

REPOBLIKAN'I MADAGASIKARA
Fitiavana-Tanindrazana-Fandrosoana

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE MAHAJANGA

ECOLE DOCTORALE ECOSYSTEMES NATURELS
(EDEN)

EQUIPE D'ACCUEIL DOCTORALE :
Biodiversité animale, Ecologie et Conservation



Thèse pour l'obtention du grade de :
DOCTEUR EN ECOSYSTEMES NATURELS
Spécialité : Paléontologie, Paléoécologie et Paléoenvironnement

**FAUNE ALBIENNE DU SECTEUR
D'AMBATOLAFIA : PALEONTOLOGIE,
PALEOECOLOGIE ET PALEOENVIRONNEMENT**

Présentée par **NOROVELO Claudine**

Soutenue publiquement le : 28 août 2025

Devant le Jury composé de :

- Président** : Monsieur RANDRIANAMBININA Blanchard, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN), Université de Mahajanga
- Rapporteur interne** : Monsieur RABIBISOA Nirhy Harinelina Christian, Professeur, Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN), Université de Mahajanga
- Rapporteur externe** : Monsieur RAZAFIMAHEFA, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM), Université de Mahajanga
- Directeur de thèse** : Monsieur RASOLOHARIJAONA Solofonirina, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN), Université de Mahajanga
- Co-Directeur de thèse** : Madame RAHANTARISOA Lydia Jeanne, Maître de Conférences-HDR, Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Evolution (STE), Université d'Antananarivo
- Examineurs** : Monsieur RASOANARIVO Rivoharinala, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM), Université de Mahajanga
: Monsieur RAKOTONIMANANA Rivoniaina Michel Jese, Maître de Conférences-HDR, Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Evolution (STE), Université d'Antananarivo
- Numéro de soutenance** : 003/2025/DOC/EDEN/UMG

MINISTERE DE L'ENSEIGNEMENT SUPERIEUR ET
DE LA RECHERCHE SCIENTIFIQUE



UNIVERSITE DE MAHAJANGA

ECOLE DOCTORALE ECOSYSTEMES NATURELS
(EDEN)

EQUIPE D'ACCUEIL DOCTORALE :
Biodiversité animale, Ecologie et Conservation



Thèse pour l'obtention du grade de :
DOCTEUR EN ECOSYSTEMES NATURELS
Spécialité : Paléontologie, Paléoécologie et Paléoenvironnement

**FAUNE ALBIENNE DU SECTEUR
D'AMBATOLAFIA : PALEONTOLOGIE,
PALEOECOLOGIE ET PALEOENVIRONNEMENT**

Présentée par **NOROVELO Claudine**

Soutenue publiquement le : 28 août 2025

Devant le Jury composé de :

- Président** : Monsieur RANDRIANAMBININA Blanchard, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN), Université de Mahajanga
- Rapporteur interne** : Monsieur RABIBISOA Nirhy Harinelina Christian, Professeur, Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN), Université de Mahajanga
- Rapporteur externe** : Monsieur RAZAFIMAHEFA, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM), Université de Mahajanga
- Directeur de thèse** : Monsieur RASOLOHARIJAONA Solofonirina, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN), Université de Mahajanga
- Co-Directeur de thèse** : Madame RAHANTARISOA Lydia Jeanne, Maître de Conférences-HDR, Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Evolution (STE), Université d'Antananarivo
- Examineurs** : Monsieur RASOANARIVO Rivocharinala, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM), Université de Mahajanga
: Monsieur RAKOTONIMANANA Rivoniaina Michel Jese, Maître de Conférences-HDR, Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Evolution (STE), Université d'Antananarivo

Numéro de soutenance : 003/2025/DOC/EDEN/UMG

REMERCIEMENTS

Cette thèse est le résultat de plusieurs années d'efforts assidus. Au cours de ce processus, j'ai vécu des moments de joie, mais aussi des périodes de stress et de découragement. Heureusement, j'ai pu compter sur l'aide et le soutien précieux de nombreuses personnes, qui ont contribué, de près ou de loin, à la réalisation de ce travail.

- Je tiens particulièrement à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur RANDRIANAMBININA Blanchard, Professeur Titulaire, Président de l'Université de Mahajanga, rattaché à l'École Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN) et membre de l'Equipe d'Accueil Biodiversité animale, Ecologie et Conservation. Je lui adresse ma plus haute considération pour la qualité de son leadership dans la direction de cette université et pour l'honneur qu'il m'a fait en acceptant de présider le jury de cette thèse.

- Je souhaite remercier mon Directeur de thèse, Monsieur RASOLOHARIJAONA Solofonirina, Professeur Titulaire, Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN), Equipe d'Accueil Biodiversité animale, Ecologie et Conservation à l'Université de Mahajanga pour son soutien indéfectible, ses conseils avisés et sa confiance tout au long de ce parcours. Ses encouragements m'ont permis de surmonter de nombreux défis.

- J'exprime ma profonde gratitude à Madame RAHANTARISOA Lydia Jeanne, Maître de Conférences-HDR, Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Evolution (STE), Equipe d'Accueil Doctorale Géoressources et Environnement à l'Université d'Antananarivo pour avoir acceptée de co-diriger cette thèse malgré ses lourdes charges fonctions. Son soutien scientifique constant, sa disponibilité et le temps qu'elle m'a consacré, ont été déterminants pour la réussite de ce manuscrit. Sa patience et ses encouragements, notamment durant les moments difficiles, ont été inestimables.

- J'adresse mes vifs remerciements à Monsieur RABIBISOA Nirhy Harinelina Christian, Professeur, Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN), membre de l'Equipe d'Accueil Biodiversité animale, Ecologie et Conservation à l'Université de Mahajanga, qui a assumé les fonctions de membre du Comité de lecture et de Rapporteur interne de ce document de thèse. Malgré ses nombreuses responsabilités, il a su mettre à disposition son expertise et prodiguer des conseils éclairés qui ont été déterminants tout au long de l'élaboration de ce travail. Son soutien constant et la pertinence de ses orientations ont constitué un apport inestimable pour guider mes recherches et enrichir leur aboutissement.

- Je tiens à exprimer ma profonde reconnaissance à Monsieur RAZAFIMAHEFA, Professeur Titulaire, Vice-Président de l'Université de Mahajanga, Président du Comité de lecture et Rapporteur externe de cette thèse, rattaché à l'Ecole Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM) et membre de l'Equipe d'Accueil Doctorale Aliments, Nutrition et Sécurité Alimentaire à l'Université de Mahajanga. Malgré ses nombreuses responsabilités, il a consacré de son temps pour examiner mon travail avec une rigueur scientifique exemplaire et une bienveillance constante. Ses remarques pertinentes et ses analyses éclairées ont largement contribué à enrichir ma réflexion et à rehausser la qualité de cette recherche.

- Je tiens à exprimer ma sincère reconnaissance à Monsieur RASOANARIVO Rivoahinala, Professeur Titulaire à l'École Doctorale Génie du Vivant et Modélisation (EDGVM), membre de l'Equipe d'Accueil Valorisation pharmacologique et Cosmétiques de la Biodiversité Végétale et des Ressources Marines à l'Université de Mahajanga. Son accompagnement indéfectible, ses critiques constructives et son enthousiasme constant pour la recherche ont constitué pour moi une source précieuse d'inspiration. J'ai été particulièrement honorée par son acceptation de siéger en tant que membre du jury et d'évaluer ce travail.

