.

Les objectifs spécifiques consistent à :

- établir une coupe lithologique,
- faire l'étude morphoscopique des échantillons,
- faire l'analyse granulométrique par tamisage,
- analyser les données requises du tamisage par des méthodes géostatistiques afin d'avoir les maximums d'informations.

Pour pouvoir bien élaborer ces objectifs, le plan adopté de cette étude sera comme suit :

- les généralités, en premier lieu, pour initier le contexte général de l'étude,
- puis par les matériels et méthodes, en deuxième lieu, utilisés pendant la réalisation de ce mémoire appuyé par les résultats et interprétation dans la troisième partie,
- Et enfin la discussion

Partie I :

GENERALITES

I-1. Historique

Depuis la découverte de l'importance du bassin de Mahajanga à Madagascar, nombreux sont les travaux qui ont contribué à l'inventaire des fossiles (micro et/ou macro). Cet inventaire s'est effectué avec l'étude géologique du Crétacé supérieur (Campanien et Maastrichtien) de la région de Berivotra.

- BESAIRIE, (1972) a défini les différents étages dans le Crétacé continental post-basaltique entre la Mahajamba et la Betsiboka (bassin de Mahajanga).
- RAVOAVY, (1991) a fait des études sur les Vertébrés fossiles récoltés dans le Crétacé supérieur continental de la région de Berivotra.

A partir de 1993, des nouvelles recherches très importantes ont été mises en place par des chercheurs américains et malagasy dans le cadre d'une collaboration entre l'Université d'Antananarivo (ex-Département de Paléontologie et d'Anthropologie Biologique) d'une part, et l'Université de Stony Brook (Department of Anatomical Sciences) d'autre part. Ainsi,

- KRAUSE et al. (1996, 1998, 2000, 2003, 2005, 2010), ont étudié les fossiles de Vertébrés (Dinosaures, Tortues, Crocodiles, Serpents et Oiseaux et Mammifères) de la Formation de Maevarano ainsi que leur implication paléobiogéographique.
- BIGNOT (2001) et ABRAMOVICH (2002) ont apporté des précisions sur la présence du Maastrichtien supérieur à Berivotra.
- ROGERS (2000) a révisé l'étude géologique du Crétacé supérieur de Berivotra pour les Formations de Maevarano (Campanien) et de Berivotra (Maastrichtien).
- RAHANTARISOA, (2007) s'est intéressée à la Biostratigraphie et la Paléoécologie du Maastrichtien de Berivotra.
- ROGERS et al. (2010) a défini un nouveau Membre de la Formation Maevarano dans la région du Lac Kinkony (Membre Lac Kinkony).

L'étude du Crétacé supérieur dans les deux régions (Berivotra et Lac Kinkony) permet de dire la présence d'un certain contraste au niveau stratigraphique. La Formation de Maevarano (Campanien) est représentée par un faciès continental et la Formation de Berivotra (Maastrichtien) par des dépôts marins.

I-2. Contexte géodynamique

L'ouverture du bassin de Mahajanga s'est faite en deux étapes :

- un stade synrift du Permo-Trias au Jurassique inférieur,
- un stade postrift correspondant à la fin de la sédimentation syntectonique.

Le rifting entre Madagascar et l'Afrique a commencé pendant le Permo-Trias. L'expansion des fonds océaniques entre les marges divergentes du Sud de la Somalie, du Kenya et de la Tanzanie (bassin somalien occidental), et du Nord de Madagascar (figure 1) a commencé au Jurassique supérieur (STOREY et al. 1995, 1997 ; ROESER et al. 1996 ; KRAUSE et al. 1997). Ce premier épisode de rifting océanique s'est concentré dans les bassins somalien et comorien engendrant la séparation du bloc malagasy de l'Afrique continental.

Ainsi, Madagascar-Inde suivent une trajectoire SSE le long de la ride de Davie jusqu'à ce qu'au Crétacé inférieur, Madagascar se trouve à environ 400km de la côte est du Mozambique.

Un deuxième grand évènement de rifting au Crétacé supérieur a conduit à la séparation de Madagascar et de l'Inde. Ainsi,

- Le sous-continent indien s'est rapidement déplacé vers le Nord-Est vers l'Eurasie (RANDRIANASOLO et al. 1981 ; STORETVEDT et al. 1992 ; STOREY et al. 1995, 1997) ;
- Madagascar appartenant à la plaque africaine poursuit son déplacement vers le Sud jusqu'à sa position actuelle.

Le rifting entre Madagascar et l'Afrique est à l'origine de trois grands dépocentres sédimentaires le long de la marge occidentale de Madagascar. Un dépocentre, c'est une zone de dépôt maximal ou encore l'emplacement géographique de la partie la plus épaisse d'une unité géographique donnée dans une zone de dépôt. Il s'agit donc des bassins de Morondava, de Mahajanga et d'Ambilobe.

- Au début de la phase de rifting, les sédiments terrestres du Permo-Trias se sont accumulés dans ces bassins ;
- Au Crétacé inférieur, le rifting a cessé et la côte Ouest de Madagascar a évolué en marge passive sujette à des transgressions et régressions marines cycliques jusqu'à la fin du Crétacé (LALAHARISAINA et FERRAND 1994).

A la fin du Crétacé, les bassins marginaux de Madagascar ont été en grande partie inondés par les eaux.

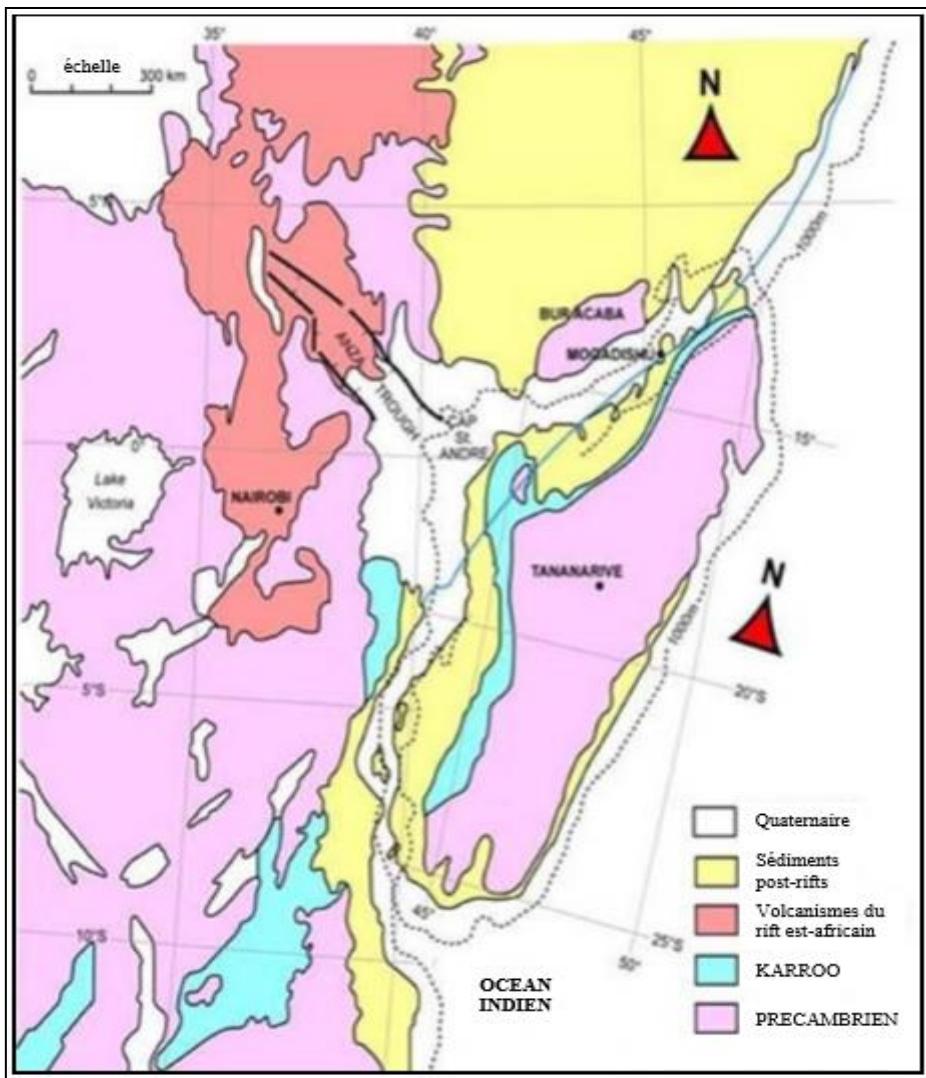


Figure 1: Bassins Est-africains et Malagasy (REEVES et al. 1988)

I-3. Bassin de Mahajanga

I-3-1. Cadre géographique

Situé sur la côte Nord- Ouest de la Grande île, le bassin de Mahajanga (figure 2) s'étend entre la presqu'île d'Ampasindava au Nord et l'anticlinal cristallin du Cap Saint André au Sud-Ouest. Il est constitué par une succession de formations monoclinales concaves vers la mer.

Des cuestas marquent la formation du Lias Supérieur, le Bajocien, les grès du Crétacé, les coulées basaltiques et du Turonien.

Le horst Sahondralava-Ihopy, qui était actif pendant le remplissage du bassin, délimite la borne entre deux sous-bassins : du Sud-Ouest le sous bassin de Mitsinjo et le Nord Loza-Mahavavy (BOAST et NAIRN, 1982).

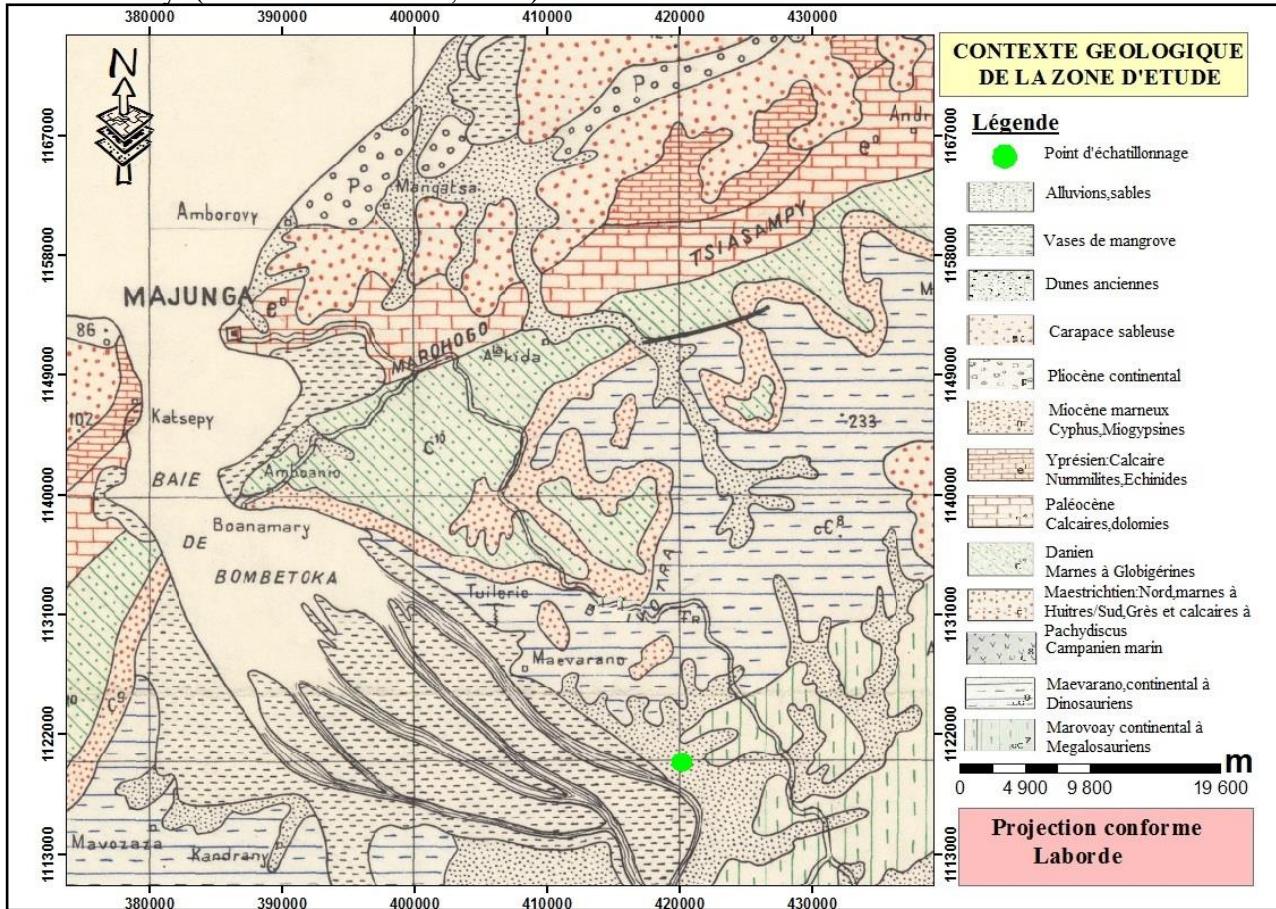


Figure 2: Délimitation et carte géologique du bassin de Mahajanga (BESAIRIE, 1996 modifié par l'auteur)

I-3-2. Cadre géologique

Le bassin est divisé en trois secteurs pour mieux comprendre l'évolution du bassin de Mahajanga dans le temps géologique. Le premier est au Nord du fleuve de Mahajamba, le second, entre les fleuves Mahajamba et Betsiboka et le troisième au Sud du fleuve de Betsiboka.

I-3-2-1. Les formations Karoo

Elles datent du Permien supérieur au Jurassique moyen dans le bassin. La Sakoa est absente. Il y a, ainsi, de bas en haut :

a- Le groupe de Sakamena

Le groupe de Sakamena est daté du Permien supérieur au Trias moyen. Contrairement à celui du bassin de Morondava, il n'affleure qu'à l'extrême Nord du bassin. Cependant, la géophysique et les forages ont mis en évidence sa présence en profondeur et sa position discordante par rapport à l'Isalo dans le reste du bassin.

Entre Maevarano et Anjingo en bordure du socle cristallin, le groupe de Sakamena a été découvert par VENDEGIES (1965), constitué à la base, de grès arkosiques avec des galets granitiques et intercalé avec des schistes argileux feuilletés. Des grès argileux fins, micacés sont observés avec des calcaires avec une épaisseur de 300m. En affleurement, près d'Ampasindava, la Sakamena est constituée de grès rouge plus ou moins grossiers ainsi que d'argiles.

Dans la région d'Ambondromamy, à partir des données géophysiques (méthode électrique), cette formation est essentiellement argileuse dont l'épaisseur est estimée à 2000m.

Au Sud du bassin, d'après les données du puits CSA-2 du Cap Saint André, elle est caractérisée par une série argilo-pélitique, schisteuse, compacte, à nombreux filons doléritiques.

b- Le groupe d'Isalo I, II et III

Allant du Trias moyen au Lias inférieur, le groupe d'Isalo est représenté par une bande étroite et est en discordance avec le socle et la Sakamena.

La série isalienne est composée de grès arkosiques à grains fins à grossiers, à stratification entrecroisée. Ces grès sont parfois conglomératiques, avec de l'argile rouge à verte.

Le grès de l'Isalo se repose sur une surface irrégulière. Son épaisseur est très variable, environ 100m à 500m en affleurement.

Dans la région d'Antsohihy, l'Isalo I se repose sur le socle cristallin. Epais de 45m, l'Isalo I est constitué de grès très grossiers, arkosiques, à stratifications entrecroisées, et plus ou moins conglomératiques. Ces grès sont associés à des argilites sableuses rouges. L'Isalo II, épais de 155m, est formé à la base de grès très grossiers à petits galets de quartz, avec quelques lentilles et lits d'argilites. Viennent, ensuite de grès toujours grossiers avec des bancs à stratifications entrecroisées. Ces derniers sont pauvres en argiles.

Au Sud de Port-Berger, l'Isalo II est constitué de grains grossiers à moyens d'arkoses, avec des grès entrecroisés contenant un développement d'argiles vertes et rouges.

Près de Mahatsinjo de coordonnées : X=1088843/Y=517894, l'Isalo I est défini par 5m de grès arkosiques, blancs, à grains grossiers présentant des stratifications entrecroisées, avec quelques graviers, et contenant quelques étages des schistes.

Entre Ambalajanakomby et Ambondromamy, l'Isalo I présente des grès arkosiques gris blancs, grossiers souvent conglomératiques. Cette série, épaisse de 60m, possède des stratifications entrecroisées avec deux niveaux d'argile ligniteux. Quant à l'Isalo II, il est formé à la base de grès arkosiques, blancs à roses, grossiers avec des passages conglomératiques. Des niveaux lenticulaires des grès fins à moyens, plus ou moins argileux et micacés sont observés. La partie intermédiaire présente une alternance de lentilles d'argiles, bariolées, finement gréseuses, micacées et de bancs de grès fins à grossiers à stratification entrecroisée. La partie sommitale est couverte de grès fins à grossiers arkosiques, et des bancs avec des niveaux argilo-gréseux. Ces grès ont des stratifications entrecroisées. Cette série de l'Isalo possède une épaisseur de 120m.

L'Isalo III est daté du Bajocien au Bathonien. Cette série est défini comme étant le sommet du système Karoo en se basant sur le lithofaciès argilo-gréseux et des calcaires avec des grandes formations marines latéralement.

Les faciès de l'Isalo III passent vers l'Ouest à des formations mixtes lagunaires puis à des formations marines. On note une variation latérale de faciès (région de Sakaraha). Au nord de la Tsiribihina, faciès marin constituant le plateau calcaire de Bemaraha.

Tsingy de Bemaraha: des roches calcaires formées par un dépôt de fossiles et de coquillages morts sous la mer il y a 200 millions d'années, et par la suite façonnées par l'eau des pluies (riche en acide faible H₂CO₃) il y a 5 millions d'années, les Tsingy offrent l'un des paysages les plus spectaculaires de la Grande Île

I-3-2-2. Les formations Post-Karreo

Elles correspondent à la fin de la sédimentation syntectonique, d'âge Jurassique supérieur à Actuel. Elles se différencient du groupe précédent par la transgression marine et ses faciès beaucoup plus diversifiés.