- J'adresse mes remerciements à Monsieur RAKOTONIMANANA Rivoniaina Michel Jese, Maître de Conférences-HDR à l'Ecole Doctorale Sciences de la Terre et de l'Évolution (STE), membre de l'Equipe d'Accueil Doctorale Changements Globaux à l'Université d'Antananarivo. Son engagement en tant que membre du comité de lecture a représenté pour moi un appui d'une valeur inestimable. Sa grande disponibilité, la justesse de ses conseils et la rigueur de ses observations ont été déterminants pour l'aboutissement de ce travail. Je suis profondément honorée qu'il ait accepté d'assumer la fonction d'examineur de cette thèse.

- Je tiens à remercier chaleureusement mes collègues des Universités de Mahajanga et d'Antananarivo pour leur soutien inestimable tout au long de ce travail. Leurs interventions, conseils et encouragements ont été précieux.

- Mes plus sincères remerciements vont également à ma famille, en particulier à mon mari et mes trois filles, ainsi qu'à mes parents, frères et sœurs et amis. Leur soutien constant et leurs encouragements ont été essentiels à la réussite de cette étude. Je n'aurais pas pu accomplir ce travail sans leur aide précieuse.

Un grand merci à tous ceux qui m'ont soutenu et guidé tout au long de l'élaboration de cette thèse, votre aide et vos conseils ont été inestimables.

-Je tiens à adresser mes sincères remerciements aux guides et aux populations locales du Secteur d'Ambatolafia. Votre accueil chaleureux et votre disponibilité ont été des éléments importants dans la réalisation de cette recherche. Les connaissances que vous avez partagées sur votre environnement et votre culture ont enrichi mes travaux de manière inestimable. Vos soutiens et vos engagements dans ce projet m'ont permis de mieux comprendre les enjeux locaux et d'établir des liens significatifs avec la communauté. Je suis profondément reconnaissante pour votre collaboration et votre générosité.

DEDICACE

*« HOAN'I DADA MALALAKO IZAY TSY NAHANDRY NY FANDAHANA ITY VOKA-
PIKAROHANA ITY DIA LASA IANAO ! »*

DÉCLARATION SUR L'HONNEUR

Je soussignée NOROVELO Claudine, Doctorante inscrite régulièrement en 3^{ème} année de thèse, au sein de l'Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels (EDEN) de l'Université de Mahajanga, déclare sur l'honneur que durant la période de préparation de ma thèse en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat en Ecosystèmes Naturels, je n'ai pas fait de plagiat.

Fait à Mahajanga, le 21 janvier 2025

Signature

NOROVELO Claudine

TABLE DES MATIERES

	Pages
REMERCIEMENTS	i
DEDICACE	iv
DÉCLARATION SUR L'HONNEUR	v
TABLE DES MATIERES	vi
LISTE DES FIGURES	ix
LISTE DES PHOTOS	xi
LISTE DES TABLEAUX	xiii
LISTE DES ABREVIATIONS, DES ACRONYMES ET DES SIGLES	xiv
LISTE DES ANNEXES	xv
GLOSSAIRE	xvi
INTRODUCTION	1
I. Première partie : MATERIELS ET METHODES	5
I.1. Site d'étude	5
I.2. Description du site d'étude	7
I.2.1. Bassin sédimentaire de Mahajanga	7
I.2.1.1. Géographie	7
I.2.1.2. Géomorphologie	7
I.2.1.3. Climat	9
I.2.1.4. Hydrographie	11
I.2.1.5. Géologie	12
I.2.1.5.1 Formations sédimentaires	14
I.2.1.5.2 Stratigraphie du Crétacé	17
I.2.1.5.3 Crétacé moyen du bassin de Mahajanga	18
I.2.1.5.4 Etage Albien (d'Orbigny, 1842-1843)	18
I.2.1.5.5 Albien du bassin de Mahajanga	19
I.2.1.6. Formation albienne du secteur d'Ambatolafia	19
I.2.1.7. Biostratigraphie de l'Albien d'Ambatolafia	21
I.3. Matériels	22
I.3.1. Matériels utilisés sur terrain	22

I.3.2. Matériel biologique.....	22
I.3.3. Autres matériels	23
I.4. Méthodes	24
I.4.1. Recherche documentaire.....	24
I.4.2. Descente sur terrain	24
I.4.3. Collecte des données sur terrain	25
I.4.3.1. Prélèvement des sédiments	25
I.4.3.2. Collecte des fossiles	25
I.4.4. Analyse des échantillons au laboratoire.....	27
I.4.4.1. Analyses des éléments non biogéniques	27
I.4.4.1.1 Analyses géochimiques	27
I.4.4.1.2 Etude morphoscopie	30
I.4.4.2. Analyses des éléments biogéniques	32
I.4.4.2.1 Analyses des microfossiles	32
I.4.4.2.2 Analyses des macrofossiles	36
I.5. Etude de la corrélation linéaire.....	40
I.5.1. Analyses descriptives univariées	40
I.5.2. Tendances centrale	40
I.5.3. Mesures de la variabilité	40
I.5.4. Analyses descriptives bivariées	41
I.6. Régression linéaire simple.....	41
I.7. Régression linéaire multiple	43
I.7.1. Critères de validation des modèles	43
I.7.1.1. Coefficient de détermination.....	43
I.7.1.2. Coefficient de corrélation.....	44
II. Deuxième partie : RESULTATS ET INTERPRETATIONS.....	46
II.1. Eléments non biogéniques.....	46
II.1.1. Géochimie des éléments majeurs	46
II.1.2. Lithologie	47
II.1.3. Caractéristiques morphoscopiques	49

II.2. Eléments biogéniques.....	51
II.2.1. Différents groupes de microfossiles collectés	51
II.2.2. Différents groupes de macrofossiles collectés	56
II.2.2.1. Evaluation qualitative des macrofossiles.....	56
II.2.2.2. Les variations morphologiques des ammonites.....	80
II.2.2.2.1 Comparaison des paramètres morphométriques par espèce.....	80
II.2.2.2.2 Corrélation des paramètres entre espèces.....	85
II.2.2.2.3 Corrélation des paramètres morphométriques par espèces	88
III. Troisième partie : DISCUSSION	109
III.1. Lithostratigraphie de l’Albien.....	109
III.2. Paléontologie	111
III.3. Paléoécologie	114
III.4. Paléoenvironnement.....	117
III.5. Les variations des variables morphométriques.....	118
CONCLUSION	120
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	
WEBOGRAPHIE	
ANNEXES	
Publications	I
Donnée statistique des espèces	XIX