- Le *Jurassique supérieur* est marin, très fossilifère, caractérisé par des alternances de dépôts calcaires et marneux. Des niveaux marneux et à gypse ont été identifiés au Jurassique supérieur (Tsaramandroso, Betaramahamay);
- Le *Crétacé*, très fossilifère, est marqué par des épisodes marins et continentaux. Des niveaux de basaltes turoniens, interstratifiés dans la série sédimentaire (S : 16° 50'

324'' ; E : 046° 58' 396'') marque la limite Crétacé inférieur et moyen. Le Crétacé supérieur est continental sauf le Maastrichtien.

- Le *Tertiaire* est marin avec quelques intercalations continentales telles au niveau du Paléocène moyen et de l'Oligocène. Le Miocène est continental et est suivi des deux transgressions marines du quaternaire.

I-3-2-3. Le Crétacé Supérieur de la région de Berivotra

Notre étude est basée sur la période du Crétacé supérieur auquel appartient la Formation de Maevarano et axée sur le Membre Miadana de la région de Berivotra.

La Formation de Maevarano, à faciès continental et datée du Campanien, est subdivisée, de bas en haut, en trois Membres (OBATA et KANYE, 1977) (Figure 3) :

- Membre Miadana,
- Membre Anembalemba et
- Membre Masorobe.

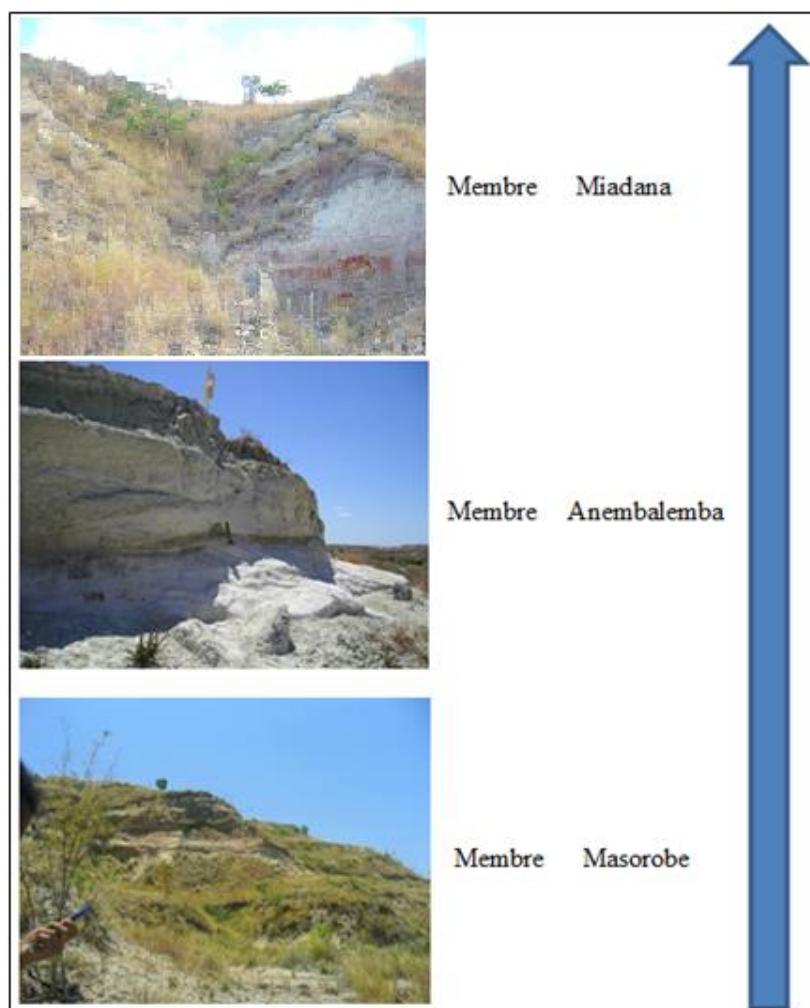


Figure 3: La Formation de Maevarano (Campanien)

a) Le Membre Masorobe

Le secteur de Masorobe se situe aux alentours de Berivotra. La coupe type affleure au Sud de Masorobe avec une épaisseur de 80m, et considérée comme la base de la Formation de Maevarano. Il est constitué de grès grossiers, occasionnellement intercalés par des grès fins, des grès silteux et des argiles indurées.

Les paléosols y sont bien développés. Les vertébrés fossiles sont rares, ceci est dû à de mauvaises conditions de préservation. Les fossiles d'invertébrés sont absents. Le contact basal avec la partie sous-jacente est difficile à déterminer tandis que le contact avec la partie supérieure est caractérisé par une discordance. Cette discordance est mise en évidence par la présence des racines bigarrées constituées par des grès fins à grossiers de couleur rouge dans les couches inférieures et des grès grossiers de couleur vert olive dans la partie sus-jacente.

b) Le Membre Anembalemba

La région d'Anembalemba se localise à l'Est du village de Berivotra. La section type affleure le long de la partie Ouest de la route nationale RN4.

Dans la localité type, le Membre Anembalemba a une épaisseur de 12m, celle-ci de 10 à 15m dans la région de Berivotra. Le contact avec la partie sous-jacente est irrégulier du fait de l'érosion (ROGERS et al., 1997), tandis que la partie supérieure est continue et en discordance avec la Formation de Berivotra (Maastrichtien).

Le Membre Anembalemba est caractérisé par deux faciès bien distincts : faciès 1 et faciès 2 (ROGERS et al., 1997) qui sont, de bas en haut (Figure 4):

- le Faciès 1, constitué par des grès fins à grossiers de couleurs blanches et à stratifications obliques. Les composants sont pauvres en grès argileux.
- le 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 varie d'un affleurement à un autre.

Les vertébrés fossiles sont très abondants dans le Membre Anembalemba tels que (KRAUSE et al, 1994, 1995, 1998, 2000) : les Serpents (*Madtsoia madagascariensis*, *Madtsoia cf M. laurasiae*), les Crocodiles (*Trematochamps obliqua*, *Araripesuchus sp.*, *Mahajangasuchus insignis*), les Dinosaures (*Majungatholus atopus*, *Masiakasaurus sp.*, *Rapetosaurus sp.*), Les 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. Dans le faciès 1, a été récolté un nombre non négligeable de dents et d'ossements de Reptiles.

Le Membre Anembalemba renferme une quantité importante de fossiles de vertébrés, de rares Invertébrés fossiles : Lamellibranches et Gastéropodes (KRAUSE & HARTMAN, 1996).

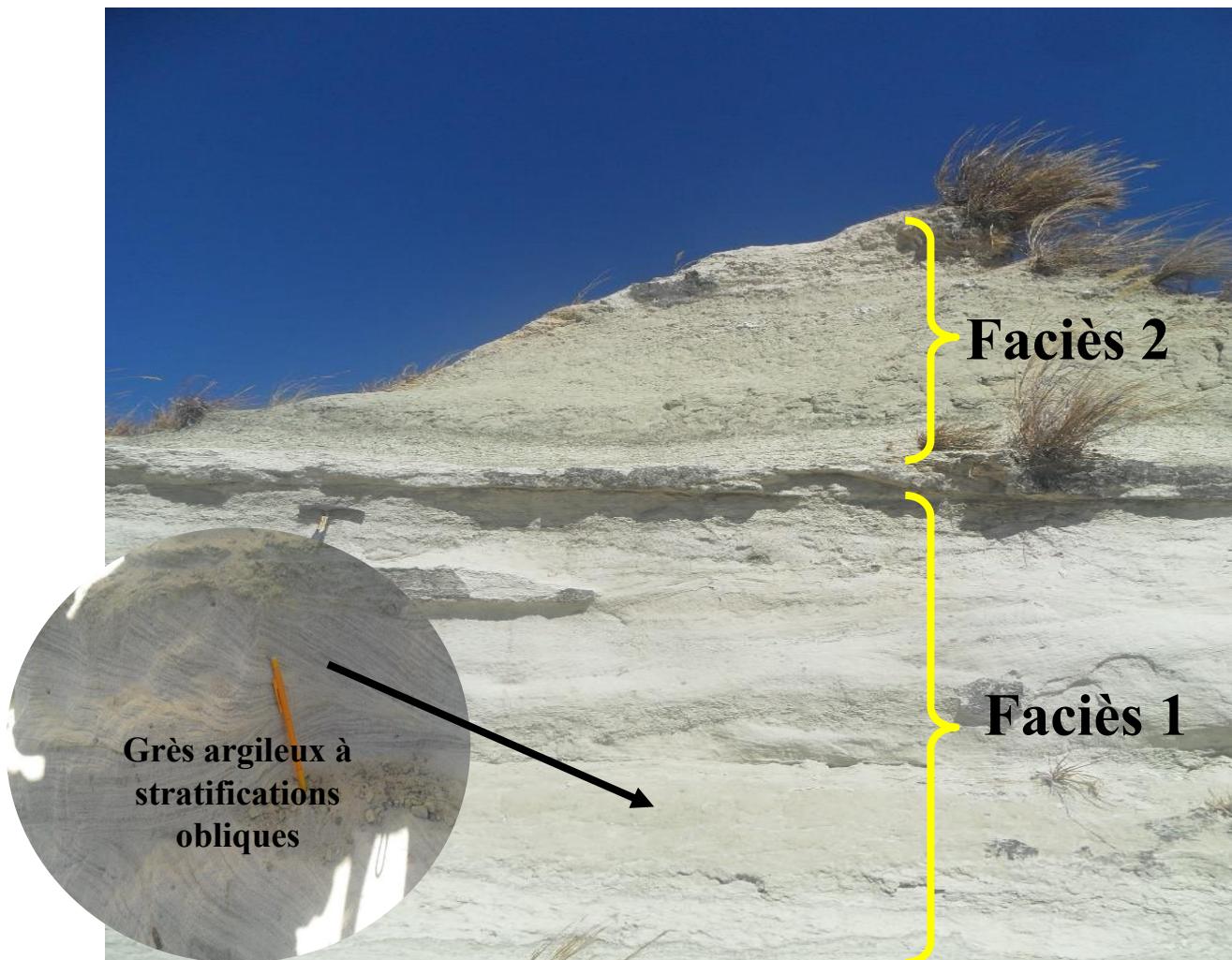


Figure 4: Un affleurement du Membre Anembalemba

c) Le Membre Miadana

Le Membre Miadana se trouve à 4km au Sud -Est du village de Berivotra (sur la route nationale RN4, PK 508.4) sur des collines isolées d'une épaisseur de 29m. Il est représenté par des grès hétérogènes, fins à grossiers, de couleur blanche et gris vert dont la base est de couleur rouge. Les couches argileuses 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.

Des données stratigraphiques indiquent que le Membre Miadana est isolé de la région de Berivotra. Contrairement aux Membres Anembalemba et Masorobe sous-jacentes, le Membre est caractéristique au secteur de Miadana, il est absent dans les autres régions (Berivotra, Katsepy, Mitsinjo), et pauvre en fossiles, même si certains sont importants (par exemple, *Rasmussen simons* et BUCKLEY, 2009). Dans la zone d'étude de Berivotra, les Membres Anembalemba et Miadana sont fortement recouverts par des dépôts marneux de couleur jaune (ROGERS et al., 2000).

Le contact entre le Membre Miadana et la Formation de Berivotra est bien évident parce qu'au-dessus de ce membre, on note la présence d'une mince couche (5m environ) de dépôts marneux renfermant des dents de Requins et des Invertébrés.

Partie II :

MATERIELS ET

METHODES

II-1. Zone d'étude

Le secteur de Miadana (figure 5) se trouve à 4km au Sud Est des villages d'Ambovondramanesy de Berivotra (sur la route nationale N°4, PK 508.4) sur des collines isolées.



Figure 5: Localisation de la zone d'étude (source : google earth)

II-2. Matériels

II-2-1. Matériels utilisés sur terrain

- Revue de la Littérature : « études bibliographiques et webographiques»
- Outils utilisés :
 - ✓ carte géologique,
 - ✓ GPS (Global Positioning System) pour prendre des coordonnées,
 - ✓ sacs à échantillons, marteau de géologue pour récolter les échantillons,
 - ✓ stylo et carnet de note pour marquer les sacs d'échantillons et prendre des notes.

II-2-2. Matériels utilisés au laboratoire

- Séries de tamis (figure 6) de tailles décroissantes : 256 μm à 4 μm dans le but de réaliser un classement des produits en fonction de la taille des particules.

- Un mortier pour écraser les sédiments sans écraser les grains.
- Une balance électrique Mettler.
- Sachets pour chaque fraction.
- Une machine à secousses de type AFNOR.
- Une loupe binoculaire

		
Machine à secousses de type AFNOR	Série de tamis	La balance électrique de précision

Figure 6: Matériels utilisés au laboratoire

II-2-3. Outils utilisés pour les analyses de données

- Logiciel GRADISTAT4.0 pour l'analyse granulométrique,
- Logiciel XLSTAT pour l'analyse statistique multidimensionnel

II-2-4. Cadre climatique

Dans le bassin de Mahajanga, la saison sèche commence au mois de Mai et se termine au mois d'Octobre, pendant laquelle les pluies sont rares. La température moyenne est de 26°C à 27°C. La pluviosité annuelle varie entre 1500mm et 1700mm. La végétation est homogène, et principalement formée d'arbustes et de végétations herbacées.

II-2-5. Cadre géomorphologique

L'hydrographie dans ce bassin (figure 7) est très importante; la zone littorale (Crétacé supérieur à Miocène) est découpée par de nombreuses baies dont les plus importantes sont celles de Soalala, de Bombetoka, de Mahajamba et de Narinda.

Ces baies constituent respectivement les estuaires des grands fleuves comme le Mahavavy, le Bestiboka, le Mahajamba et le Sofia (RAFARA, 1987).

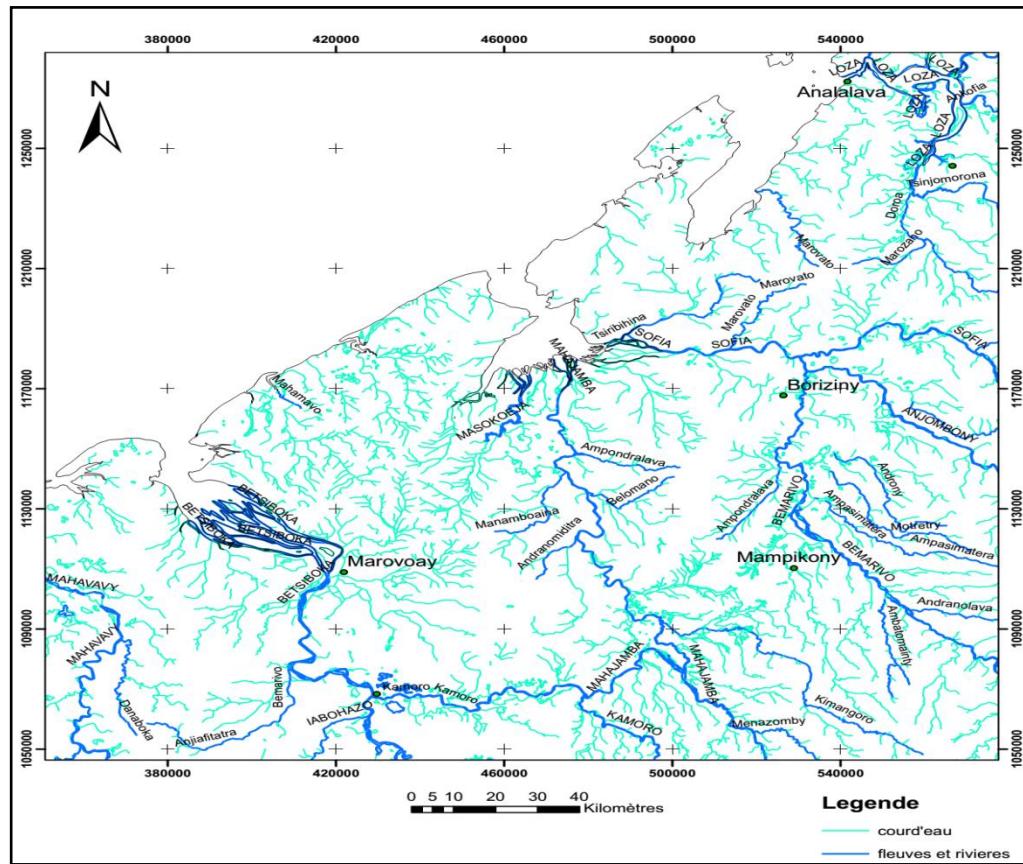


Figure 7: Réseaux hydrographiques du bassin de Mahajanga (BD 500 modifié par l'auteur)

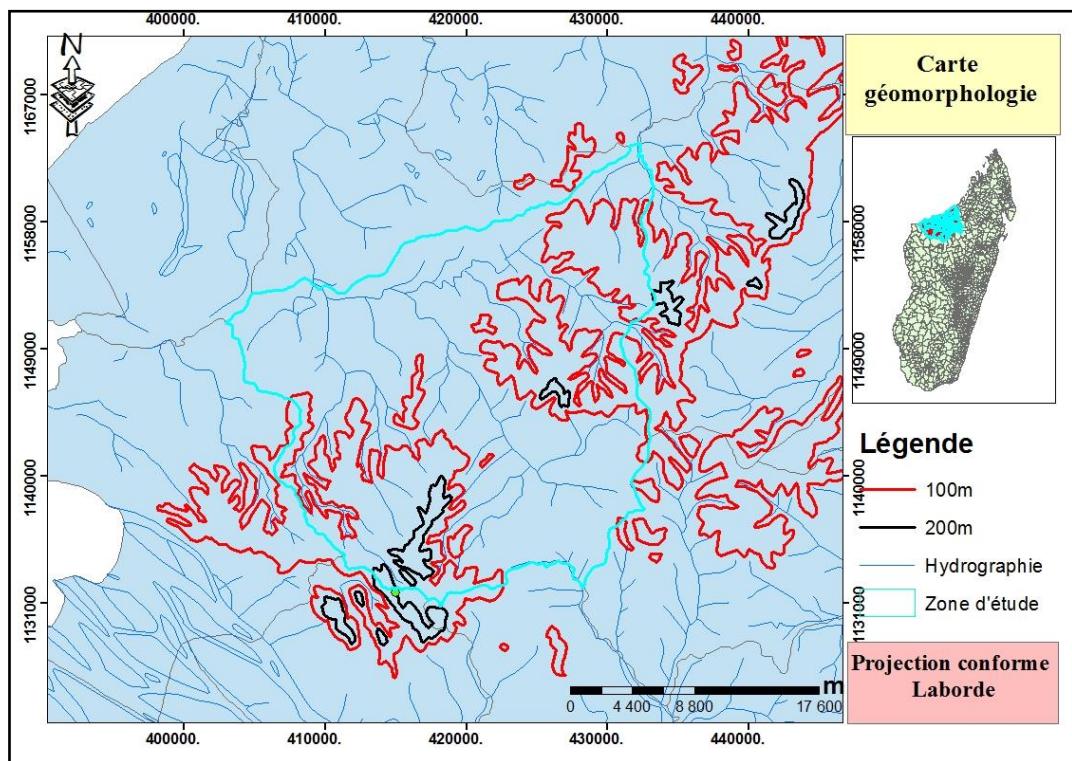


Figure 8: Carte géomorphologie de la zone d'étude (BD 500 modifié par l'auteur)

La zone de haute altitude est favorable au point d'échantillonnage vue la difficulté du passage des réseaux hydrographiques (Figure 8).

II-3. Méthodes

Cette partie concerne sur la reconnaissance de la zone d'étude et surtout les collectes des échantillons. Pendant cet échantillonnage, des observations du milieu sont prises en note pour cadrer les interprétations et pour vérifier aussi les erreurs données par les analyses faites sur laboratoire.

II-3-1. Démarche adoptée

La figure 9 représente la démarche suivie pendant la réalisation de ce mémoire.

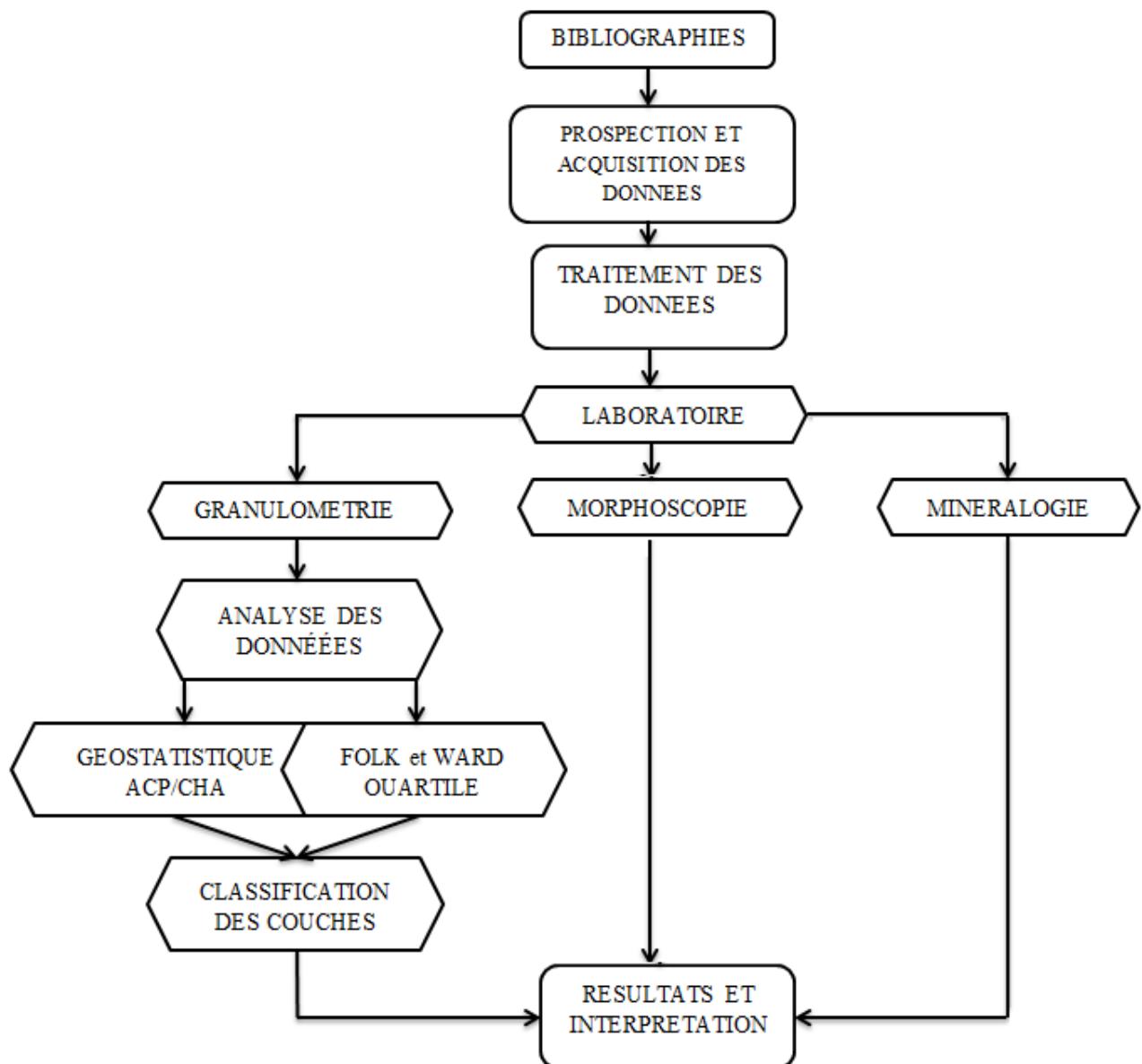


Figure 9: Organigramme de la méthodologie adoptée

II-3-2. Prospection et acquisition des données

La collecte des échantillons se fait en coupe verticale suivant la succession de couche de base vers le top. Et nous avons collecté 16 échantillons suivant cette succession et le changement de couleur de chaque couche est la limite.

Des études lithostratigraphiques sont faites pendant la descente sur terrain : épaisseur, couleur, nature et type des grains de chaque couche sans oublié la structure correspondante.

II-3-3. Traitements de données

II-3-3-1. Traitement sur terrain

Cette étape est importante et s'avère très nécessaire. Pendant notre descente sur terrain, nous avons effectué une coupe lithologique. Les échantillons ont été prélevés niveau par niveau en allant de la base vers le top.

Pour chaque échantillon, nous avons pris environ 500g et mis dans des sacs à échantillon bien identifiés avec leur coordonnée respective pour éviter le risque de confusion.

Une première observation globale a l'œil nu a été effectuée directement sur l'affleurement et sur les échantillons et nous avons obtenus les informations suivants : épaisseur, couleur, nature et type des grains ainsi que les coordonnées géographiques prises par GPS. Seize (16) échantillons de sédiments ont été prélevés.

Au cours de notre travail sur terrain, nous avons réalisé une coupe avec les coordonnées géographiques suivantes :

Base : X=0423080 Top : X=0423067

Y=1128405 Y=1128350

Alt=59m Alt=88m

II-3-3-2. Traitement au laboratoire

Les échantillons de sédiments sont traités et analysés au laboratoire afin d'obtenir le maximum d'informations sur le site.

a- Etudes morphoscopiques

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

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

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

L'examen des grains de quartz sous la loupe binoculaire (de grossissement 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 (figure 10) sont l'enregistrement de l'histoire du transport des sédiments.

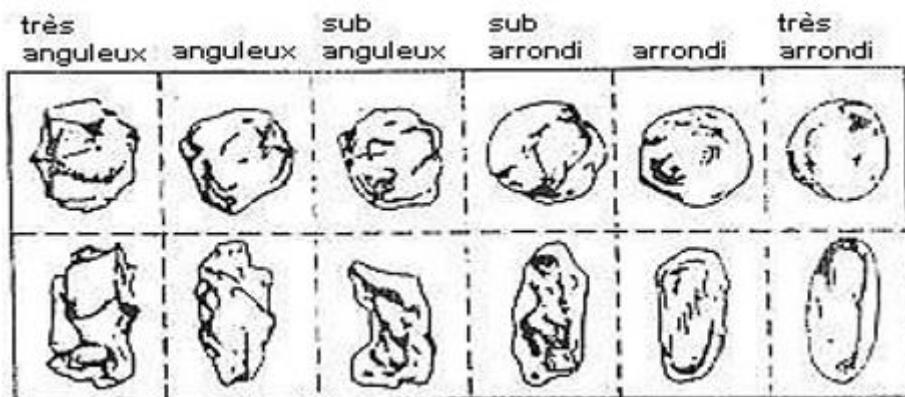


Figure 10: Charte visuelle permettant l'estimation de la sphéricité et de l'émoussé des graviers et des sables. (POWERS, 1953)

Ce classement tient compte de deux critères :

- la forme des grains
- leur aspect de surface

Les quatre catégories principales de grains sont:

- 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 » (NU)***

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.

- ***Les grains « Emoussés-Luisants » (EL)***

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.).

- ***Les grains « Ronds-Mats propres » (RM)***

Les « RM », comme leur nom l'indique, ont une morphologie générale subsphérique 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 » (RMS)***

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 quartzé.

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.

b- Etudes granulométriques de «FOLK et WARD»

Selon les formules de FOLK & WARD (1957), l'analyse granulométrique des sédiments permet de caractériser les différentes unités morphologiques et de suivre leurs évolutions spatiotemporelles.

L'analyse granulométrique a été faite à partir de 100g de sédiment sec pour les particules de dimensions supérieures à 4micromètres.

Pour chaque échantillon nous avons utilisé une colonne de tamis (>256 , 256 , 128 , 64 , 16 , 4 et $<4\mu\text{m}$) de la série AFNOR.

Chaque échantillon a fait l'objet de 30 minutes de vibration sur la machine à secousse sur laquelle est placée la série de tamis. Le choix des tamis permet de d'obtenir directement la partition de la fraction sableuse selon les fractions théoriques de WEYDERT (1971), c'est à dire, respectivement, en sables très fins, sables fins, sables moyens, sables grossiers, graviers et débris grossiers. Une fois le tamisage mécanique achevé, la pesée de chacun des refus permet de calculer le pourcentage pondéral de chaque fraction.

Les courbes de tamisage sont réalisées en cumulant les quantités de produits extraits des différents tamis. Les quantités étant exprimées en pourcent de la masse de produits mise en œuvre.

Les résultats d'analyse se présentent graphiquement sous la forme d'une courbe de fréquence simple et cumulé.

c- Caractérisation des sédiments

D'après INTES et ARNAUDIN (1987), la caractérisation des sédiments se fait suivant les critères dimensionnels et les indices suivants :

☞ Taille moyenne (FOLK & WARD, 1957 ; WEYDERT, 1971)

Les deux indices suivants traduisent le degré d'hétérogénéité du sédiment :

- l'étalement dimensionnel (RIVIERE, 1952) tient compte des dimensions de la particule la plus grande et la plus petite. L'indice est d'autant plus grand que le sédiment est composé de particules de tailles très différentes.
- le granoclassement (figure 11), traduit l'évolution dans l'espace de la granulométrie ; il rend compte des conditions énergétiques au cours du temps. Il peut être :
 - a) normal : décélération du courant au cours du temps ;
 - b) inverse : accélération du courant au cours du temps.

Il existe quatre (4) degrés de granoclassement : bon, moyen, fruste et absent.



Figure 11: Exemple de granoclassement normal dans des dépôts fluviatiles

Le classement ajoute une notion de tri sélectif des particules, dont les formes et tailles sont liées à l'hydrodynamisme (Figure 12).

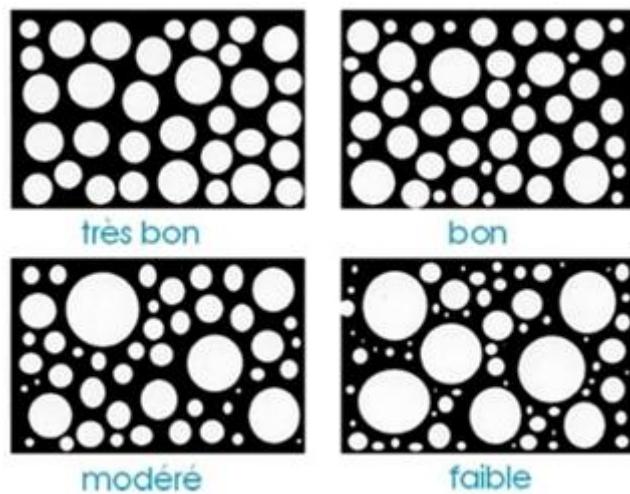


Figure 12: Classement des particules (KRUMBEIN, 1936)

- ☞ La normalité (FOLK & WARD, 1957) des distributions (Kurtosis) : est un indice de classement. Plus les valeurs sont fortes, plus l'histogramme de fréquences est étroit, mieux les valeurs sont classées.
- ☞ Le tri (FOLK & WARD, 1957) : est également un indice de classement, qui permet d'apprécier le rôle de la fraction grossière ou de la fraction fine.
- ☞ La symétrie (SKEWNESS; FOLK & WARD, 1957) : est positive s'il y a prépondérance des éléments grossiers, négative dans le cas contraire.

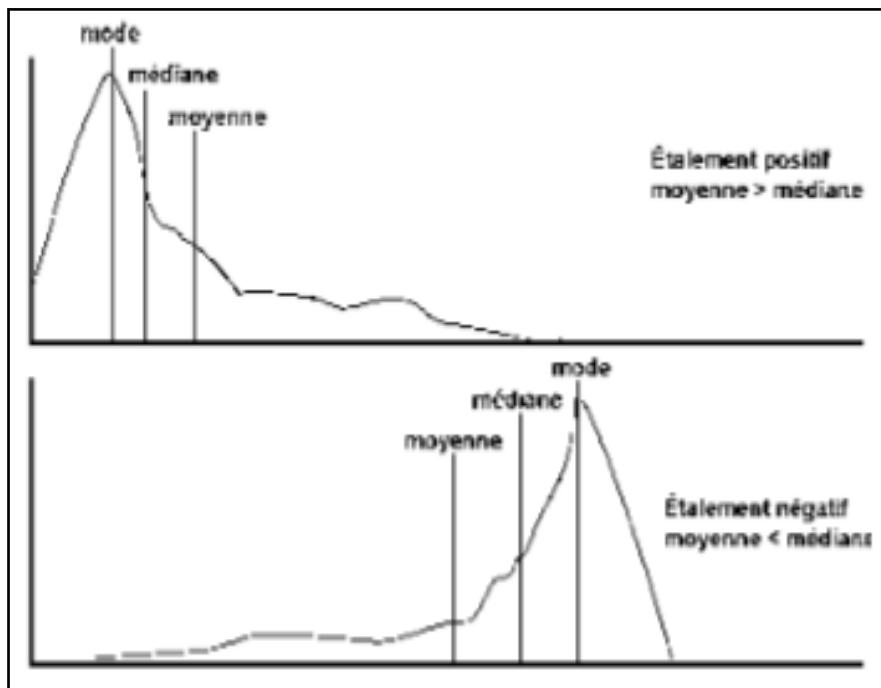


Figure 13: Exemple d'étalement positif et négatif (SWEKNESS)

☞ Facteur hydrodynamique (WEYDERT, 1973)

Il caractérise l'aptitude au transport du sédiment considéré. Les valeurs positives concernent les sédiments en cours de transport par ce facteur, les valeurs négatives affectent les sédiments peu mobiles, stables.

d- Calcul des paramètres granulométriques

Il existe un grand nombre de paramètres permettant l'évaluation du degré de classement d'un sédiment (INTES et ANAUDIN, 1987). Les résultats granulométriques sont représentés sous formes graphiques suivant les formules de calculs de FOLK et WARD (1957). Les différents indices retenus sont ceux les plus utilisés actuellement.

L'analyse des paramètres granulométriques fournit des informations importantes sur la provenance, l'historique du déplacement et les conditions de dépôt des particules sédimentaires. Les trois paramètres granulométriques usuels utilisés en sédimentologie sont :

- la taille moyenne des sédiments (μ),
- l'indice de tri (σ),
- l'indice de symétrie de la distribution (Sk).

Ces paramètres granulométriques sont calculés à partir des distributions en classe de taille des sédiments. Les formules de calcul de ces paramètres peuvent être regroupées en deux méthodes :

- ✓ la méthode graphique qui utilise certains percentiles extraits de la distribution en fréquence cumulée de l'échantillon sédimentaire (FOLK & WARD, 1957),
- ✓ la méthode statistique, considérée comme plus précise, qui intègre la totalité de la population de l'échantillon sédimentaire.
- La moyenne Mz

La moyenne Mz d'une distribution (tableau 1) est la moyenne logarithmique ou arithmétique (suivant la nature de l'échelle des abscisses) des valeurs de la variable indépendante. Ce paramètre nous renseigne sur la dimension moyenne des grains dans les sédiments et par conséquent sur l'énergie du milieu et la distance du transport. Il est défini par la formule suivante :

$$M_z = \frac{\phi_{16} + \phi_{50} + \phi_{84}}{3}$$

Tableau 1: Classifications des faciès sédimentaires en fonction de la Moyenne selon la méthode WARD ET FOLK (1957)

Valeurs de Mz (Phi)	Degré de classement
-1 < Mz < 0	Sable très grossier
0 < Mz < 1	Sable grossier
1 < Mz < 2	Sable moyen
2 < Mz < 3	Sable fin
3 < Mz < 4	Sable très fin
4 < Mz < 5	Silt très grossier
5 < Mz < 6	Silt grossier
6 < Mz < 7	Silt moyen
7 < Mz < 8	Silt fin
8 < Mz < 9	Silt très fin
9 < Mz	Argiles

- Standard deviation (Sorting index, So)

La dispersion des valeurs de la distribution autour de la tendance centrale traduit le bon ou le mauvais classement du sédiment : elle exprime la constance ou l'irrégularité du niveau énergétique de l'agent de transport. Cet indice de classement est déterminé par la formule suivante

$$S_k = \frac{\phi_{84} - \phi_{16}}{4} + \frac{\phi_{95} - \phi_5}{6.6}$$

L'indice de classement (tableau 2) permet d'apprécier le degré de classement d'un sédiment. Il est d'autant plus élevé que le classement est mauvais (Tableau 2) :

Tableau 2: Classification des faciès sédimentaires en fonction du Sorting index selon la méthode Ward et Folk (1957)

Valeur d'indice So	Degré de classement
So<0.35	Très bien classé
0.35<So<0.5	Bien classé
0.5<So<0.7	Moyennement bien classé
0.7<So<1	Modérément classé
1<So<2	Mal classé
2<So<4	Très mal classé
4<So	Extrêmement mal classé

- Le coefficient de dissymétrie (Skewness, Sk)

Pour les échantillons dont l'histogramme de fréquences relatives est unimodal, un autre indice peut être calculé. Il s'agit de l'indice (ou coefficient) d'asymétrie Skewness. Il exprime la symétrie du mode de l'histogramme par rapport à la médiane. Ce paramètre est défini par la formule suivante :

$$S_k = \frac{\phi_{16} + \phi_{84} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})} + \frac{\phi_5 + \phi_{95} - 2\phi_{50}}{2(\phi_{84} - \phi_{16})}$$

Les valeurs négatives montrent que l'étalement de l'histogramme se fait du côté de la fraction fines, autrement dit le bon classement du côté des grossiers mais mauvais du côté des fins et vice versa (tableau 3).