LISTE DES FIGURES

	Pages
Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude.....	5
Figure 2 : Carte de localisation du Bassin de Mahajanga.....	7
Figure 3 : Carte géomorphologique du Bassin de Mahajanga.....	9
Figure 4 : Carte hydrographique du Bassin de Mahajanga.....	11
Figure 5 : Bassins est-africains et Malgache	13
Figure 6 : Carte géologique du Bassin de Mahajanga	16
Figure 7 : Corrélation de l'Albien dans le bassin de Mahajanga.....	20
Figure 8 : Organigramme d'analyses géochimiques des sédiments	29
Figure 9 : Charte visuelle permettant l'estimation de la sphéricité et de l'éroulé des graviers et du sable.....	30
Figure 10 : Traitement physico-chimique des sédiments meubles (Cas des marnes)	34
Figure 11 : Mensuration de l'ammonite	38
Figure 12 : Coupe lithologique d'Ambatolafia.....	48
Figure 13 : Répartition des microfossiles de l'Albien d'Ambatolafia.....	55
Figure 14 : Répartition des mollusques dans le Secteur d'Ambatolafia.....	78
Figure 15 : Répartition des ammonites suivant leur mode d'enroulement.....	79
Figure 16 : Comparaison des diamètres de coquilles entre espèces	85
Figure 17 : Comparaison des épaisseurs de la section du tour de coquilles entre espèces....	86
Figure 18 : Comparaison des hauteurs de la section du tour de coquilles entre espèces.....	87
Figure 19 : Régression linéaire entre le diamètre et épaisseur de la section du tour de la coquille de <i>Douvilleiceras mammillatum</i>	88
Figure 20 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Douvilleiceras mammillatum</i>	89
Figure 21 : Régression linéaire entre l'épaisseur et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Douvilleiceras mammillatum</i>	90
Figure 22 : Régression linéaire entre le diamètre et l'épaisseur de la section du tour de la coquille de <i>Cleoniceras besairiei</i>	91
Figure 23 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Cleoniceras besairiei</i>	92
Figure 24 : Régression linéaire entre l'épaisseur et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Cleoniceras besairiei</i>	93

Figure 25 : Régression linéaire entre le diamètre et l'épaisseur de la section du tour de la coquille de <i>Phylloceras velledae</i>	94
Figure 26 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Phylloceras velledae</i>	95
Figure 27 : Régression linéaire entre l'épaisseur et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Phylloceras velledae</i>	96
Figure 28 : Régression linéaire entre le diamètre et l'épaisseur de la section du tour de la coquille de <i>Noesilesites ambatolafiensis</i>	97
Figure 29 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Noesilesites ambatolafiensis</i>	98
Figure 30 : Régression linéaire entre l'épaisseur et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Noesilesites ambatolafiensis</i>	98
Figure 31: Régression linéaire entre le diamètre et l'épaisseur de la section du tour de la coquille de <i>Puzosia malandiandroensis</i>	99
Figure 32 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Puzosia malandiandroensis</i>	100
Figure 33 : Régression linéaire entre l'épaisseur et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Puzosia malandiandroensis</i>	101
Figure 34 : Régression linéaire entre le diamètre et l'épaisseur de la section du tour de la coquille de <i>Puzosia sp</i>	102
Figure 35 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Puzosia sp</i>	103
Figure 36: Régression linéaire entre l'épaisseur et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Puzosia sp</i>	104
Figure 37 : Régression linéaire entre le diamètre et l'épaisseur de la section du tour de la coquille de <i>Neosilesites maximus</i>	105
Figure 38 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Neosilesites maximus</i> , Collignon 1963	106
Figure 39 : Régression linéaire entre l'épaisseur et hauteur de la section du tour de la coquille de <i>Neosilesites maximus</i> , Collignon 1963.....	107

LISTE DES PHOTOS

	Pages
Photo 1 : Site d'étude(A) Lieu d'excavation, (B) Puits, (C) Affleurement dans le puits du site d'étude.....	6
Photo 2 : Différente vue d'une ammonite	23
Photo 3 : Pied à coulisse.....	23
Photo 4 : Moyens de transport utilisé (a : pirogue, b : tracteur).....	25
Photo 5 : Puits d'extraction des fossiles (A : puits couvert par un toit en paille, B : descente dans le puits, C : affleurement et mesure de couche, D : intérieur du puits).....	27
Photo 6 : Etapes de la préparation des microfossiles	33
Photo 7 : Préparation et triage des échantillons	37
Photo 8 : Morphoscopie des différentes couches lithologiques (CN°1 à CN°6) d'Ambatolafia	50
Photo 9 : Vue externe de l'espèce <i>Dyctyothyris coartata</i> ,	51
Photo 10 : Vue externe de l'espèce <i>Dyctyothyris coartata</i> , PARKINSON, 1811.....	51
Photo 11 : Vue externe de l'espèce <i>Cepatia cepacea</i>	52
Photo 12 : Vue externe de l'espèce <i>Rissoacea sp</i>	52
Photo 13 : Vue externe de l'espèce <i>Cyclozyga sp</i>	53
Photo 14 : Vue externe de l'espèce <i>Rissoa membranacea</i>	53
Photo 15 : Vue extere de l'espèce <i>Leptotygyma carrizoensis</i>	53
Photo 16 : Vue externe de l'espèce <i>Solen sloanni</i>	54
Photo 17 : Vue externe de l'espèce <i>Hydrobia dubuissoni</i>	54
Photo 18 : Différente vue de l'espèce <i>Douvilleiceras mammillatum</i>	57
Photo 19 : Différente vue de l'espèce <i>Douvilleiceras albense</i>	58
Photo 20 : Différente vue de l'espèce <i>Cleoniceras besairiei</i>	59
Photo 21 : Vue ombicale de l'espèce <i>Cleoniceras madagascarensis</i>	59
Photo 22 : Différente vue de l'espèce <i>Phylloceras velledae</i>	60
Photo 23 : Différente vue de l'espèce <i>Eotetragonites umbilicostratus</i>	61
Photo 24 : Différente vue de l'espèce <i>Puzosia nov.sp</i> ,	62

Photo 25 : Différentes vues de l'espèce <i>Puzosia malandiandroensis nov.sp</i>	63
Photo 26 : Différente vue de l'espèce <i>Neosilesites ambatolafiensis</i>	64
Photo 27 : Vue ombilicale de l'espèce <i>Neosilesites maximus</i>	65
Photo 28 : Différente vue de l'espèce <i>Scaphites manasoensis nov.sp</i>	66
Photo 29 : Vue latérale <i>Plesiohamites sp</i>	67
Photo 30 : Vue latérale de l'espèce <i>Pictetia asteriana</i>	68
Photo 31 : Vue latérale de l'espèce <i>Hemiptychoceras sp</i>	68
Photo 32 : Vue latérale de l'espèce <i>Metahamites sp.aff.sablieri</i>	69
Photo 33 : Vue latérale de l'espèce <i>Ephamulina cf.arcuta</i>	70
Photo 34 : Différente vue de l'espèce <i>Cymatoceras (Nautilus) sakalavus</i>	71
Photo 35 : Vue externe de l'espèce <i>Venelicardia lineolata</i>	72
Photo 36 : Vue externe de l'espèce <i>Arca chavani</i>	73
Photo 37 : Différente vue de l'espèce <i>Gyrodos aff.tenelis</i>	74
Photo 38 : Vue latérale de l'espèce <i>Périscooperai besairiei</i>	75
Photo 39 : Différente vue de l'espèce <i>Terebratula sella</i>	76

LISTE DES TABLEAUX

	Page
Tableau 1 : Paramètres climatiques du bassin de Mahajanga	10
Tableau 2 : Échelle stratigraphique du Crétacé.....	17
Tableau 3 : Stratotype de l'Albien et les décisions du Colloque sur le Crétacé moyen in Collignon 1965	21
Tableau 4 : Classification des foraminifères	35
Tableau 5 : Répartition des éléments majeurs contenus dans les sédiments prélevés dans le Secteur d'Ambatolafia.....	46
Tableau 6 : Lithologie du site d'étude.....	47
Tableau 7 : Tableau récapitulatif de corrélation morphologique des ammonites étudiées	84