Tableau 3: Classification des faciès sédimentaires en fonction du Skewness selon la méthode Ward et Folk (1957)

Valeur de l'indice Sk	Degré de classement
-1<So<-0.3	Très asymétriques vers les fins
-0.3<So<-0.1	Asymétriques vers les fins
-0.1<So<0.1	Symétriques
0.1<So<0.3	Asymétriques vers les grossiers
0.3<So<1	Très asymétriques vers les grossiers

- Angulosité (Kurtosis) K_G

L'angulosité ou le Kurtosis défini ci-dessous mesure le degré d'aplatissement relatif d'une distribution. Les faibles valeurs du kurtosis montrent que la distribution est relativement aplatie, tandis que les valeurs élevées indiquent que la distribution est relativement pointue.

En 1957, Folk et Ward ont défini la normalité des distributions ou le Kurtosis comme étant un indice de classement. Plus les valeurs sont fortes, plus l'histogramme de fréquences est étroit, mieux les valeurs sont classées.

$$K_G = \frac{\phi_{95} - \phi_5}{2.44(\phi_{75} - \phi_{25})}$$

- Le coefficient d'uniformité

Le coefficient d'uniformité U est défini par la relation suivante:

$$U = d_{60} / d_{10}$$

Avec, d_{60} : taille des grains (mm) correspondant à 60% du poids cumulé et d_{10} : taille des grains (mm) correspondant à 10% du poids cumulé.

Il permet de qualifier la granulométrie des sables :

- $U < 2$: granulométrie uniforme
- $U > 2$: granulométrie variée

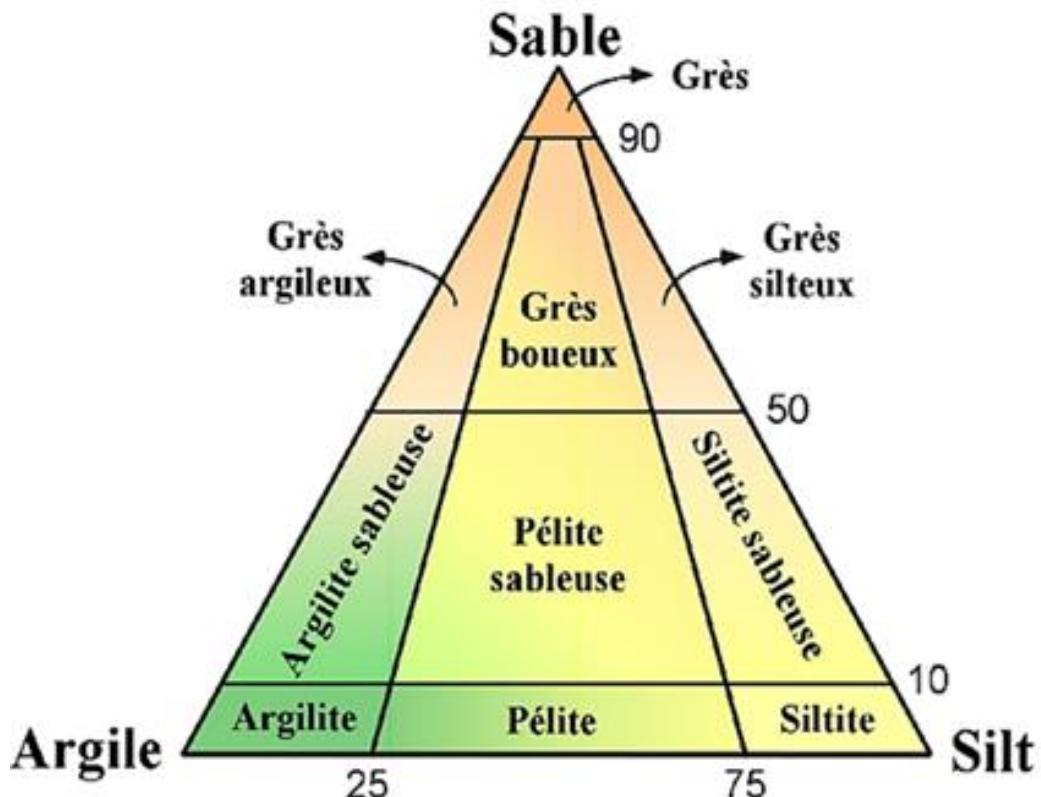


Figure 14: Classement des formations détritiques (FOLK ,1957)

Tableau 4: Classification des roches détritiques (FOLK ,1957)

Taille mm	Classe granulométrique	Particule	Sédiment	Roche sédimentaire
256	RUDITE	Blocs	Amas de blocs	Conglomérats
10		Galets, Cailleux	Cailloutis	
4		Graviers	Grave	Microconglomérats
2		Granules		
1	ARENITE	Grains de sable	Sable	Grès
0,5		Très grossier		
0.250		Grossier		
0.125		Moyen		
0,0625		Fin		
0.031	LUTITE	Poussières	Grossier	Siltite
0.0156				Coupe hydrodynamique
0.0039				Pélite
		Particules ultra-fines	Argile	Argilite

e- La méthode des quartiles

Cette méthode, empruntée aux statisticiens, a été appliquée aux sables par TRASK (1930).

La médiane est, en granulométrie, la taille du grain telle qu'il y ait le même poids de grains plus gros que de grains plus petits. Cette valeur peut facilement être déterminée graphiquement sur une courbe cumulative de fréquence des poids : c'est l'abscisse du point de la courbe d'ordonnée 50 %. On détermine de même les premier et troisième quartiles : Q_1 et Q_3 , qui correspondent aux abscisses des points de la courbe cumulative d'ordonnée 25 et 75 %.

Ainsi, les quartiles sont trois points de la courbe définis comme suit :

- Le premier quartile Q_1 est le point de la courbe pour lequel 75 % du matériel est d'une taille supérieure à celle de la taille considérée et 25 % d'une taille inférieure.
- Le deuxième quartile Q_2 est la taille pour laquelle il y a 50 % de matériel de taille supérieure, 50 % en dessous.
- Le troisième quartile Q_3 correspond à la taille pour laquelle 25 % du matériel est d'une taille supérieure et 75 % en dessous.

A partir des courbes cumulatives, on peut visualiser les résultats des quartiles et calculer les différents coefficients (VATAN, 1959) qui suivent :

- Le coefficient de classement de Trask C

$$C = \sqrt{\frac{Q_{75}}{Q_{25}}}$$

C donne une appréciation du degré de classement du sédiment.

- Si $C < 2,5$: le sable est très bien classé
 - Si $C > 4,5$: l'échantillon est mal classé,
 - Si $C = 3$: l'échantillon est normal.
- Le coefficient d'asymétrie A

$$A = \frac{Q_{75} * Q_{25}}{Q_{50}^2}$$

A exprime la symétrie par rapport à la médiane :

- Si $A = 1$: le mode coïncide avec la médiane, la courbe est de type logarithmique, on a donc un dépôt par excès de charge due à la diminution de la compétence de l'agent de transport.
- Si $A > 1$ (asymétrie positive) : le classement est maximal du côté fin ; la courbe est de type hyperbolique, correspondant à des dépôts en milieu calme.
- Si $A < 1$ (asymétrie négative) : le classement est maximal du côté grossier, la courbe est de type parabolique, cela correspond à des dépôts en milieu agité.

II-3-3-3. Analyses statistiques

a) Analyse en Composante Principale

L'Analyse en Composante Principale ou « méthode factorielle » fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles qui a comme objectif d'explorer les liaisons entre les variables et les ressemblances entre les individus, elle servira ainsi à mieux connaître les données sur lesquelles on travaille et parfois à détecter des valeurs suspectes éventuelles.

Leur principe consiste à chercher un sous-espace de dimension petit dont on va projeter les n individus car c'est difficile de mettre en évidences les relations globales existant entre les variables dès que la dimension est supérieur à 3. Autrement dit, on cherche à définir k nouvelles variables combinaisons linéaires des p variables initiales qui feront perdre le moins d'information possible. Mathématiquement, l'analyse en composantes principales est un simple changement de base : passer d'une représentation dans la base canonique des variables initiales à une représentation dans la base des facteurs définis par les vecteurs propres de la matrice de corrélation.

➤ *Représentation des variables*

Il est alors intéressant de voir comment les anciennes variables sont liées aux nouvelles et pour cela on calcule les corrélations des anciennes variables avec les nouvelles.

La représentation des anciennes variables se fera en prenant comme coordonnées des anciennes variables leurs coefficients de corrélation avec les nouvelles variables. On obtient alors ce que l'on appelle communément le “ cercle des corrélations” (figure 15), dénomination qui vient du fait qu'un coefficient de corrélation variant entre -1 et +1, les représentations des variables de départ sont des points qui se trouvent à l'intérieur d'un cercle de rayon 1 si on fait la représentation sur un plan.

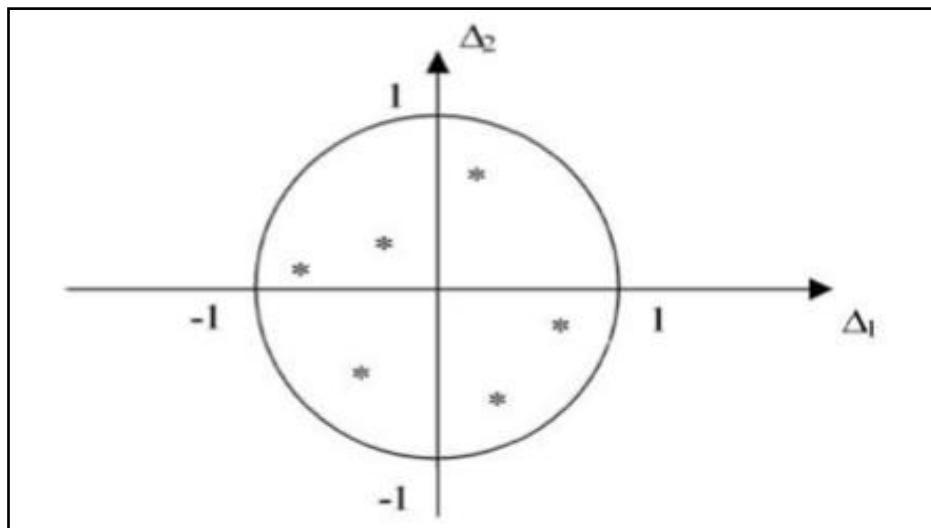


Figure 15: Représentation des variables sur dans un plan factoriel

Comment interpréter ce cercle de corrélations ?

Premièrement, la variable sera bien représentée sur un plan si elle est proche du bord du cercle des corrélations. Ainsi, deux points très proches du cercle des corrélations, donc bien représentées dans le plan, seront très corrélés positivement entre elles. Si elles sont proches du cercle, mais dans des positions symétriques par rapport à l'origine, elles seront très corrélées négativement. Cependant, deux variables proches du cercle des corrélations et dont les vecteurs qui les joignent à l'origine forment un angle droit, ne seront pas corrélées entre elles.

➤ *Représentation des individus dans les nouveaux axes*

Pour faire la représentation des individus dans les plans définis par les nouveaux axes, il suffit de calculer les coordonnées des individus dans les nouveaux axes (figure 16). Et d'où le graphe ci- après :

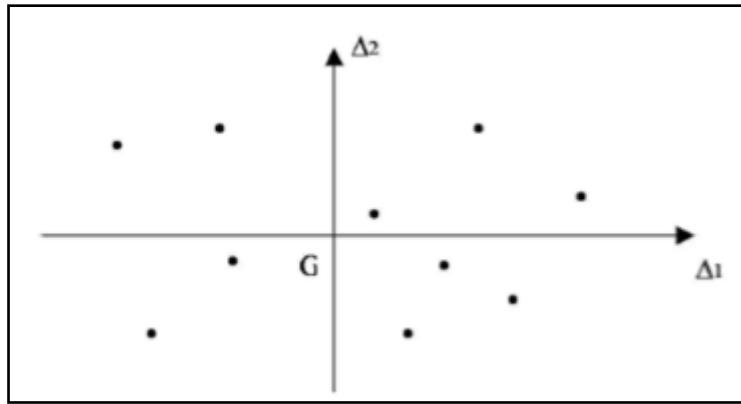


Figure 16: Représentation des individus sur un plan factoriel

Comment interpréter cette représentation ?

Lorsque des points projections des individus sont éloignés sur un axe (ou sur un plan), on peut assurer que les points représentants ces individus sont éloignés dans l'espace.

En revanche, deux individus dont les projections sont proches sur un axe (ou sur un plan) peuvent ne pas être proches dans l'espace.

Pour interpréter correctement la proximité des projections de deux individus sur un plan, il faut donc s'assurer que ces individus sont bien représentés dans le plan. Pour que l'individu u_i soit bien représenté sur un axe (ou sur un plan, ou un sous-espace), il faut que l'angle entre le vecteur Gu_i et l'axe (ou le plan, ou le sous-espace) soit petit.

b) Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

La classification ascendante hiérarchique (CHA) est une méthode de classification itérative dont le principe est simple :

- calculer la dissimilarité entre les N objets,
- regrouper les deux objets dont le regroupement minimise un critère d'agrégation donné, créant ainsi une classe comprenant ces deux objets.
- calculer ensuite la dissimilarité entre cette classe et les $N-2$ autres objets en utilisant le critère d'agrégation.
- regrouper les deux objets ou classes d'objets dont le regroupement minimise le critère d'agrégation.
- continuer ainsi jusqu'à ce que tous les objets soient regroupés.

Ces regroupements successifs produisent un arbre binaire de classification appelé « dendrogramme » (figure 17), dont la racine correspond à la classe regroupant l'ensemble des individus. Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions.

- choisir une partition en délimitant l'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur, soit de critères plus objectifs. Le schéma ci-après illustre ce procédé.

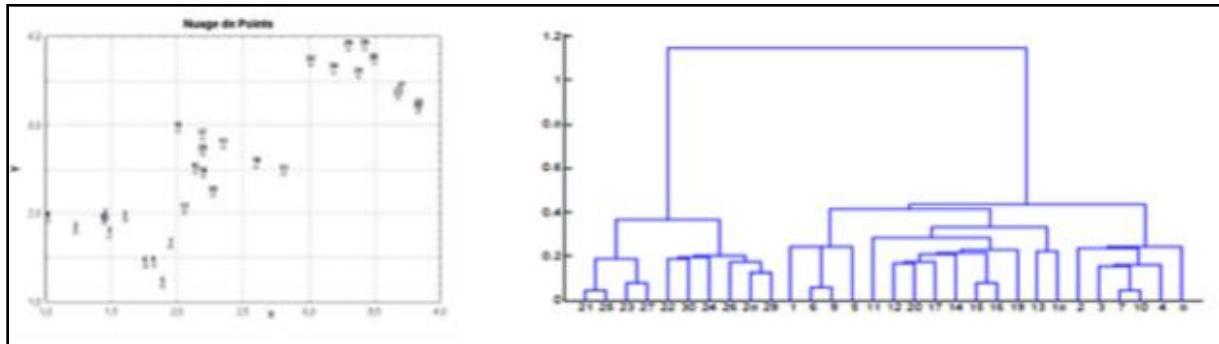


Figure 17: Représentation graphique du principe de la CHA

En effet, à partir de l'extrait de valeurs générales par le tableau, par un autre tableau contenant des données prises aux hasards à chaque échantillon.

➤ Distances (ou dissimilarité) entre individus d'une même population

Pour regrouper les individus qui se ressemblent (et bien séparer ceux qui ne se ressemblent pas), il faut choisir un “critère de ressemblance”. Pour cela, il faut :

- examiner l'ensemble des informations dont on dispose concernant les individus notées (x_i, y_i, \dots) pour le $i^{\text{ème}}$ individu,
- imaginer que chaque individu est un point $M_i = (x_i, y_i, z_i, \dots)$ de l'espace.

S'il n'y a que deux variables relevées (x_i, y_i) , un nuage Γ de points est ainsi formé dans le plan, chaque point M_i ayant pour coordonnées (x_i, y_i) . Ce nuage $\Gamma = \{M_i, i = 1, \dots, n\}$ contient n points, si n est l'effectif total de la population. La distance euclidienne de deux individus M_i et M_j est par définition :

$$d_2(M_i, M_j) = \sqrt{(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2}$$

Elle est d'autant plus petite que les deux individus sont semblables (du point de vue des valeurs des deux critères retenus) et d'autant plus grande qu'ils sont différents. Dans ce cas, il faut associer à chaque nuage d'individus une matrice dite matrice des distances.

$$D = (d_{ij})_{0 \leq i \leq n, 0 \leq j \leq n} = d_2(M_i, M_j)$$

C'est une matrice à n lignes et n colonnes, à coefficients positifs, symétrique (puisque $d_2(M_i, M_j) = d_2(M_j, M_i)$) et nulle sur la diagonale (puisque $d_2(M_i, M_i) = 0$). Pour un nuage d'effectif n , il y a donc $n(n-1)/2$ distances à calculer.

A côté de la distance euclidienne, on peut définir d'autres distances (et donc d'autres matrices des distances) ou encore des dissimilarités ou des écarts. Par exemple :

$$d_1(M_i, M_j) = |x_i - x_j| + |y_i - y_j|$$

$$d_\infty(M_i, M_j) = \text{Max}\{|x_i - x_j| + |y_i - y_j|\}$$

➤ Ecart entre classes

Considérons une matrice de "distances" entre les points du nuage, par exemple le carré de leur distance euclidienne, s'il s'agit de points d'un espace euclidien ou toute autre mesure de distance entre les points.

Supposons que le nuage $\Gamma = \{M_i, i = 1, \dots, n\}$ est composé de plusieurs classes $\Gamma_1, \Gamma_2, \dots, \Gamma_n$. Pour mesurer la distance entre les deux classes Γ_i et Γ_m , il existe plusieurs façons de procéder. L'une des plus utilisée est la distance au plus proche voisin.

$$d(\Gamma_i, \Gamma_m) = \text{Min}_{x \in \Gamma_i, y \in \Gamma_m} d(x, y)$$

Ce dendrogramme représente une hiérarchie de partitions. On peut alors choisir une partition en tronquant l'arbre à un niveau donné, le niveau dépendant soit des contraintes de l'utilisateur (l'utilisateur sait combien de classes il veut obtenir), soit de critères plus objectifs.

NB: Plusieurs méthodes d'agrégation sont disponibles : Méthode de Ward, Lien flexible, Lien complet, Lien simple, Lien fort, Lien Moyen, Lien proportionnel

Partie III : RESULTATS et INTERPRETATION

III-1. Coupes lithologiques

Au cours de notre travail sur terrain, nous avons réalisé une coupe lithologique (figure 18) qui est bien améliorée au laboratoire avec les coordonnées géographiques suivantes :

Base : X=0423080 Top : X=0423067

Y=1128405

Y=1128350

Alt=59m

Alt=88m

MEMBRE	AGE	N° DE COUCHE	ÉPAISSEUR (m)	COUPE	LITHOLOGIE
M I A P D A N I A N	C M A M I P D A N I A N	M16	29		Argile de couleur lie de vin
		M15	28.03		Grés argileux à grains fins, couleur grise
		M14	26.1		Argile à lentille gréuseuse à grains fins, couleur grise foncée
		M13	25.13		Argile à lentille gréuseuse, couleur grise claire
		M12	23		Argile gréuseuse à grains +/- fins, couleur grise +/- foncée
		M11	21.65		Grès à grains très fins, couleur grise claire
		M10	19.91		Argile gréuseuse à grains fins, couleur lie de vin
		M9	17.98		Grès argileux à grains +/- fins, couleur grise
		M8	16.82		Grès à grains très fins, couleur grise claire
		M7	13.92		Grès argileux à grains +/- fins, de couleur grise
		M6	10.63		Grès à grains fins à grossiers, couleur grise
		M5	6.38		Grès à grains très fin, de couleur grise
		M4	5.8		Grès à grains fins, de couleur grise
		M3	4.64		Grès à grains fins à grossiers de couleur grise orangées
		M2	3.09		Grès à grains fins à grossiers, couleur jaune +/- orangées
		M1	1.74		

Figure 18: Coupe lithologique de la zone d'étude

En général, le dépôt est constitué par des grès. La partie supérieure est composée des argiles en présence de grès. La couleur grise est dominante. L'épaisseur du sédiment est d'environ 29m.

III-2. Résultats morphoscopiques

L'analyse morphoscopique (tableau 5) des grains montre que la majorité des échantillons a de la forme très anguleux vers subarrondi et à prédominance de grains de quartz. Et la dimension des grains se repartie comme suit :

- taille (μm) >128 : 12.04%
- taille (μm) >16 : 58.36%
- taille (μm) <16 : 29.60%

L'observation des échantillons couche par couche sur la microcapture, a pu en tirer des résultats suivant :

Tableau 5: Résultats de la morphoscopie des grains

Couche	Morphoscopie des grains
M16 : Top	Grains de quartz peu visible et de taille très fine
M15	Débris de grains très fins de quartz très anguleux
M14	
M13	
M12	
M11	Forte quantité de grains de quartz à toute forme de taille très fine
M10	
M9	Débris cimenté par des argiles avec quantité de quartz de grains subarrondis de taille fine
M8	Composé de grains subanguleux et de débris de quantité quasi égale de taille plus ou moins fine
M7	Débris de quartz, difficile à déterminer la forme
M6	Grains subarrondis et anguleux de taille plus ou moins fine
M5	Grains subanguleux de taille fine à grossière
M4	Grains très anguleux et de taille fine à très fine
M3	
M2	La majorité de grains est de forme subanguleux de taille fine à grossière
M1 : base	80% des grains sont de forme subarrondie et de taille variée de fine à grossière

III-3. Résultats de l'examen minéralogique

L'examen a principalement porté sur les refus de tamis. L'observation à la microcapture (figure 19) a donné les résultats suivants :

- 75 % des grains sont du quartz.
- Le reste est représenté par une fraction argileuse.

La couleur de quartz est transparente en général. Et certains grains sont colorés par les argiles qui les ont cimentés.

Le test à l'acide chlorhydrique (HCl) a montré une réaction négative sur la majorité des échantillons et une faible réaction à certaines couches.

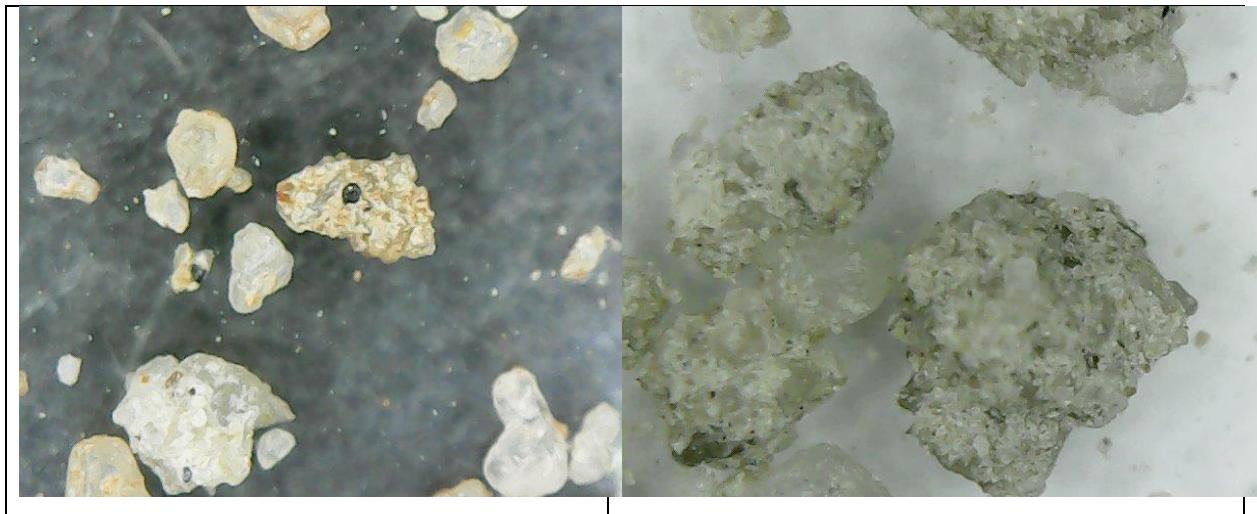


Figure 19: Morphoscopie des grains de quartz

III-4. Résultats granulométriques

Par la méthode de «FOLK et WARD», les sédiments sont, pour la grande majorité, composés de grains de quartz. L'étude granulométrique a permis la caractérisation de ces grains de quartz.

Pour avoir les dispersions de dimension du sédiment, le traçage de courbe de fréquence simple et cumulée à chaque échantillon est primordial. Avec cette courbe, on a pu en tirer les différentes ouvertures de tamis correspondantes à chaque pourcentage de refus voulu pour faire les calculs afin d'obtenir les différents indices.

III-4-1. Courbes granulométriques

Les deux courbes granulométriques : courbe de fréquence simple et courbe de fréquence cumulée, sont présentées en deux dimensions d'abscisse les tailles de tamis et d'ordonnée les pourcentages de refus de tamisage.

III-4-1-1. Courbes de fréquence simple (C.F.S)

Les courbes sont en majorité symétriques (figure 20-21-22). Les courbes sont atteintes ses maximums quand la taille de tamis appartient à $16\mu\text{m}$ - $64\mu\text{m}$.

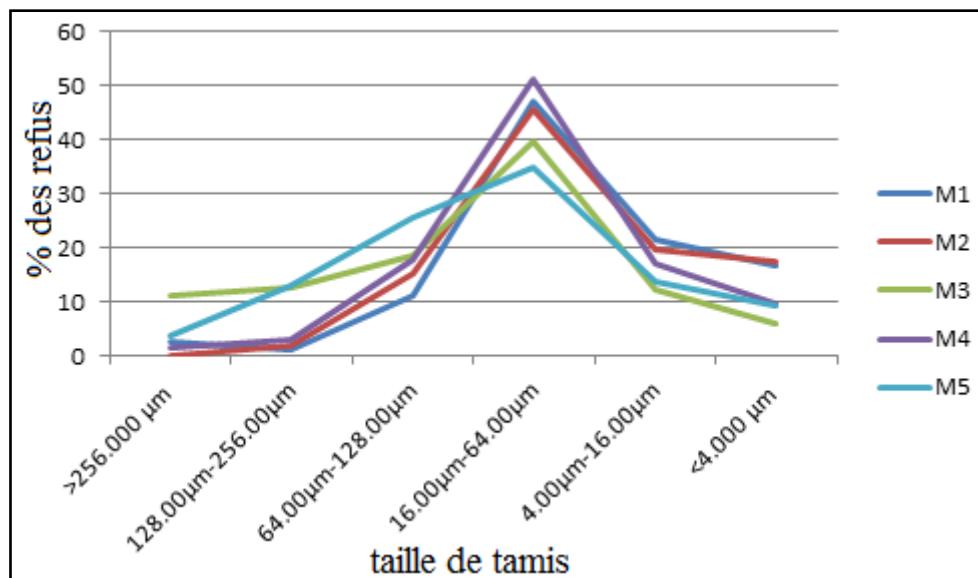


Figure 20: C.F.S pour les couches M1 jusqu'à M5

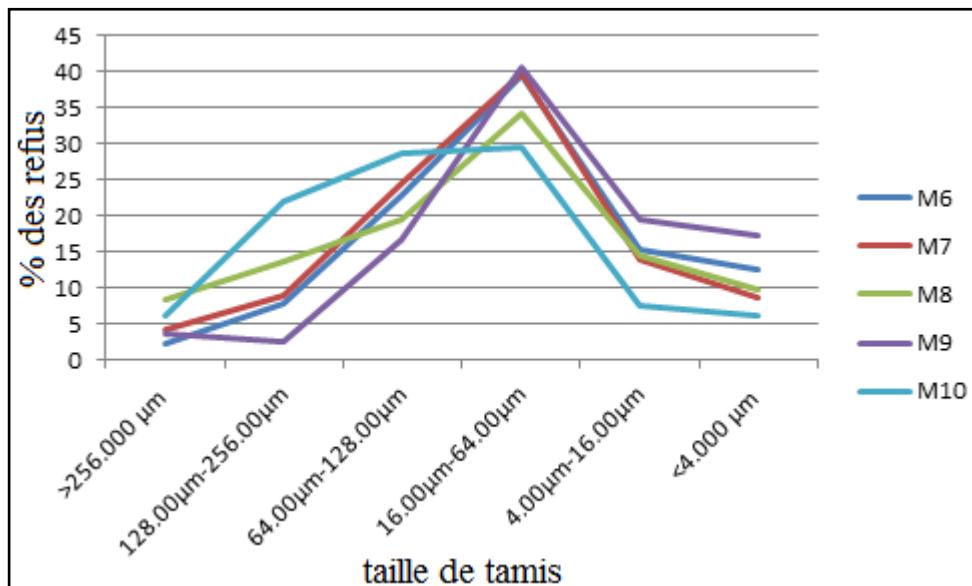


Figure 21: C.F.S pour les couches M6 jusqu'à M10

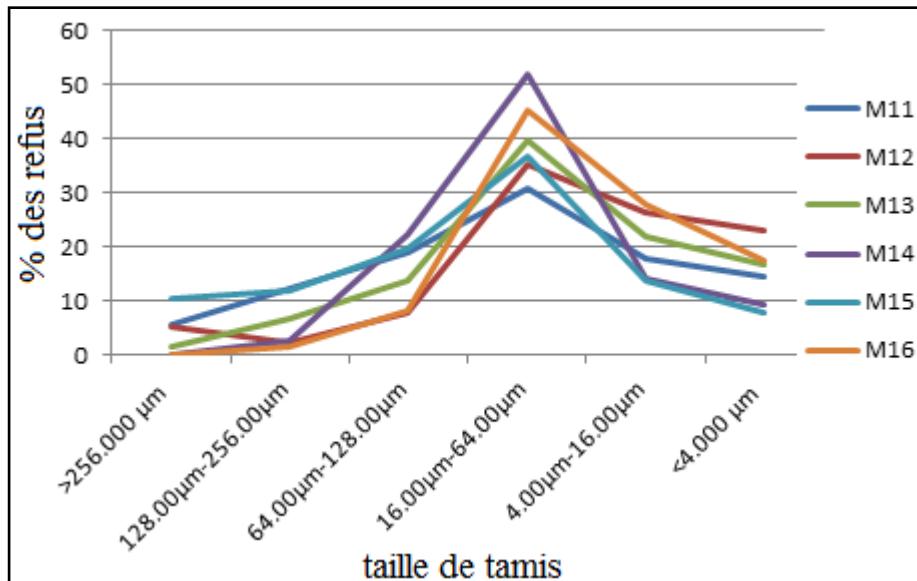


Figure 22: C.F.S pour les couches M11 jusqu'à M16

Les variations suivant la taille (t) sont divisées en deux sens :

- $t > 16\mu\text{m}-64 \mu\text{m}$, la variation est croissante,
- $t < 16\mu\text{m}-64\mu\text{m}$, la variation est décroissante.

Les variations de chaque courbe sont légèrement croissantes sur la taille de tamis supérieure à $64\mu\text{m}-128\mu\text{m}$. Elles sont légèrement décroissantes sur la taille de tamis inférieure à $4\mu\text{m}-16\mu\text{m}$. Alors il y a un pic sur le tamis $16\mu\text{m}-64 \mu\text{m}$.

En observant les points : taille de tamis-pourcentage de refus, de chaque courbe, il n'y a pas de règle qui puisse les généraliser c'est-à-dire, la proportionnalité entre ces points et son vrai emplacement sur terrain n'est pas évidente.

III-4-1-2. Courbes de fréquence cumulée (C.F.C)

Les courbes cumulatives des sédiments (figures 23-24-25), ont, en général, la forme d'un S avec une pente assez faible, bien redressée et régulière, malgré l'existence de légères différences dans leurs allures.

L'allure de type sigmoïde se traduit comme suit : une réduction progressive de l'énergie de l'agent de transport (SAAIDI et PINNOT, 1991) et suggère une sédimentation réalisée par accumulation libre (TRICART, 1965).

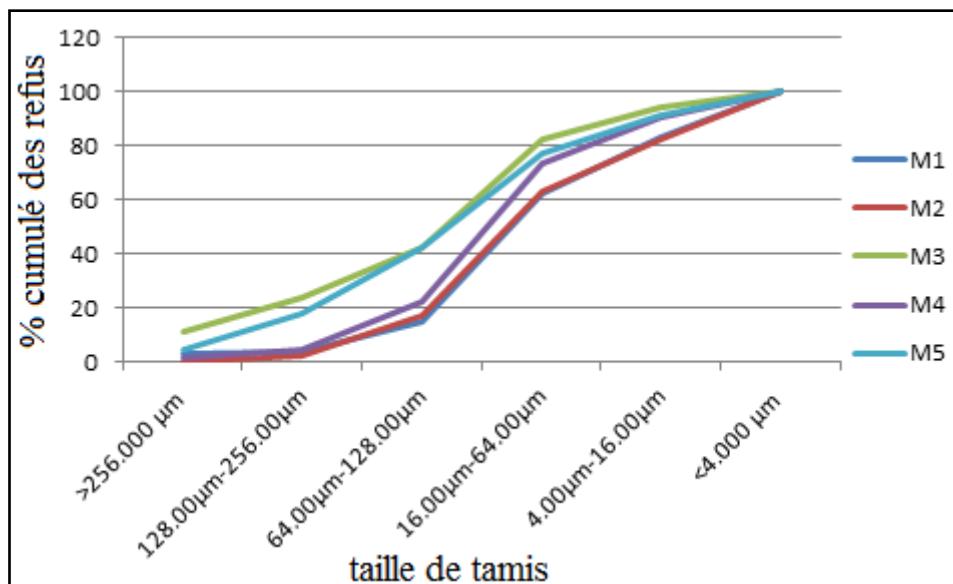


Figure 23: C.F.C pour les couches M1 jusqu'à M5

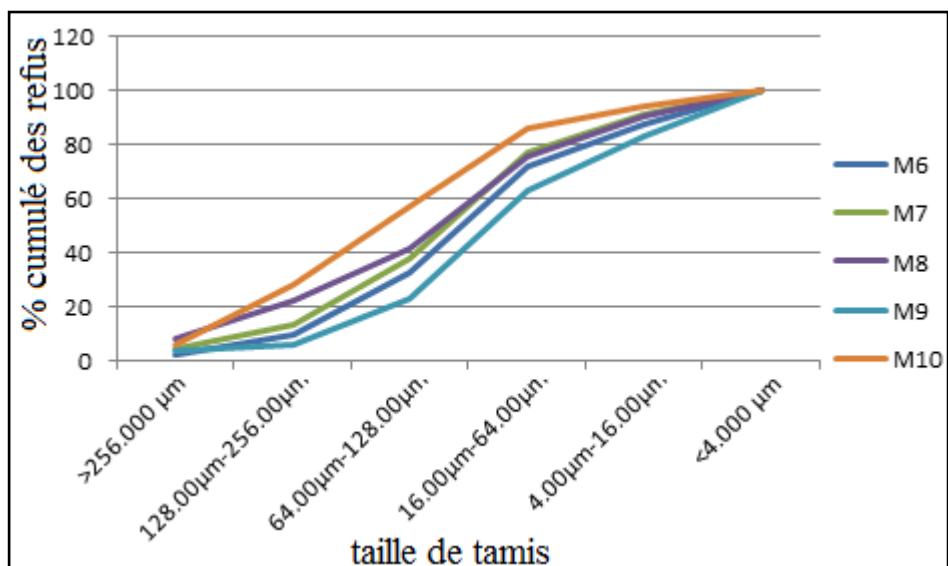


Figure 24: C.F.C pour les couches M6 jusqu'à M10

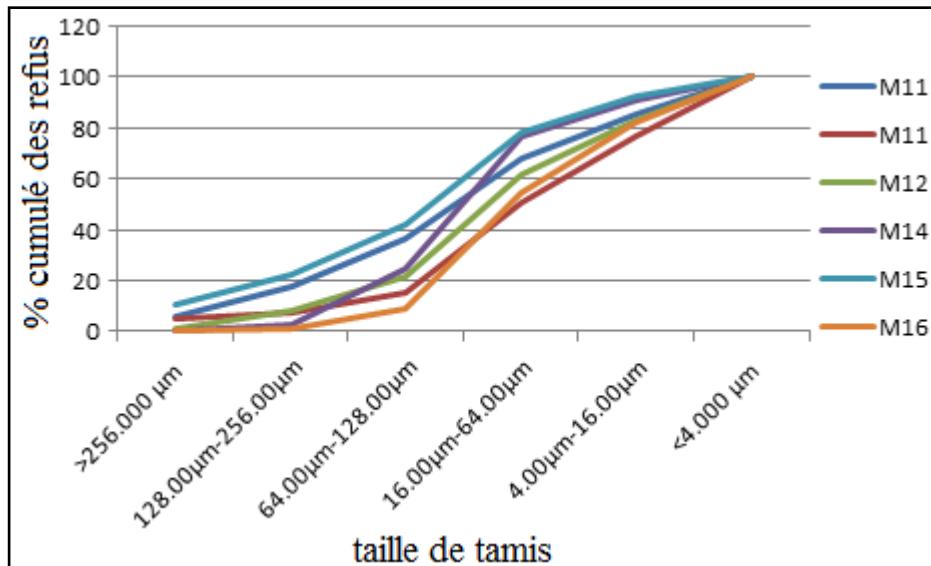


Figure 25: C.F.C pour les couches M11 jusqu'à M16

Ceci permet de définir trois faciès principaux selon RIVIERRE (1952)

1- Le faciès parabolique : il caractérise des apports par un courant de turbidité rapide avec un bon classement du matériel. Le mode de transport se fait par suspension graduée. On observe un gradient vertical de densité au sein du courant transporteur.