LISTE DES ABREVIATIONS, DES ACRONYMES ET DES SIGLES

AMBL	: Code échantillon
CN	: Couche Numéro 1 à 7
ESP1	: <i>Douvilleiceras mammillatum</i> , Schlotheim, 1813
ESP2	: <i>Cleoniceras besairiei</i> , Collignon, 1949
ESP3	: <i>Phylloceras velledae</i> , Michelin, 1945
ESP4	: <i>Noesilesites ambatolaftiensis</i> , Collignon, 1963
ESP5	: <i>Puzosia malandiandroensis</i> , Collignon, 1963
ESP6	: <i>Puzosia sp</i> Collignon, 1963
ESP7	: <i>Neosilesites maximus</i> , Collignon 1963
GPS	: Global Positioning System
IC	: Intervalle de Confiance
Ma	: Million d'année
OMNIS	: Office des Mines Nationales et des Industries Stratégiques

LISTE DES ANNEXES

Annexe I	: PUBLICATIONS.....	I
Annexe II	: Donnée statistique des espèces	XIX

GLOSSAIRE

- **La stratigraphie** est une branche de la géologie qui étudie la succession, la nature et l'organisation des couches de roches (appelées strates ou couches sédimentaires) dans la croûte terrestre. Elle permet de reconstituer l'histoire géologique d'une région et de dater les formations géologiques.
- **Le taux d'accommodation** est le rapport entre l'augmentation de l'espace disponible pour les sédiments et le temps, exprimé en mètres par million d'années (m/Ma) ou équivalent.
- **L'ontogénie** (ou ontogénèse) est l'ensemble des étapes du développement d'un organisme, depuis la fécondation de l'œuf (ou la formation initiale de l'organisme) jusqu'à l'âge adulte, voire jusqu'à la mort.
- **La phylogénie** est la science qui étudie les relations évolutives entre les espèces (ou groupes d'organismes) à partir de leur origine commune. Elle vise à reconstituer l'histoire évolutive des êtres vivants, en identifiant les ancêtres communs et les divergences qui ont conduit à la diversité actuelle du vivant.
- **Le Mésozoïque** est une ère géologique qui s'étend d'environ 252 millions d'années à 66 millions d'années avant notre ère. Il suit le Paléozoïque et précède le Cénozoïque.
- **L'eustatisme** (ou eustatisme marin) désigne les variations globales du niveau marin causées par des changements dans le volume des eaux océaniques ou dans la configuration des bassins océaniques. Ces variations sont globales (à l'échelle de la planète), par opposition aux changements locaux du niveau marin liés à la tectonique ou à l'isostasie.
- **Un organisme planctonique** est un organisme aquatique (animal ou végétal) qui flotte ou dérive avec les courants, généralement dans les couches superficielles de l'eau.
- **Un organisme nectonique** est un organisme aquatique capable de se déplacer activement dans l'eau, indépendamment des courants. Contrairement aux organismes planctoniques qui dérivent, les nectoniques nagent activement pour se déplacer, chasser ou fuir des prédateurs.
- **Un organisme benthique** est un organisme qui vit sur le fond ou dans les sédiments d'un milieu aquatique, que ce soit au fond de la mer, d'un lac ou d'une rivière. Le terme « benthique » vient du mot grec *benthos* qui signifie « fond ». En général, c'est un organisme fouisseur.
- **Une cuesta** est une colline ou un plateau asymétrique créée dans des terrains sédimentaires inclinés, où l'érosion met en évidence l'alternance entre couches dures (calcaires, grès) et tendres (argiles, marnes).
- **Un organisme pélagique** est un organisme aquatique qui vit dans la colonne d'eau, loin du fond et loin des côtes, c'est-à-dire dans le milieu ouvert des océans, mers ou lacs. Le terme "pélagique" vient du grec *pelagos* qui signifie « haute mer ». Il peut être planctonique ou nectonique.

- **Les éléments non biogéniques** sont des éléments chimiques qui ne sont pas produits par les organismes vivants.

INTRODUCTION

INTRODUCTION

Madagascar, située au sud-est de l'Afrique, s'est détachée du Gondwana au Crétacé supérieur. Cette grande île abrite une flore et une faune exceptionnellement diversifiées, constituant un véritable trésor biologique. Elle possède également de nombreux sites paléontologiques et géologiques, patrimoines régionaux témoignant d'une biodiversité et d'environnements caractéristiques. Les sédiments de ces sites conservent, sous forme de fossiles, les traces d'événements survenus au cours de millions d'années, événements ayant parfois conduit à des changements environnementaux, voire à la disparition totale ou partielle de ces écosystèmes. Ces sites sont menacés par les activités humaines (exploitation) et les phénomènes naturels.

Les ammonites ont connu une évolution morphologique particulièrement marquée au cours des 180 millions d'années du Mésozoïque. Cette lignée de céphalopodes a présenté une diversification remarquable, tant en termes de taille que de formes de coquille et d'ornementation (Monnet, Bucher & Guex, 2010). Cette évolution rapide, combinée à une vaste diversité taxonomique, fait des ammonites d'excellents fossiles guides pour la biostratigraphie (Wiedmann, 1966). Grâce à leur abondance, leur large distribution géographique et leur renouvellement évolutif rapide, elles permettent une datation relativement précise des couches géologiques dans lesquelles elles sont retrouvées, bien que cette précision puisse varier selon les contextes locaux (Mutterlose, 1984).

À l'époque mésozoïque, les ammonites coexistaient et coévoluaient avec d'autres groupes d'invertébrés marins tels que les gastéropodes, les bivalves, les brachiopodes, les échinodermes et les foraminifères (Cecca, 1999). Si les affleurements fossilifères présentent souvent une faune diversifiée, les ammonites demeurent néanmoins les marqueurs stratigraphiques les plus efficaces pour les corrélations à grande échelle, en particulier dans les formations marines (Korn, 2010).

Le site fossilifère albien d'Ambatolafia, situé dans le bassin sédimentaire de Mahajanga, au nord-ouest de Madagascar, représente une zone d'étude particulièrement riche et précieuse en raison de la diversité et de l'abondance des ammonites qui y ont été découvertes. Plusieurs espèces et genres distincts ont été décrits à partir des fossiles collectés sur ce site, contribuant de manière significative à la compréhension de la taxonomie des ammonites du Crétacé (Collignon, 1963). L'analyse approfondie de la faune ammonitique permet non seulement d'approfondir les connaissances sur la biodiversité marine du Crétacé à Madagascar, mais également d'apporter des éléments essentiels à la compréhension

des dynamiques évolutives et des changements environnementaux qui ont marqué cette période géologique (Cecca, 1999).

La première reconnaissance de l'Albien dans le nord-ouest de Madagascar est due à Mouneyre & Baron (1904), à partir d'études géologiques. Leurs travaux ont considérablement amélioré la connaissance géologique de l'Albien dans cette partie du bassin sédimentaire de Mahajanga, leurs observations stratigraphiques et paléontologiques restant une référence pour la compréhension de cette période. Douvillé (1904) a exploré plusieurs niveaux repères à ammonites, permettant de subdiviser l'Albien. En 1910, Colcanap a étudié les formations géologiques du district d'Analalava (côte nord-ouest de Madagascar), découvrant notamment le gisement de Berambo. Barrabé (1929) a publié des travaux importants sur les formations géologiques de l'Albien (Crétacé moyen, environ 113 à 100 millions d'années) dans le nord-ouest de Madagascar. Ses recherches ont porté sur la stratigraphie des dépôts albiens du bassin de Mahajanga, l'identification et la description des fossiles caractéristiques, et la reconstitution des paléoenvironnements. Par la suite, Bésairie & Hourq (1933) ont réalisé une cartographie géologique détaillée du bassin de Mahajanga, mettant en évidence de nouveaux gisements albiens.