2- Le faciès logarithmique : il résulte d'un dépôt par excès de charge à la suite d'une diminution de la compétence de l'agent de transport. Ce transport se faisant par suspension uniforme (courant de turbidité de faibles densité et vitesse).

3- Le faciès hyperbolique : Il reflète un dépôt par décantation.

Le mécanisme de transport et de dépôt par l'eau, est en liaison aux lois hydrauliques. Celles-ci sont établies pour des conditions d'équilibre si l'écoulement est permanent, uniforme et irrationnel. L'étude des accumulations des sédiments, portent essentiellement sur l'observation d'un état de déséquilibre par excès de charge des sédiments transportés.

Les courbes de fréquence cumulée indiquent que les sédiments sont plus ou moins homogènes. Les courbes sont symétriques avec des classements différents.

III-4-2. Moyenne Mz

D'après la gamme de valeurs de Mz, plus la valeur augmente, plus la taille des grains est de moins à moins petite. Les résultats obtenus sont présentés sous forme de tableau suivant en trois libellés : les valeurs de la moyenne, les degrés de classement et les numéros de couche (tableau 6).

Tableau 6: Classification des couches selon les valeurs de Mz

Valeur de Mz	Degré de classement	Couche correspondante
3<Mz<4	Sable très fin	M10
4<Mz<5	Limon très grossier	M3, M5, M7, M8, M15
5<Mz<6	Limon grossier	M1, M2, M4, M6, M9, M11, M13, M16
6<Mz<7	Limon moyen	M16, M12

Le tableau ci-dessus montre que les échantillons sont classés sédiments meubles. Ce qui traduit que le facteur de transport est d'une vitesse lente.

Pour bien montrer la répartition des grains, nous avons pu présenter les échantillons dans le diagramme de FOLK (1954).

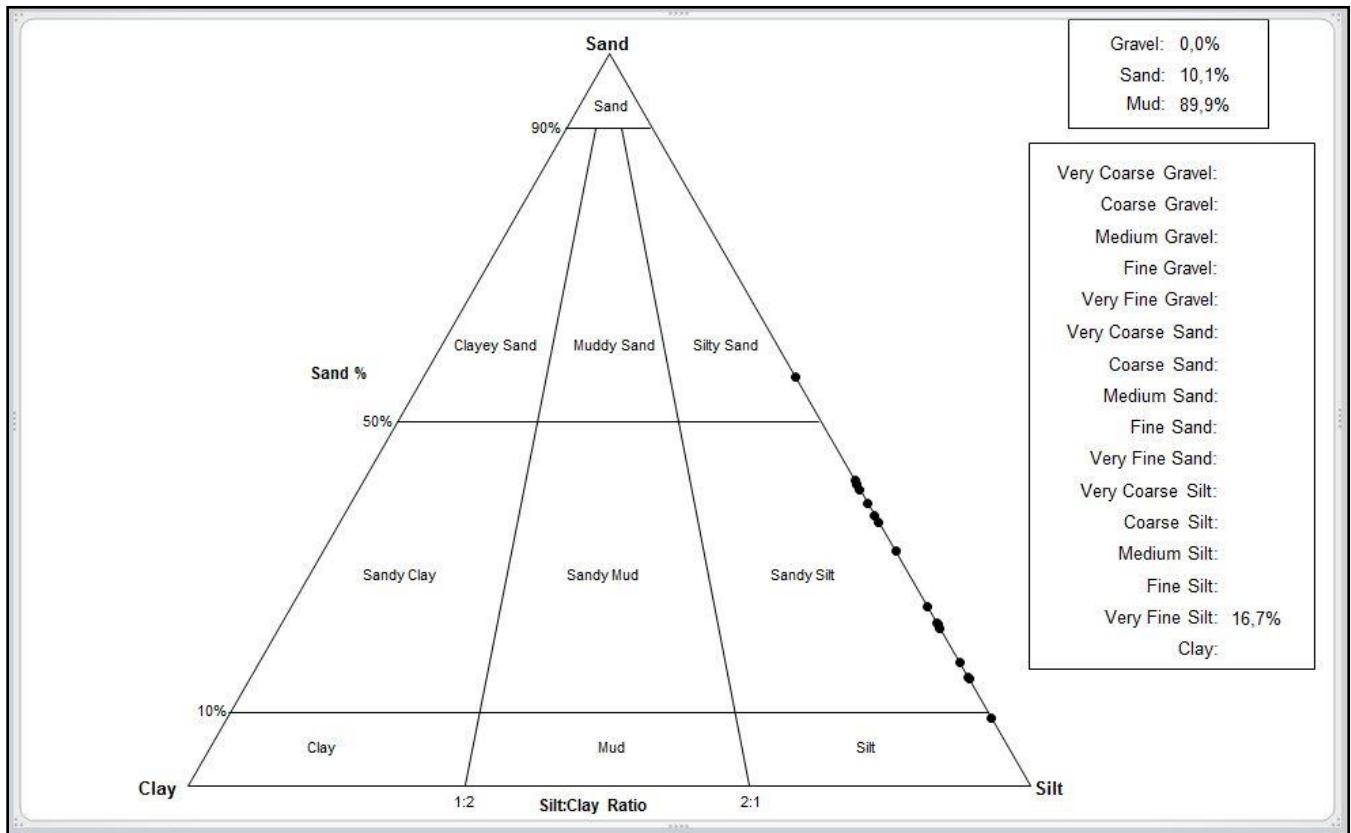


Figure 26: Représentation des échantillons selon le diagramme de FOLK

Le 90% des échantillons sont constitués des limons sableuses (figure 26-27) et ce qui est bien le cas d'après la classification donnée par la valeur de Mz.

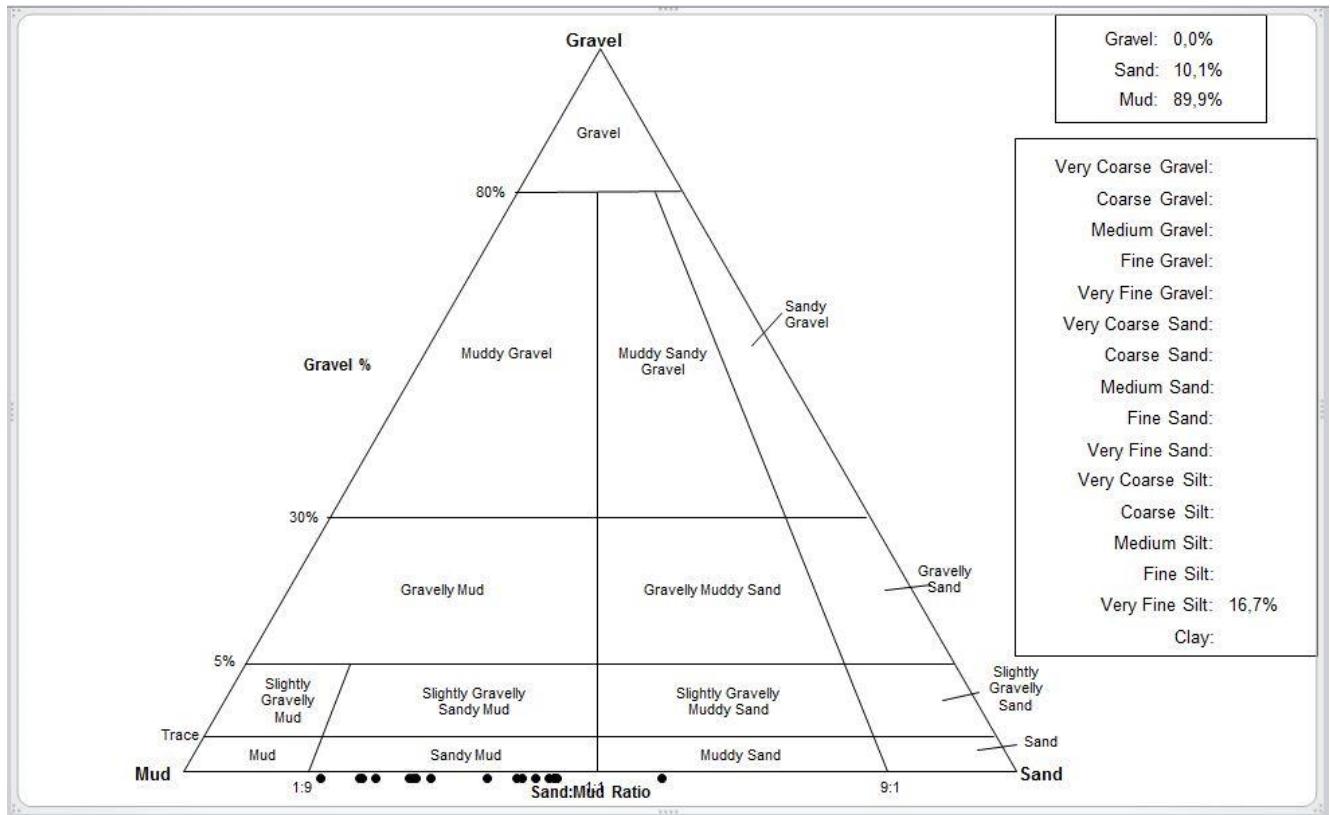


Figure 27: Répartition des sédiments d'après le diagramme de FOLK

III-4-3. Standard deviation So

Comme la moyenne, les résultats de la déviation standard aussi sont présentés sous forme de tableau en trois libellés : les valeurs de la déviation, les degrés de classement et les numéros de couche (tableau 7).

Tableau 7: Classification des couches selon la valeur de So

Valeur de So	Degré de classement	Couche
$1 < So < 2$	Mal classé	M1, M2, M4, M5, M6, M7, M10, M14, M16
$2 < So < 4$	Très mal classé	M3, M8, M9, M11, M12, M13, M15

Les valeurs de So de tous les échantillons sont comprises entre 1 et 4, cela veut dire que le classement des grains est mauvais.

III-4-4. Sweakness SK

Les résultats de valeurs de SK sont présentés sous forme de tableau en trois libellés : valeurs de SK, les degrés de classement et les numéros de chaque échantillon (tableau 8).

Tableau 8: Classification des couches selon la valeur de SK

Valeur de SK	Degré de classement	Couche
$-0,1 < Sk < 0,1$	Symétrique	M12, M15
$0,1 < Sk < 0,3$	Asymétrique vers les grossiers	M1, M2, M3, M4, M5, M6, M7, M8, M9, M10, M11, M13, M14, M16

La majorité des échantillons sont classés asymétrique vers grossiers.

III-4-5. Relation entre So et Mz

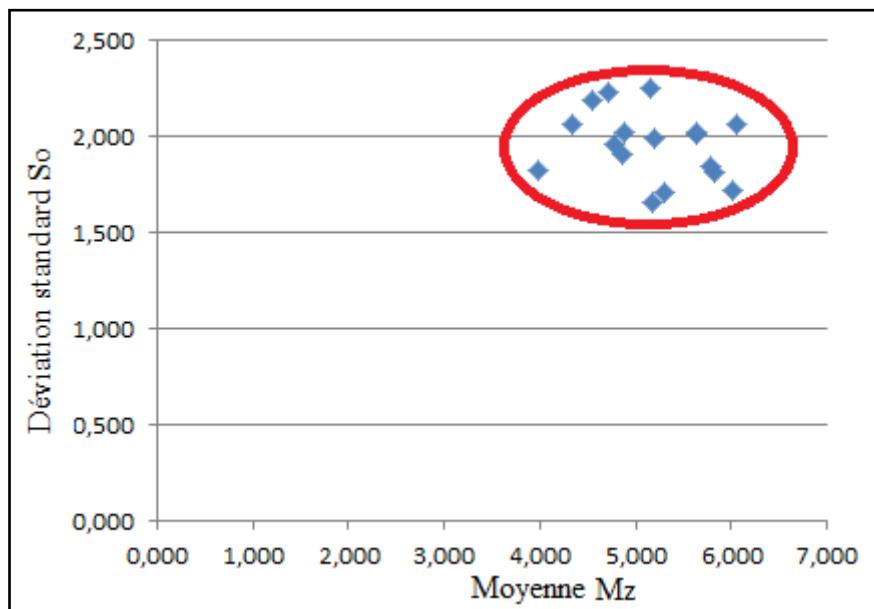


Figure 28: Relation entre So et Mz

Le croisement des valeurs (figure 28) montre que le milieu d'échantillonnage a une propriété de limons à grains de quartz grossiers.

III-4-6. Relation de KG et Mz

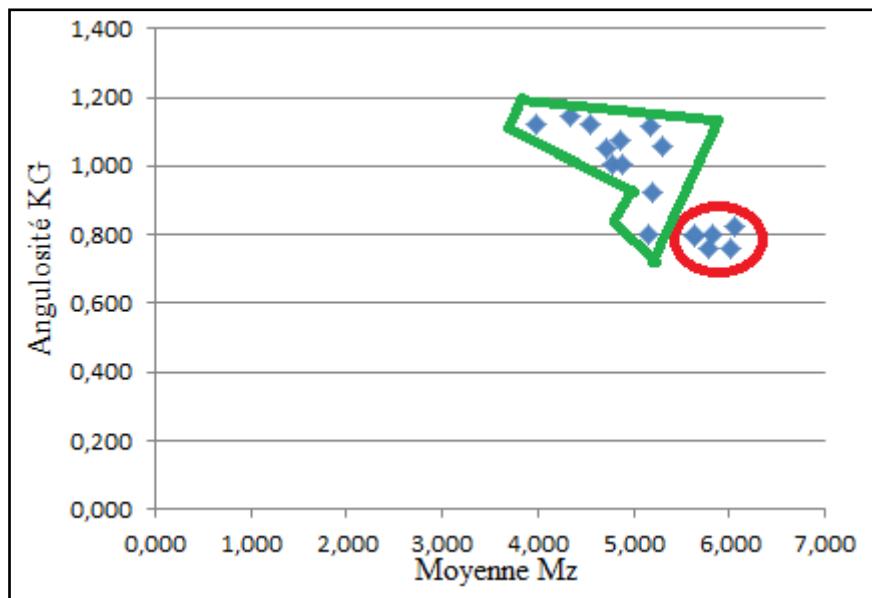


Figure 29: Relation entre KG et Mz

Le rapport entre la moyenne et l'angulosité (figure 29) nous donne plus de précision sur la propriété du sédiment. Ici, on voit bien un passage de limon à grain de quartz grossier vers moyen car la répartition des échantillons sur les limons grossiers d'angulosité supérieure est plus importante (76.47%) que celle de limon moyen (23.53%).

III-4-7. Relation de SK et Mz

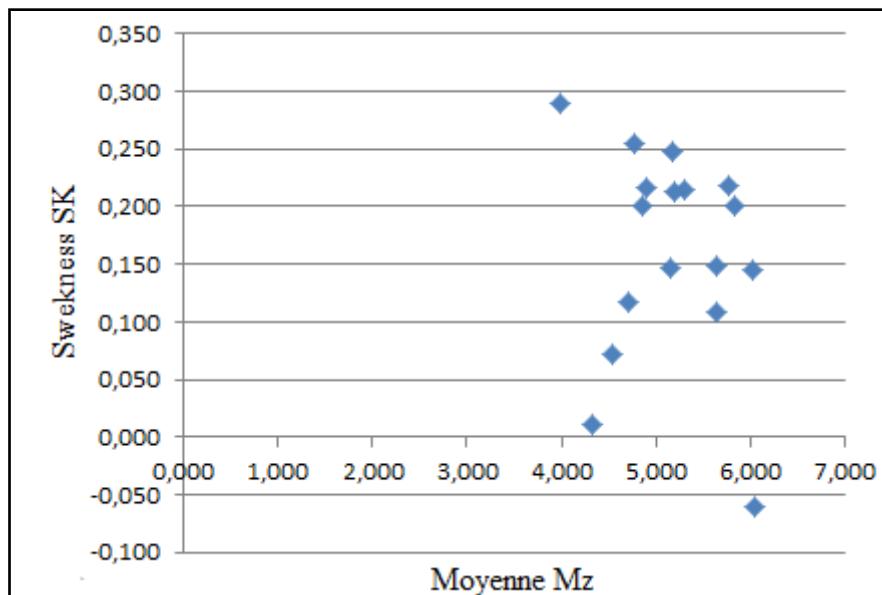


Figure 30: Relation entre SK et Mz

La relation entre asymétrie/moyenne (figure 30) explique l'excès d'aplatissement positif correspond à une bonne distribution des échantillons étudiées. Et une asymétrie positive montre un transport de faible énergie (milieu calme).

III-5. Méthode de quartile

III-5-1. Coefficient de classement de TRASK C

Après les calculs, la valeur C de tous les échantillons est inférieure à 2,5 alors que les sédiments sont tous très bien classés.

III-5-2. Coefficient d'asymétrie A

La valeur de A supérieure à 1 pour tous les échantillons, implique que le classement est maximal du côté fin ; la courbe est de type hyperbolique, correspondant à des dépôts en milieu calme.

III-6. Classification par statistique multidimensionnel

Les résultats de la granulométrie par cette méthode de classification permettent de confirmer la classification faite par les deux méthodes granulométriques de FOLK et WARD et la méthode de quartile, et pour suspecter les erreurs de non appartenance de la classe.

Les expériences de tamisage sont refaites à plusieurs reprises et donnés des plusieurs valeurs mais d'après le résultat donné de cette classification, ils sont tous similaires à chaque échantillon alors le problème de distinction des valeurs qu'on va étudier est résolu.

Pour la suite, Le tableau 9 contient les valeurs prises pour les calculs qui se suivent après :

Tableau 9:Résultat de tamisage

Couche	>256.000 μm	128.00 μm -256.00 μm	64.00 μm -128.00 μm	16.00 μm -64.00 μm	4.00 μm -16.00 μm	<4.000 μm
M16	0,103	1,266	8,002	45,313	27,837	17,479
M15	10,337	11,786	19,753	36,628	13,743	7,753
M14	0	2,569	22,053	51,865	14,159	9,354
M13	1,27	6,793	13,785	39,584	21,853	16,715
M12	5,093	2,316	7,879	35,247	26,393	23,071
M11	5,456	12,274	19,061	30,947	17,828	14,433
M10	6,056	22,071	28,757	29,448	7,571	6,096
M9	3,469	2,529	16,681	40,685	19,488	17,149

M8	8,372	13,479	19,423	34,347	14,557	9,822
M7	4,238	8,757	24,498	39,91	13,876	8,72
M6	2,111	7,743	22,692	39,494	15,378	12,582
M5	3,58	12,995	25,451	34,957	13,812	9,203
M4	1,507	3,055	17,651	51,184	17,052	9,551
M3	11,003	12,667	18,678	39,734	12,147	5,771
M2	0	1,948	15,144	45,766	19,701	17,441
M1	2,57	1,109	11,156	47,141	21,461	16,563

III-6-1. Analyse en Composante Principale

III-6-1-1. Valeurs propres

La figure 31 montre les valeurs propres et la contribution cumulées des composantes principales aux variances totale des données centrées réduites.

La première composante F1 explique les 67.67 % de la variance et donne le maximum d'information et la deuxième composante F2 renferme 20.93% de la variance. Nous gardons ces deux composantes pour la suite de ce traitement car les valeurs propres correspondant présentent un pourcentage élevé qui est 88.60 % de la variabilité totale.

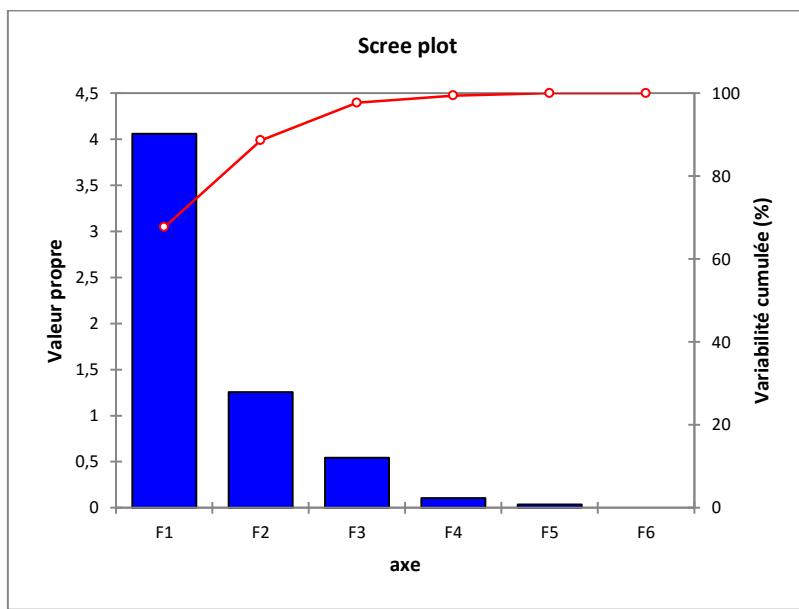


Figure 31: Représentation graphique des valeurs propres et pourcentage cumulée de leurs variances absorbées

III-6-1-2. Représentation des variables

Le cercle de corrélation (figure 32) ci-après présente la qualité de projection des variables qui sont des refus de tamisage à une profondeur bien définie, s'est faite dans le plan factoriel constitué par les axes F1 et F2.

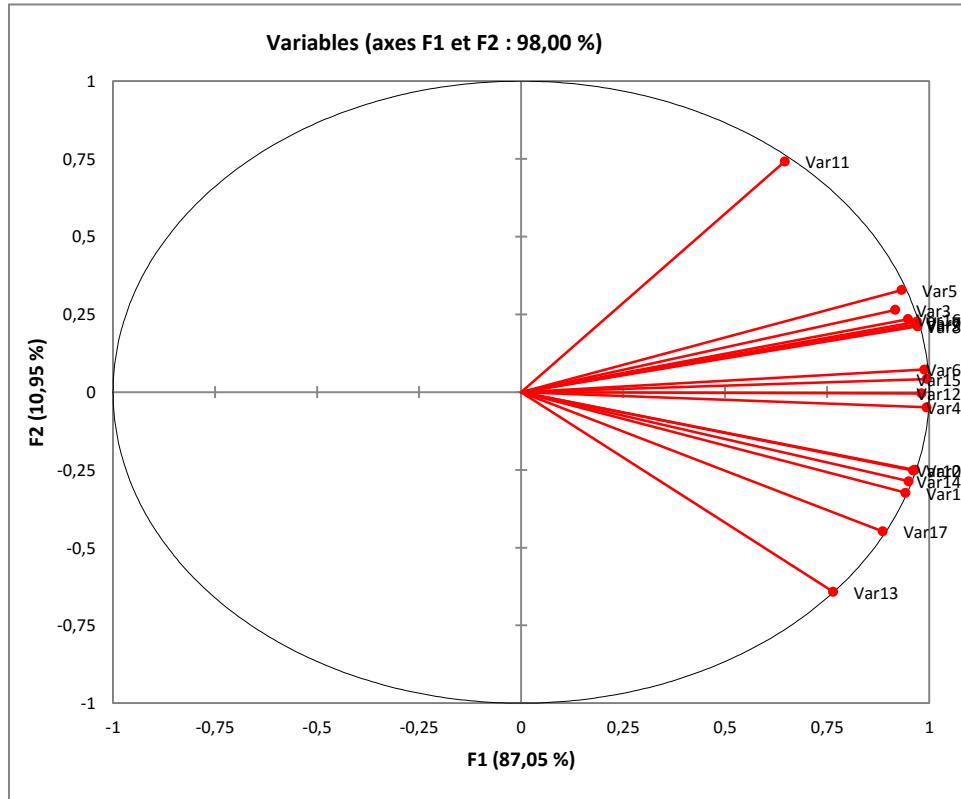


Figure 32: Distribution des variables dans le plan factoriel formé par F1 et F2

Cette figure montre la projection de chaque couche sur les deux axes F1 et F2 est bonne car les variables sont tous proches même sur la circonference du cercle.

➤ *Présentation des individus dans le plan factoriel*

L'obtention de la carte des individus correspond à l'un des objectifs de l'ACP. Elle permet de représenter les répartitions de chaque couche sous forme d'un nuage des points sur le plan factoriel (F1, F2) et ainsi d'identifier leurs tendances.

D'après la carte ci-après, on peut en considérer trois classes (figure 33) qui se distinguent par leurs projections sur les deux factoriels F1 et F2.

La première classe (classe1) regroupe les couches M1, M2, M9, M13, M16 qui ont de projection négative sur l'axe F2.

La deuxième classe (classe 2) regroupe les couches M3, M5, M6, M7, M8, M11, M15 qui ont la projection positive sur l'axe F2.

La troisième classe (classe 3) regroupe les couches M4 et M14 qui ont de projection positive sur l'axe F1 et négative sur l'axe F2.

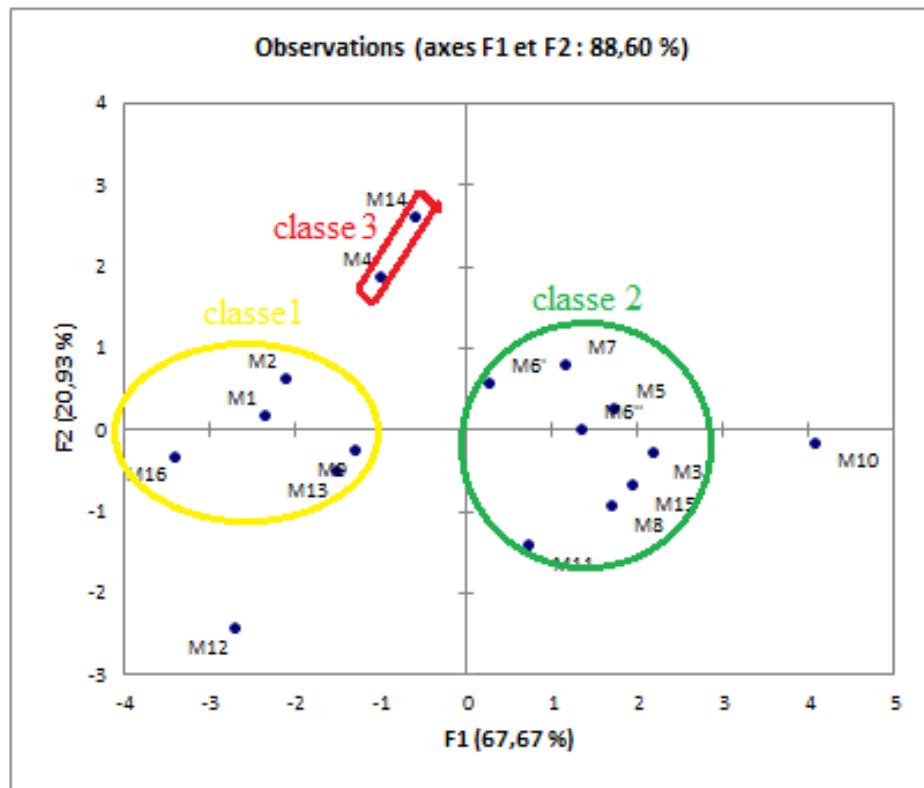


Figure 33: Représentation graphique du nuage des points de chaque couche sur plan factoriel formé par F1 et F2

Il est bien de noter que les couches M10 et M12 ne sont pas mentionnées sur les trois classes mais elles comptent sur les interprétations.

III-6-2. Classification Hiérarchique Ascendante (CHA)

III-6-2-1. Classification des individus par CHA

Pour commencer cette opération, il est commode d'analyser le diagramme (Figure 34) des niveaux permettant de définir le nombre de classe le plus justifiable pour lesquelles l'inertie interclasse est la plus faible.

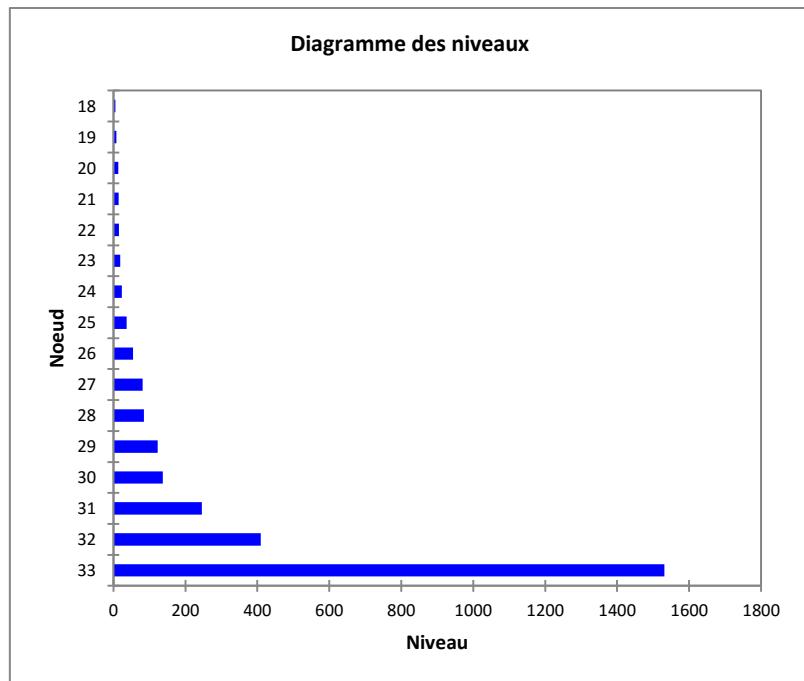


Figure 34: Représentation graphique de la variation des indices de niveau en fonction de l'agrégation des classes selon CHA des individus

III-6-2-2. Dendrogramme

Par suite, le dendrogramme (figure 35) obtenu ci- après est issu de la classification hiérarchique réalisée avec les 17 couches en vertical.

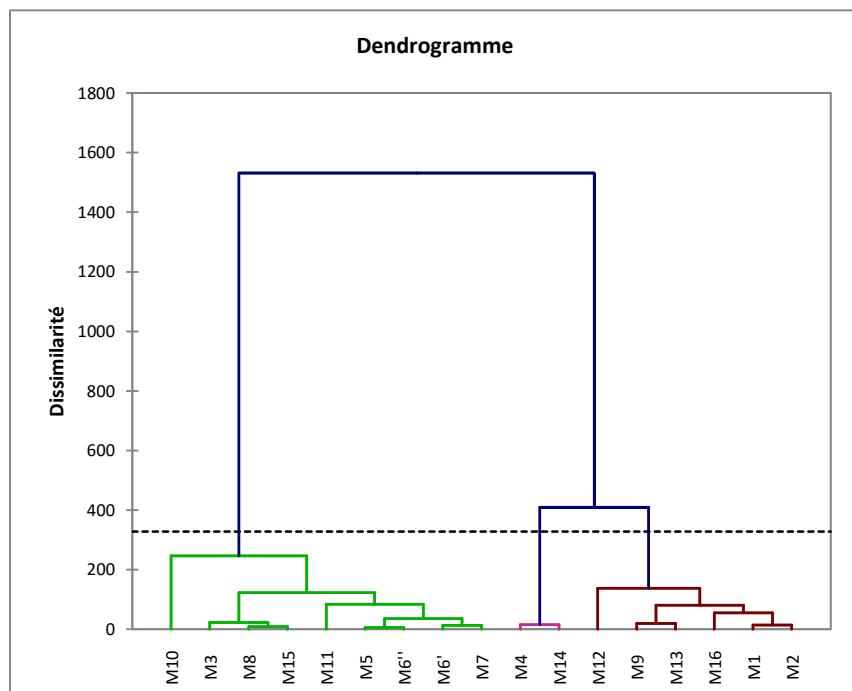


Figure 35: Arbre hiérarchique issu de la classification réalisée à partir des 16 couches

La ligne en pointillé représente la troncature et permet de réaffirmer que les 3 classes sont homogènes.

Ainsi, le tableau ci-dessous (tableau 10) récapitule le résultat de la classification des individus.

Tableau 10: Résumé de la classification des couches par CHA

Classe	1	2	3
Variance intra-classe	61,462	67,506	15,378
	M16	M15	M14
	M13	M11	M4
	M12	M10	
	M9	M8	
	M2	M7	
	M1	M6	
		M5	
		M3	
Nombre de couches	6	8	2

Partie IV : DISCUSSION

IV-1. Lithologie

La lithologie de la zone d'étude montre que la formation est détritique composée par de grès en grande étendue spatialement et des argiles sur la partie supérieure. Les grains sont de taille grossière vers très fine. La zone pourrait être alors subie un changement de régime de transport pendant sa déposition. C'est-à-dire, pendant l'installation des couches gréseuses, la vitesse de transport est forte qui est diminuée de moins en moins lors des couches supérieures composées d'argiles en dominance et de grès.

IV-2. Morphoscopie et minéralogie

Vue la taille et la forme des grains de quartz contenus dans les sédiments et observés sur la microcapture (taille variée et de forme mélangée de très anguleuse à subarrondie), l'origine des sédiments est proche de sa destination.

La réaction négative avec l'acide chlorhydrique de la majorité des échantillons indique l'absence d'éléments carbonatés, le milieu est continental. D'importantes inondations règnent au cours du Campanien dans le milieu qui ont ainsi provoqué l'instabilité des dépôts c'est-à-dire l'intercalation des couches en mode transport-dépôt. La rareté des fossiles de vertébrés dans le Membre Miadana peut être due par la présence de fer grâce à la prédominance de la couleur rouge (climat chaud et humide caractéristique des pays tropicaux) des sédiments ainsi que leur mode de préservation (abondance des dépôts gréseux).

De plus, la reconstitution paléogéographique de SCOTESE (1998) pour le Crétacé terminal, montre que le bassin de Mahajanga est situé au 30°S, ce qui signifie la présence d'un climat subtropical désertique (Figure 36).