Les travaux de Saint-Ours (1952) ont été importants pour la paléontologie malgache, apportant des éclairages sur l'évolution et la distribution géographique des faunes marines du Crétacé, et enrichissant la compréhension des écosystèmes marins de l'Albien. Razafimbelo (1963) a réalisé des études régionales dans la province de Mahajanga, examinant la stratigraphie et les ressources naturelles (potentiel minier et pétrolier), influençant ainsi les projets d'exploration ultérieurs. Collignon (1965) a présenté, lors d'un colloque sur le Crétacé moyen, des travaux sur l'Albien de Madagascar, étudiant la diversité des fossiles marins (ammonites, bivalves, etc.) et contribuant ainsi durablement à la compréhension des écosystèmes marins de l'époque et à l'importance des fossiles albiens pour l'étude de l'évolution marine.

Randrianasolo (1986) a mené des études sur l'Albien des régions de Mahajanga et d'Antsiranana à Madagascar, contribuant significativement à la compréhension géologique et paléontologique (microfossiles) de ces zones.

Jusqu'à présent, le gisement fossilifère d'Ambatolafia n'avait pas fait l'objet d'une étude scientifique complète. Rakotonimanana (2006, 2023) a réalisé la première étude systématique, basée sur l'analyse morphologique et biométrique, mettant en évidence une variabilité ontogénique parfois aléatoire chez les *Cleoniceras* et *Desmoceras latidorsatum* albiens d'Ambatolafia. En 2016, ses recherches se sont concentrées sur une étude approfondie

de l'ontogénie et de la phylogénie des *Cleoniceras*, constituant une première étude phylogénique de ce genre sur les invertébrés fossiles de Madagascar.

Les travaux réalisés à Ambatolafia se concentrent principalement sur l'étude de la faune, notamment les ammonites. Rasolofonindrina (2022) a tenté de caractériser les dépôts sédimentaires de ce secteur riche en fossiles et de dater précisément ces formations à partir de l'étude des microfossiles (foraminifères, microgastéropodes), apparus au Crétacé. Malgré l'exploitation importante des ammonites, ce secteur demeure encore une zone de recherche importante. Norovelo *et al.* (2020) ont mis en évidence la présence d'ammonites déroulées, particulièrement abondantes dans le secteur d'Ambatolafia. Cette concentration suggère des conditions paléoenvironnementales favorables à leur développement ou leur préservation, et pourrait constituer un indicateur stratigraphique ou paléobiologique significatif pour la région.

Cette thèse propose une étude paléontologique approfondie des fossiles contenus dans les roches sédimentaires, afin de mieux caractériser l'association faunistique de l'Albien d'Ambatolafia et vise également à enrichir notre compréhension de l'évolution des espèces et des écosystèmes qui ont existé durant cette période albienne. En intégrant des analyses taxonomiques et stratigraphiques, nous espérons fournir des éléments nouveaux sur la biodiversité et les interactions écologiques de l'époque.

L'objectif principal de cette étude est de contribuer à l'étude paléontologique des fossiles contenus dans les roches sédimentaires afin de mieux caractériser l'association faunistique de l'Albien d'Ambatolafia ayant existé durant la période albienne.

Elle a pour objectifs spécifiques nous permettent de :

- Etablir la coupe lithologique d'Ambatolafia ;
- Faire une analyse géochimique des sédiments ;
- Inventorier la faune d'invertébrés (macro et microfossiles) ;
- Déterminer les caractéristiques paléoenvironnementaux et paléoécologiques du Secteur d'Ambatolafia à l'Albien ;
- Analyser la composition de la faune d'invertébrés de l'Albien du Secteur d'Ambatolafia.

Pour atteindre ces objectifs, le manuscrit est structuré en trois grandes parties. La première partie est consacrée à la présentation des matériels et des méthodes adoptées. Elle conçoit une description détaillée du site d'étude, ainsi qu'un aperçu de la géographie physique et de la géologie du bassin sédimentaire de Mahajanga. La deuxième partie expose les résultats obtenus, notamment les données paléontologiques et sédimentologiques, suivies de leur interprétation, en mettant l'accent sur les caractéristiques de la paléoécologie de

l'Albien et sur les conditions de dépôt des sédiments. Enfin, la troisième partie est consacrée à une discussion approfondie, et à comparer les données d'Ambatolafia avec d'autres régions présentant des affleurements de l'Albien.

Première partie :
MATERIELS ET METHODES

Première partie : MATERIELS ET METHODES

I.1. Site d'étude

Le site d'étude se trouve dans le bassin sédimentaire de Mahajanga, dans la partie nord-ouest de Madagascar. Le Secteur d'Ambatolafia où l'on a effectué la collecte des échantillons est localisé à 30 km au nord nord-est de la Commune Rurale de Sitampiky, à 100 km au sud de Mahajanga et à 60 km au sud-ouest du District d'Ambato-Boeny (Figure 1). Les coordonnées géographiques de ce site d'étude sont :

- Latitude : $16^{\circ} 29' 42''$ S ;
- Longitude : $46^{\circ} 15' 48''$ E ;
- Altitude : 100 m.

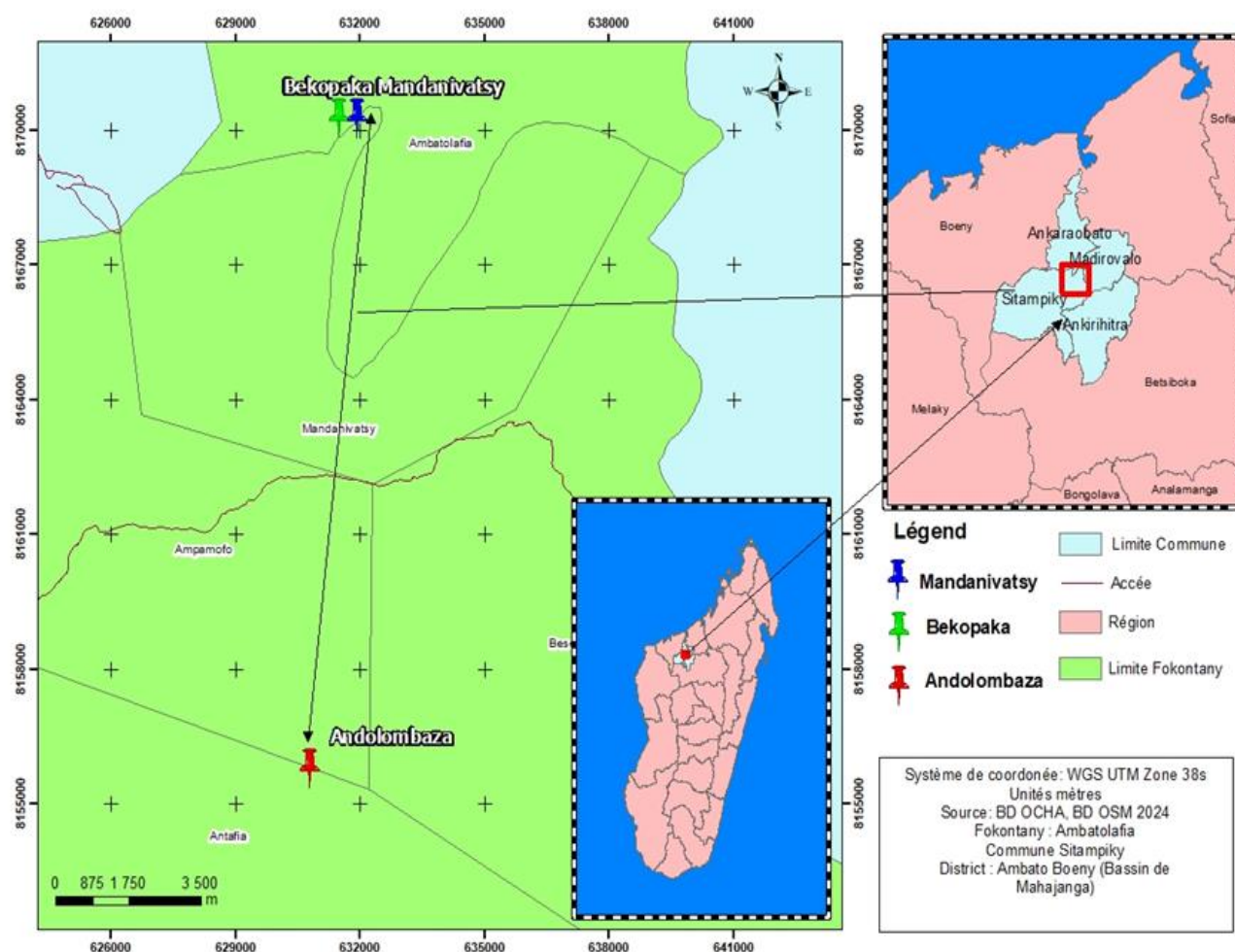


Figure 1 : Carte de localisation de la zone d'étude

Source : BD 500, modifiée par l'auteur

A la suite d'une prospection effectuée dans le District de Sitampiky, une carrière située au nord du Secteur d'Ambatolafia a été choisie. Les sites de prélèvement des échantillons sont formés par un ensemble de collines. La première colline est située dans la partie est, dite Mandanivatsy, nommée « site A ». La deuxième est située sur la colline de Bekopaka non loin de Mandanivatsy, nommée « site B ». La troisième Andolombazaha localisée à l'ouest appelé « site C ». Ces sites se situent respectivement à 3- 6 km du Secteur d'Ambatolafia (Photo 1).

Site 1 : Mandanivatsy : altitude 198 m, 16°40.611'Sud, 46°13.583'Est

Site 2 : Bekopaka : : altitude 208, 16°32,759'Sud, 046°13.930'Est

Site 3 : Andolombazaha : altitude 193m, 16°32.761' Sud, 046°14.181' Est



Photo 1 : Site d'étude(A) Lieu d'excavation, (B) Puits, (C) Affleurement dans le puits du site d'étude

I.2. Description du site d'étude

I.2.1. Bassin sédimentaire de Mahajanga

I.2.1.1. Géographie

Le bassin sédimentaire de Mahajanga (Figure 2) s'étend le long de la côte nord-ouest de Madagascar. Il est limité par la presqu'île d'Ampasindava au nord et l'anticlinal cristallin du Cap St André au sud (Bésairie & Collignon, 1972), défini par les coordonnées : latitude 13° et 17° sud et de longitude 43° et 48° est. Il est adossé au socle cristallin à l'est, marqué par une falaise bordière des hautes terres dans les zones des plateaux de Kamoro et du nord de Tsaratanàna. Il s'ouvre sur le Canal de Mozambique à l'ouest.

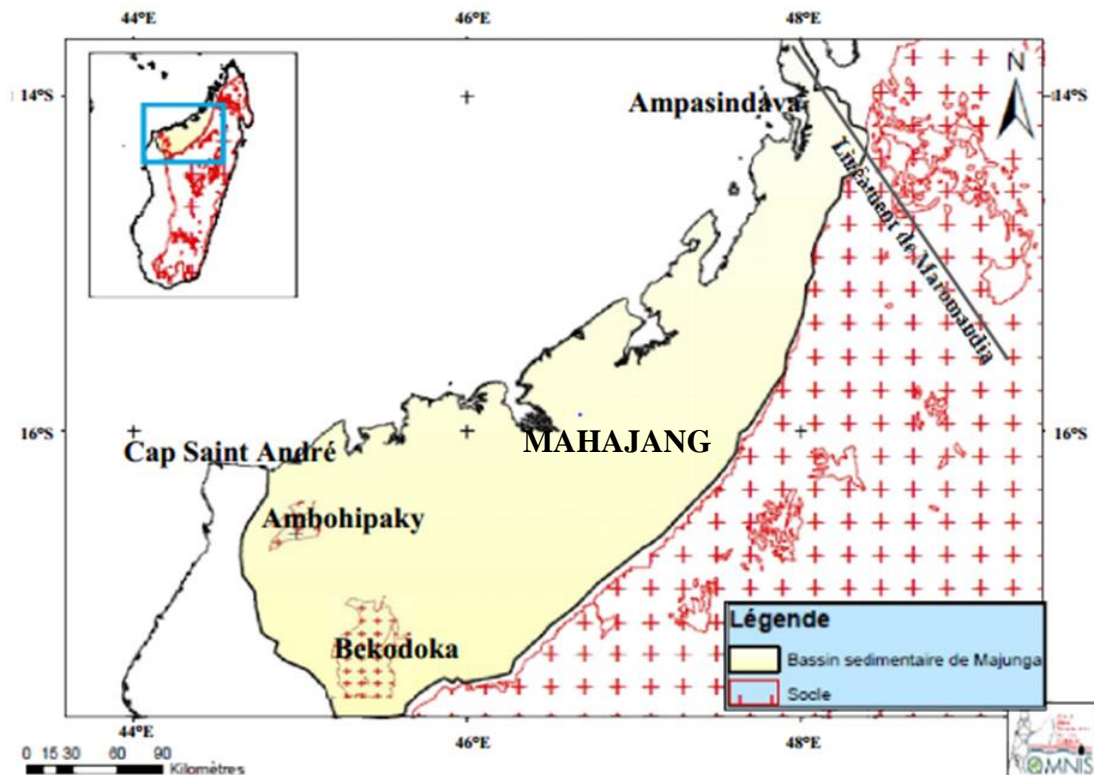


Figure 2 : Carte de localisation du Bassin de Mahajanga

Source : OMNIS, modifiée

I.2.1.2. Géomorphologie

Les séries sédimentaires du Bassin de Mahajanga, sont généralement, plus ou moins concordantes, avec un léger pendage vers l'ouest. Les paysages sont généralement aplanis d'altitude au-dessous de 1300 m. Ils sont caractérisés par des méso-reliefs et accidentés par de grès durs appelés cuestas dans des massifs volcaniques du Crétacé. Les reliefs karstiques

tels que les plateaux calcaires de Bedoboka, ainsi que des plaines dont celle de Marovoay sont les plus connus (Figure 3).

Il y a de nombreuses cuestas situées :

- Dans la Presqu'île Radama entre les fleuves Sofia et Mahajamba ;
- À l'ouest de la Presqu'île d'Ampasindava, entre les fleuves Loza et Sofia sont recouvertes de coulées basaltiques datées de Maastrichtien.
- Des vastes plateaux calcaires, les plus reconnus sont :
 - Le plateau de Bongolava formé par le revers de la cuesta d'âge Crétacé ;
 - Les plateaux entre Sofia et Mahajamba, ou ils sont surmontés par des carapaces sableuses ;
 - Le plateau de l'Ankara et du Kelifely engendrant la formation d'un relief karstique ainsi que des dolines.