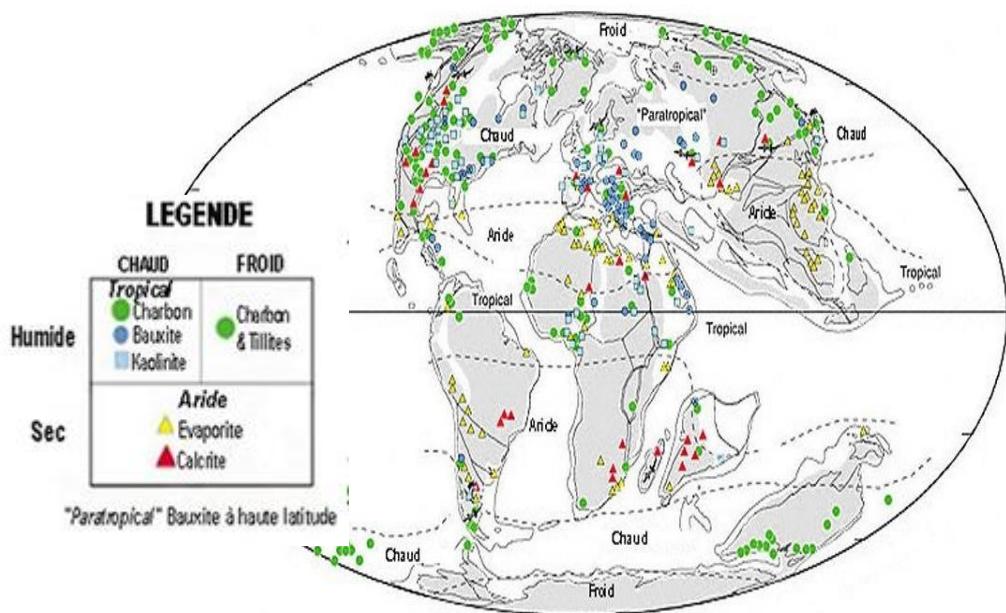


Figure 36: Paléoclimat du globe au Crétacé supérieur (SCOTESE, Paleomap, 2000).

N.B. : Au Crétacé supérieur, le climat global dans le monde était plus chaud que le climat actuel.

IV-3. Paramètres granulométriques

L'analyse granulométrique des échantillons prélevés montre une dominance des grains fins de la classe des arénites. Nous sommes donc en présence de sédiments fluviatiles en zone éloignée du chenal c'est-à dire dans une plaine d'inondation ou dépôts laissés en bordure d'un fleuve lors d'une période de crue ou de dépôts lacustres (CHAMLEY, 2000).

IV-3-1. Standard deviation So

La majorité des grains de sable ont des valeurs de So variant de 2 à 4. Ces valeurs montrent que l'on a du sable mal classé qui se sont déposés dans des milieux peu agités, à énergie moyenne.

IV-3-2. Sweakness ou coefficient d'asymétrie SK

Le coefficient d'asymétrie Sk des sédiments varie de 0,1 à 0,3 sur la majorité des couches.

Les courbes granulométriques présentent une nette asymétrie vers les grossiers (presque 88.24% des échantillons), 11.76% des échantillons ont des Sk presque symétriques.

SK tend vers 1 pour des dépôts mis en place lors d'afflux d'eaux soutenus (apport en masse de particules « grossières»), suivis de décroissances régulières des écoulements (arrivée de sédiments de plus en plus fins) ceci signifie que l'on a un tri granulométrique.

IV-4. Courbe granulométrique

Les courbes de fréquence simple de chaque séquence ont une tendance unimodale et d'allure leptokurtique. Cela signifie que la granulométrie est homogène c'est-à-dire presque la totalité des grains ont des dimensions au voisinage du mode granulométrique.

La forme S de la courbe de fréquence cumulée indique qu'il s'agit de sables bien classés dans un milieu peu agité avec évacuation des particules fines vers le large.

Une telle forme de courbes montre aussi qu'on a un stock sédimentaire homogène et des conditions d'énergie adaptées à la charge transportée.

Le faciès dominant dans les courbes de fréquence cumulée est le faciès logarithmique, ce qui se traduit que les dépôts sont en excès de charge à la suite d'une diminution de la compétence de l'agent de transport. Ce transport s'est fait par suspension uniforme (courant de turbidité faibles densité et vitesse).

IV-5. L'ACP et la CHA

La combinaison de l'analyse granulométrique et du classement issu de la CHA permet de catégoriser statistiquement les 16 couches en trois classes. Pourtant, l'aperçu général de leur répartition verticale nous reflète 3 classes qui s'intercalent. D'où l'intérêt majeur de cette étape dont on a déduit les caractéristiques de transports-dépôts de chaque couche. Cette intercalation nous confirme que le mode de transports-dépôts n'est pas égal à toutes les couches c'est-à-dire qu'il y avait de changements de facteurs ou régime de transport pendant leur déposition.

IV-6. Paléoenvironnement

Un paléoenvironnement est un environnement ancien. Il recouvre deux réalités : la géographie et la biologie de l'environnement. On les reconstitue d'après des accumulations et des traces d'activités biologiques.

Après la réalisation de coupe et l'inventaire de la lithologie de la zone, la formation existante est la formation détritique qui est représentée par des grès en toutes ses couleurs

dues à la présence des argiles alors l'origine de sédiments est fluviatile en zone éloignée du chenal c'est-à dire dans une plaine d'inondation ou dépôts laissés en bordure d'un fleuve lors d'une période de crue ou de dépôts lacustres.

Les résultats de la morphoscopie et la granulométrie indiquent que les grains de quartz qui sont en masse dans les sédiments ont des formes variées de très anguleuses jusqu'aux subarrondies c'est-à-dire non-usés vers émoussés-luisants alors les sédiments sont transportés dans un milieu aquatique continental sur une distance plus ou moins longue.

. D'importantes inondations règnent au cours du Campanien dans le milieu qui ont ainsi provoqué l'instabilité des dépôts c'est-à-dire l'intercalation des couches en mode transport-dépôt

La rareté des fossiles de Vertébrés dans le milieu peut être du taux élevé du fer dans les sédiments (prédominance de coloration rouge).

La structure litée, les sables bien triés et la présence des apports détritiques terrigènes ainsi que le caractère de non conservation fossilifère amène à dire que la sédimentation est dans un milieu continental.

CONCLUSION

Le travail de recherche présenté dans ce mémoire nous a permis de mettre à jour et d'appuyer les connaissances géologiques concernant le dépôt du Membre Miadana dans la région de Berivotra du bassin de Mahajanga.

La lithologie de la zone d'étude montre que la formation est détritique composée par de grès en grande étendue spatialement et des argiles sur la partie supérieure, de plus, les résultats de la minéralogie révèlent que le pourcentage en fraction d'arénite est relativement faible par rapport au principal constituant : le quartz. Et la morphoscopie donne que les grains de quartz sont très anguleux vers subarrondis c'est-à-dire non-usés vers émoussés-luisants alors les sédiments sont transportés dans un milieu aquatique continental sur une distance plus ou moins longue.

La réaction négative avec l'acide chlorhydrique de la majorité des échantillons indique l'absence d'éléments carbonatés, alors les fossiles sont rares. D'importantes inondations règnent au cours du Campanien dans le milieu qui ont ainsi provoqué l'instabilité des dépôts c'est-à-dire l'intercalation des couches en mode transport-dépôt. La rareté des fossiles de vertébrés dans le Membre Miadana peut être due par la présence de fer grâce à la prédominance de la couleur rouge (climat chaud et humide caractéristique des pays tropicaux) des sédiments ainsi que leur mode de préservation (abondance des dépôts gréseux).

L'étude et l'analyse granulométrique des sédiments ont permis de caractériser ces sédiments comme étant des sédiments fluviatiles de forte énergie de dépôt comme le cas de chenaux situés à l'écart du cours principal où la sédimentation est essentiellement argilo-sableuse ou des sédiments lacustres ou palustres qui ont ensuite subi d'importants phénomènes d'altération à cause de fortes variations climatiques.

La structure litée, les sables bien triés et la présence des apports détritiques terrigènes ainsi que la rareté des fossiles amènent à dire que la sédimentation est dans un milieu continental. Dans ce cas, pour les autres membres, il est particulièrement utile de réaliser les mêmes procédures pour les autres Membres notamment dans le domaine de la sédimentologie. Par la suite, il est à recommander de vérifier l'isolation du Membre Miadana par une explication géologique en corrélation avec les preuves paléontologiques pour vérifier si c'était vraiment les résultats d'une tectonique de plaque ou d'une forte transgression marine faisant amener les fossiles vers les autres Membres.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. BESAIRIE H. ,1972 : Géologie de Madagascar. Tome I : Les terrains sédimentaires. Ann. Géol. Madagascar, fasc.N°XXXV, pl.89, 463p.
2. BEZ N.,1997. Statistiques individuelles et géostatistique transitive en écologie halieutique. Thèse de Docteur en Géostatistique, Ecole des Mines de Paris, 84p
3. CHAUVET P., 1999. Aide-mémoire de géostatistique linéaire. Les Presses de l'Ecole des Mines. Page36
4. CAILLEUX A. et TRICART J., 1959. Initiation à l'étude des sables et des galets. C. D. U. édition, paris, tome I, 376p.
5. CAILLEUX A., 1954. Limites dimensionnelles et noms des fractions granulométriques. Bull. Soc. Géol. De France, t. IV, Paris, pp. 643-653.
6. CARTIER G., DELMAS P., 1984. Les mécanismes de mouvements de terrain: nécessité de la mesure des déplacements. Colloque sur les mouvements de terrains, Caen, France, n°1, pp. 337-344.
7. DUBY C., ROBIN S., 2006. Cours analyse en Composantes Principales, Département O.M.I.P. page 91
8. FOLK RL. WARD W.C., 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. J. Sedimentary Petrology 27: pp. 3–26.
9. KAST S., 2010. Paleoclimate Reconstruction in the Late Cretaceous of Madagascar. Senior Honor Thesis. Macalester College: pp. 14-45
10. KRUMBEIN W.C. 1936. Application of logarithmic moments to size frequency distribution of sediments. J. Sedim. Petrol. 6 : pp. 35-47
11. PGRM – Projet de Gouvernance des Ressources Minérales. 2005. Rapport n° CARTOSUD-02 : R2 – Rapport II – Phase Préparatoire, juillet 2005.
12. PIQUE A.,1998. L'évolution géologique de Madagascar et la dislocation du Gondwana: une introduction. J. African Earth Sciences, Vol. 28, Issue 4, May 1999, pp. 19-30.
13. RAHANTARISOA L.J., 2007. Biostratigraphie et paléoécologie du maastrichtien de Berivotra (Mahajanga). Thèse, Univ d'Antananarivo. 130p
14. RAKOTOMALALA R. , Analyse en Composantes Principales (ACP), Principes et pratique de l'ACP. Leçon en diapo, Université Lumière Lyon 2. 41p

15. RIVIERE A. ,1952. Expression analytique générale de la granulométrie des sédiments meubles. Bull. Soc. Geol. France 2(13) : pp.155-167
16. ROGER J., 1974. Paléontologie générale. Masson et Cie, Editeurs 120, Boulevard Saint-Germain, Paris : pp.21-39
17. ROGERS R.R., HARTMAN J.H., KRAUSE D. W., 2000. Stratigraphic analysis of Upper Cretaceous rocks in the Mahajanga basin, northwestern Madagascar. J. Geology, vol.108, pp.275-301.
18. WEYDERT P., 1973. Morphologie et sédimentologie de la partie méridionale du grand récif de Tuléar (SW Madagascar) : les ensembles sédimentaires de la pente interne. Téthys sup. 5 : pp.133-156

REFERENCES WEBOGRAPHIES

1. www.madamagazine.com: Janvier 2017
2. www.u-picardie.fr./~beaucham/cours-sed/sed-8.htm: Mars 2017
3. www.u-picardie.fr/beaucham/cours-sed/sed-2.htm : Mars 2017

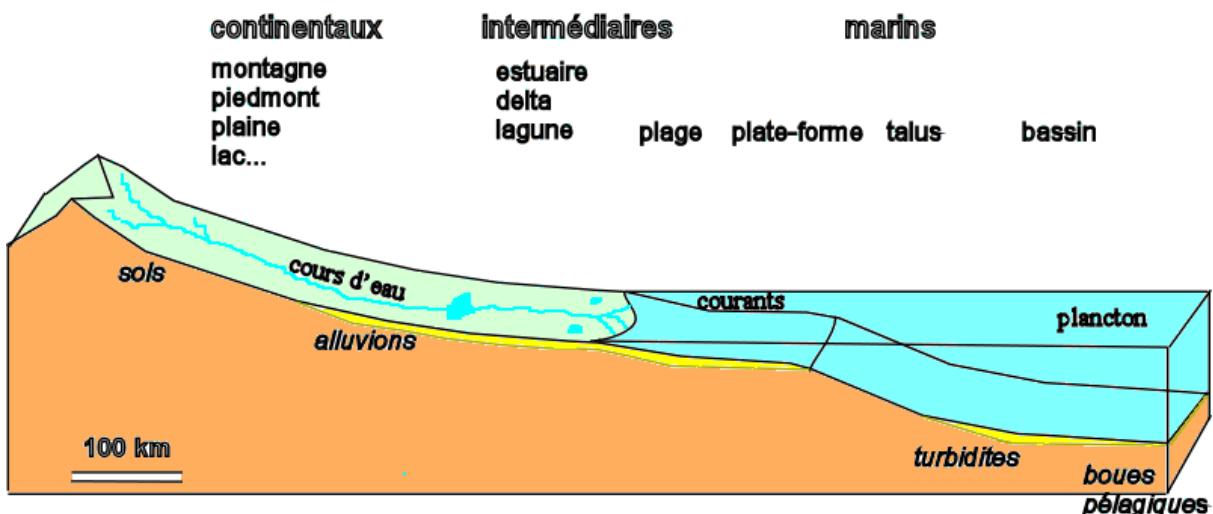
ANNEXE

Annexe 1 : Tableau du résultat granulométrique par tamisage

Couche	>256.000 µm	128.00µm-256.00µm	64.00µm-128.00µm	16.00µm-64.00µm	4.00µm-16.00µm	<4.000 µm
M1	2,57	1,109	11,156	47,141	21,461	16,563
M1	1,885	1,288	11,156	47,474	21,565	16,632
M2	0	1,948	15,144	45,766	19,701	17,441
M2	0,032	2,23	14,776	45,959	19,539	17,464
M3	11,003	12,667	18,678	39,734	12,147	5,771
M3	8,419	12,586	18,871	41,194	12,823	6,108
M4	1,507	3,055	17,651	51,184	17,052	9,551
M4	1,696	2,85	17,451	51,37	17,069	9,564
M5	3,58	12,995	25,451	34,957	13,812	9,203
M5	4,385	13,158	25,042	34,84	13,484	9,09
M6	2,111	7,743	22,692	39,494	15,378	12,582
M6	1,828	7,268	23,144	39,77	15,425	12,565
M7	4,238	8,757	24,498	39,91	13,876	8,72
M7	5,698	8,438	23,987	39,56	13,741	8,575
M8	8,372	13,479	19,423	34,347	14,557	9,822
M8	7,551	13,194	19,53	34,75	14,938	10,037
M9	3,469	2,529	16,681	40,685	19,488	17,149
M9	9,601	4,247	15,641	35,89	18,308	16,313
M9	5,468	3,227	16,167	39,44	19,051	16,646
M9	4,475	4,423	16,169	37,996	19,555	17,382
M10	6,056	22,071	28,757	29,448	7,571	6,096
M10	5,691	22,179	29,025	29,504	7,554	6,047
M11	5,456	12,274	19,061	30,947	17,828	14,433
M11	6,697	12,577	18,713	30,443	17,469	14,101
M12	5,093	2,316	7,879	35,247	26,393	23,071
M12	6,467	2,856	7,479	34,515	25,985	22,698
M13	1,27	6,793	13,785	39,584	21,853	16,715
M13	1,265	6,622	13,634	39,634	22,002	16,843
M14	0	2,569	22,053	51,865	14,159	9,354
M14	0	2,613	21,757	51,984	14,227	9,419
M15	10,337	11,786	19,753	36,628	13,743	7,753
M15	12,705	11,302	19,191	35,775	13,467	7,56
M16	0,103	1,266	8,002	45,313	27,837	17,479
M16	0,266	1,227	7,632	45,343	27,972	17,56

Annexe 2 : Interface du logiciel GRADISTAT

Annexe 3 : Principaux milieux de sédimentation



Titre du mémoire : «CARACTERISATION DES DEPÔTS SEDIMENTAIRES ET PALÉOENVIRONNEMENT DU MEMBRE MIADANA DANS LE SECTEUR DE BERIVOTRA (BASSIN DE MAHAJANGA)»

Impétrant : ANDRIATSILAVO Rado

Adresse : Bloc 43 D2 C.U Ambohipo – Antananarivo 101

E-mail : andriatsilavorado@gmail.com

Encadreur : Dr. RAHANTARISOA Lydia Jeanne

Nombre de pages : 73

Nombre de figures : 36

Nombre de tableaux : 10

RESUME

La zone d'étude de ce mémoire se situe dans le Membre Miadana appartenant au secteur de Miadana de la Formation de Berivotra dans le bassin de Mahajanga. Cette étude consiste en la caractérisation des dépôts sédimentaires de cette zone d'investigation. Les seize (16) échantillons de sédiments recueillis sont traités et étudiés au laboratoire par des analyses granulométrique et morphoscopique.

Ces différentes analyses montrent que les grains de quartz qui sont en masse dans les sédiments ont des formes variées, anguleuses jusqu'à subarrondies et de dimensions très fines à grossières alors les sédiments sont transportés dans un milieu aquatique continental sur une distance plus ou moins longue ou la vitesse de transport est moyenne.

Du point de vue paléoenvironnemental, le Membre Miadana est soumis à une grande inondation au Campanien avec un climat chaud qui est caractéristique d'un pays tropical avec la prédominance de couleur rouge (riche en fer) d'où la rareté des fossiles de vertébrés.

Mots-clés: Membre Miadana, Berivotra, morphoscopie, paléoenvironnement, Campanien.

ABSTRACT

The studied area is located in Miadana Member belonging to the Miadana sector in Berivotra Formation of the Mahajanga basin. This study is carried to characterize the sediments deposits in this investigation zona. The sixteen samples of sediments collected are treated and studied to the laboratory using screen granulometry and morphoscopic analyses. Such different analysis show grains of quartz in mass inside the sediments have varied shapes (angular until subarrondies) and very fine to coarse measurements, so sediments are in a continental aquatic environment on more or less long distance or transportation speed with a middle.

According paléoenvironnementale point of view, Miadana Member is submitted under huge flood during Campanian, with hot climate, characteristic of tropical country, with predominant red color (richness in iron) explaining vertebrate's fossils rarity.

Keywords: Miadana Member, Berivotra, morphoscopic, paleoenvironnement, Campanien.