Plusieurs cuvettes alluviales se développent aux environs d'Antsohihy, de Maevarano, et de l'Anjingo. Les coulées basaltiques du Crétacé, affleurent sur les deux tiers de la longueur du bassin (Bésairie & Collignon 1972).

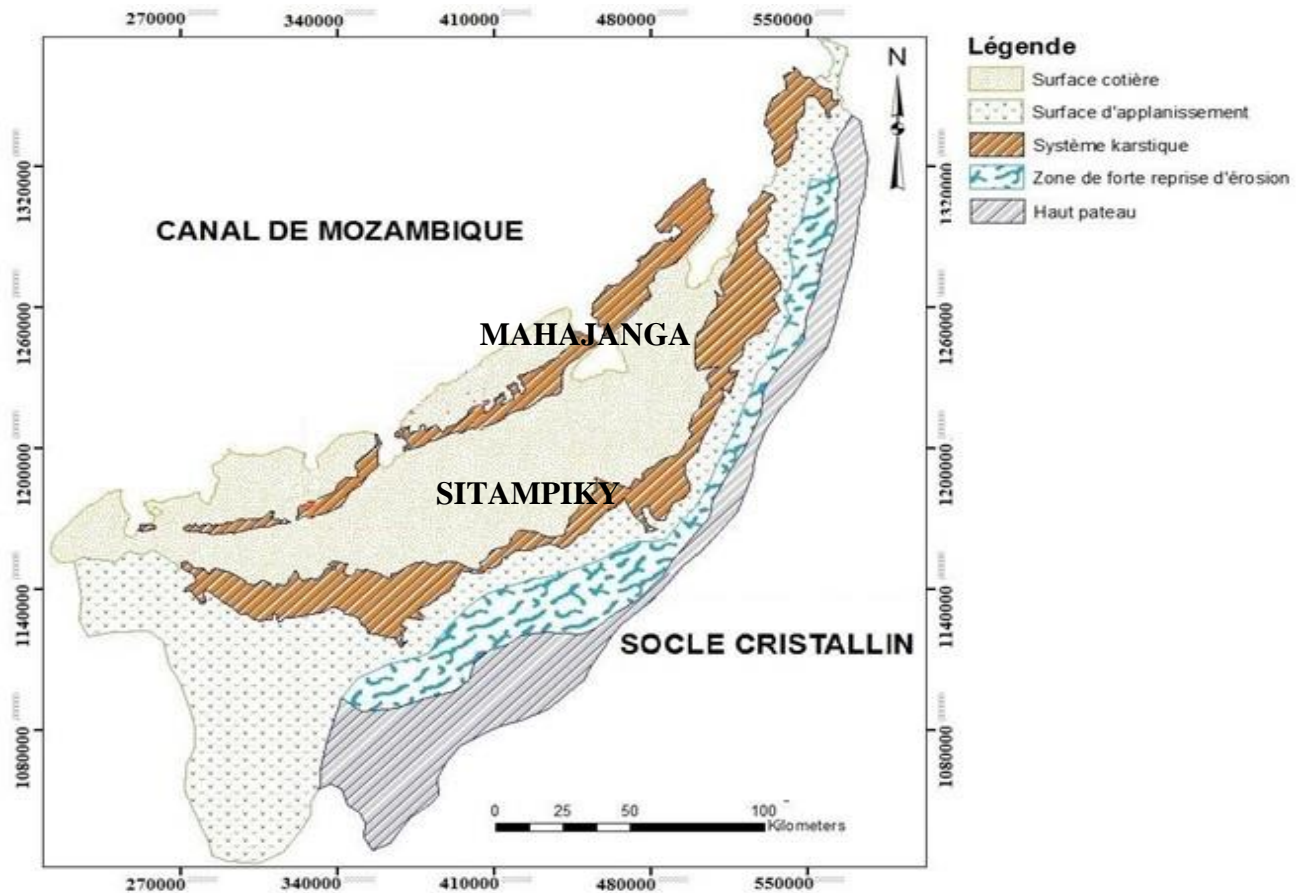


Figure 3 : Carte géomorphologique du Bassin de Mahajanga
 Source : BD 500, modifiée

I.2.1.3. Climat

Une partie des Régions de Sofia et de Boeny constituent le bassin sédimentaire de Mahajanga. Alors les paramètres climatologiques du bassin sont repartis à partir de ces deux Régions. Le climat du bassin est dominé par un climat chaud et sec. Sept sur douze mois sont marqués par la saison sèche et les cinq mois restant constituent la saison humide (Service météorologique, 2018). Le tableau 1 montre les paramètres climatiques suivant les deux (02) Régions constituant le bassin.

Le bassin sédimentaire de Mahajanga est caractérisé par une température globalement chaude avec une moyenne annuelle de 25 °C. En général, le minimal est atteint au mois de juin et juillet et le maximal entre le mois d'août et décembre. Selon les données disponibles de la Région, la température n'a cessé d'augmenter depuis les 30 ans passés (Randrianarisoa, Rasolonjatovo, Randrianasolo, 2020).

La saison pluvieuse s'étale du mois de décembre jusqu'au mois d'avril et qui subit ainsi une baisse depuis 30 ans. Vers 1986, le cumul des précipitations pendant la saison

de pluies était autour de 1500 mm et en 2016, il est diminué jusqu'à 1200 mm. La saison des pluies est de plus en plus courte, elle commence tard et finit tôt : en 30 ans elle s'est écourtée de 20 jours en moyenne. Si la durée était d'environ 100 jours, vers 2016, elle ne s'étalait

plus qu'à moins de 80 jours. Depuis 2016, la saison a tendance à finir début mars. L'apport pluviométrique moyen journalier est 150 mm sur ces 30 dernières années.

Les vents sont modérés toute l'année, ils sont de 10 à 30 km/h dans 85 % des cas, avec dominance de l'Alizé, du sud-est d'avril au septembre. Le vent de Mousson venant du nord-ouest d'octobre à mars et le « Varatraza » qui souffle en août-septembre est un vent desséchant et peut avoir une influence néfaste sur la floraison du riz. A ces vents s'ajoutent deux autres de moindre importance quant à leur durée et/ou force :

- Le Gosity précédant la saison sèche, qui peut parfois devenir violent et qui souffle du sud-ouest ;
- Le Talio soufflant durant la saison humide toujours accompagné de pluies torrentielles.

Tableau 1 : Paramètres climatiques du bassin de Mahajanga

Paramètre	Température	Pluviométrie		Vent
région	moyenne annuelle	moyenne annuelle		
Boeny	26°C	Crue	1250 mm	20 à 30 km/h
		Etiage	125 mm	
Sofia	24°C	Crue	1500 mm	10 à 20 km/h
		Etiage	500	

Source : Service Météorologique, 2018

I.2.1.4. Hydrographie

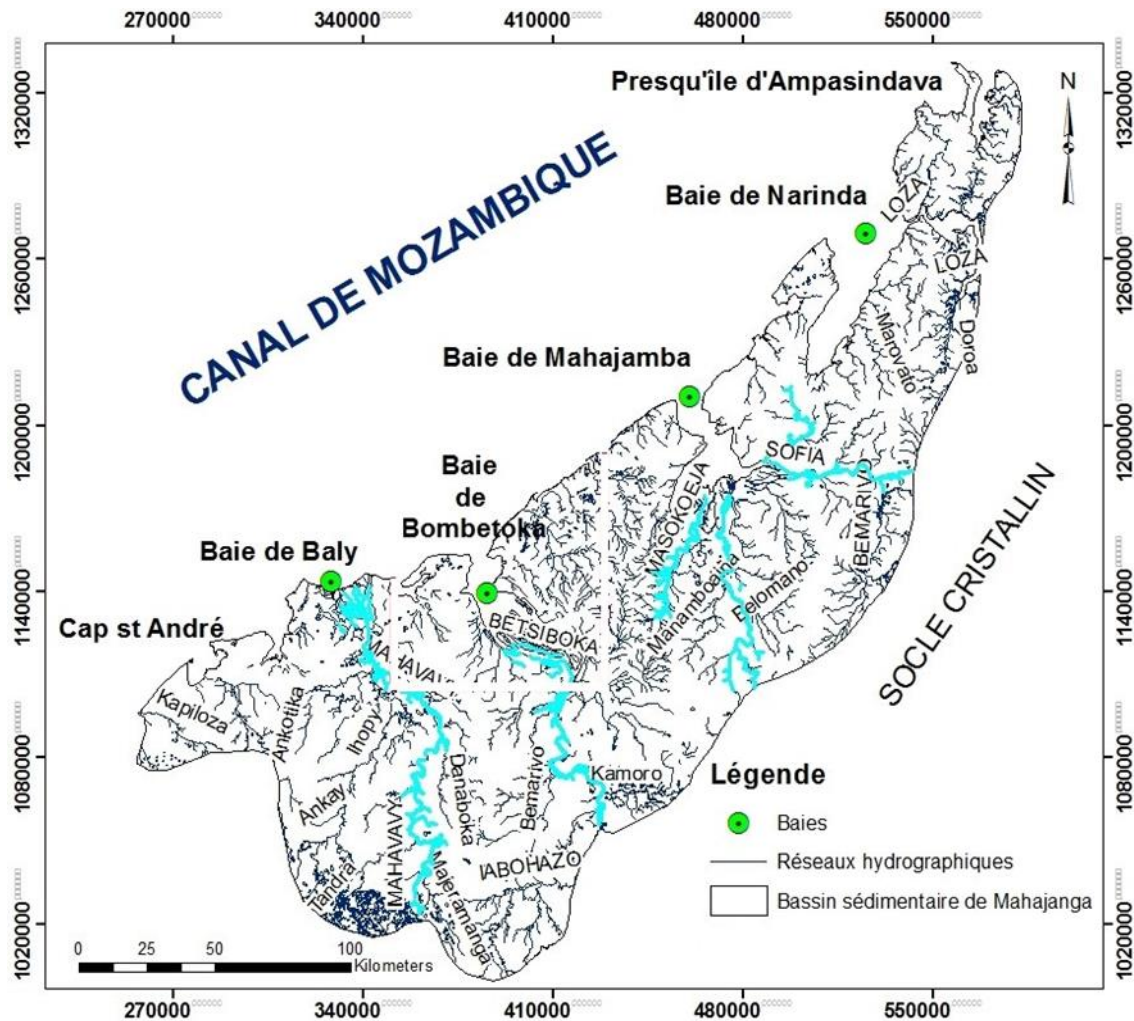


Figure 4 : Carte hydrographique du Bassin de Mahajanga

Source : BD 500, modifiée

Des potentiels réseaux hydrographiques sont observés sur le bassin sédimentaire de Mahajanga. Mais il se divise en quatre (04) fleuves principaux tels que : les fleuves de la Sofia, la Mahajamba, la Betsiboka et la Mahavavy. Ces fleuves présentent une grande ressemblance selon leur direction d'écoulement (non-sens) où ils se jettent vers la mer à travers des baies correspondantes. La figure 4 montre le fleuve Sofia qui s'est évacué par la baie de Narinda, le fleuve Mahajamba par la baie de Mahajamba, le fleuve Betsiboka par la baie de Bombetoka et enfin le fleuve de Mahavavy sud par la baie de Baly.

I.2.1.5. Géologie

L'ouverture du bassin s'est effectuée en deux étapes (Razafimbelo, 2015) :

- **Etape 1- stade syn-rift Permo-Triasique et Jurassique inférieur** : caractérisée par le jeu syn-sédimentaire des accidents cassants et une subsidence variable d'une zone à l'autre du bassin. Elle correspond à une période d'extension et de distension entre Madagascar et l'Afrique (Figure 5). C'est un événement qui a conduit Madagascar et l'Inde à suivre une trajectoire vers le Sud avec une direction SE, suivant la Ride de Davie, pour enfin s'immobiliser au large du Mozambique au Crétacé inférieur (130 ± 125 Ma). Le rifting s'est bloqué au Crétacé inférieur transformant ainsi la côte ouest de Madagascar en marge passive où s'est déroulé un cycle de transgression-régression jusqu'à la fin du Crétacé ;
- **Etape 2 - stade post-rift : fin de la sédimentation syntectonique** : c'est un événement majeur de distension durant le Crétacé supérieur qui a conduit à la séparation de Madagascar et de l'Inde. Cet épisode, accompagné par d'importants épanchements de basaltes (âge 50,6 à 87,6 Ma) sur Madagascar, a entraîné l'île vers le nord jusqu'à sa position actuelle.

Les dépôts Karroo sont contrôlés par les failles qui limitent les sous-structures, tandis que la mise en place des séries sus-jacentes est contemporaine de la subsidence d'ensemble du bassin, basculant alors vers le nord-ouest. A la hauteur de Mahajanga même, des failles listriques à effondrement vers le nord-ouest sont scellées par les dépôts turoniens, suggérant ainsi que l'émersion est, au moins en partie, due à ce basculement du bassin vers le nord-ouest.

Ce type de bassin est bien connu par son profil profondément dissymétrique et l'existence de deux grands cycles sédimentaires correspondant aux périodes anté- et post-ouverture; (Perrodon, 1980). Le stade anté-ouverture (Karoo), est caractéristique du type rift, avec une prédominance de mouvements verticaux en horst et graben et une sédimentation très diversifiée. La période correspondant approximativement à l'ouverture, est généralement caractérisée par des formations d'évaporites, souvent associées à des argiles et des marnes noires riches en matière organique.

Toujours d'après Perrodon, 1980, le stade post-ouverture, en position de bordure de plate-forme, se traduit par le développement progressif des fossés marins, et souvent des faciès de plus en plus profonds. Sur le plan structural, les pendages des dépôts sont

orientés vers la côte, passant souvent à des formations progradantes. Les effets de la gravité et de la sous-compaction se traduisent par des rides d'argiles et un lavis de failles listriques.

La géométrie du système de failles normales en marge passive peut être modifiée substantiellement par des dépôts de sel tectonique. Les diapirs de sel, sels en coussinets et les murs de sel remontent en réponse au mouvement des failles normales. Dans certains cas, la remontée des flux de sel se fait dans le niveau stratigraphique supérieur, l'épanchement peut se faire latéralement et former une couche de sel allochtone. Cette couche se comporte comme un détachement basal d'une nouvelle génération de failles normales qui affecte uniquement les couches qui surmontent le niveau de sel allochtone. En raison de l'interaction complexe entre la gravité et la direction des failles, le dépôt et le mouvement du sel, l'architecture structurale des bassins de marge passive a tendance à être extrêmement complexe (Van Der Pluijm, 2004).

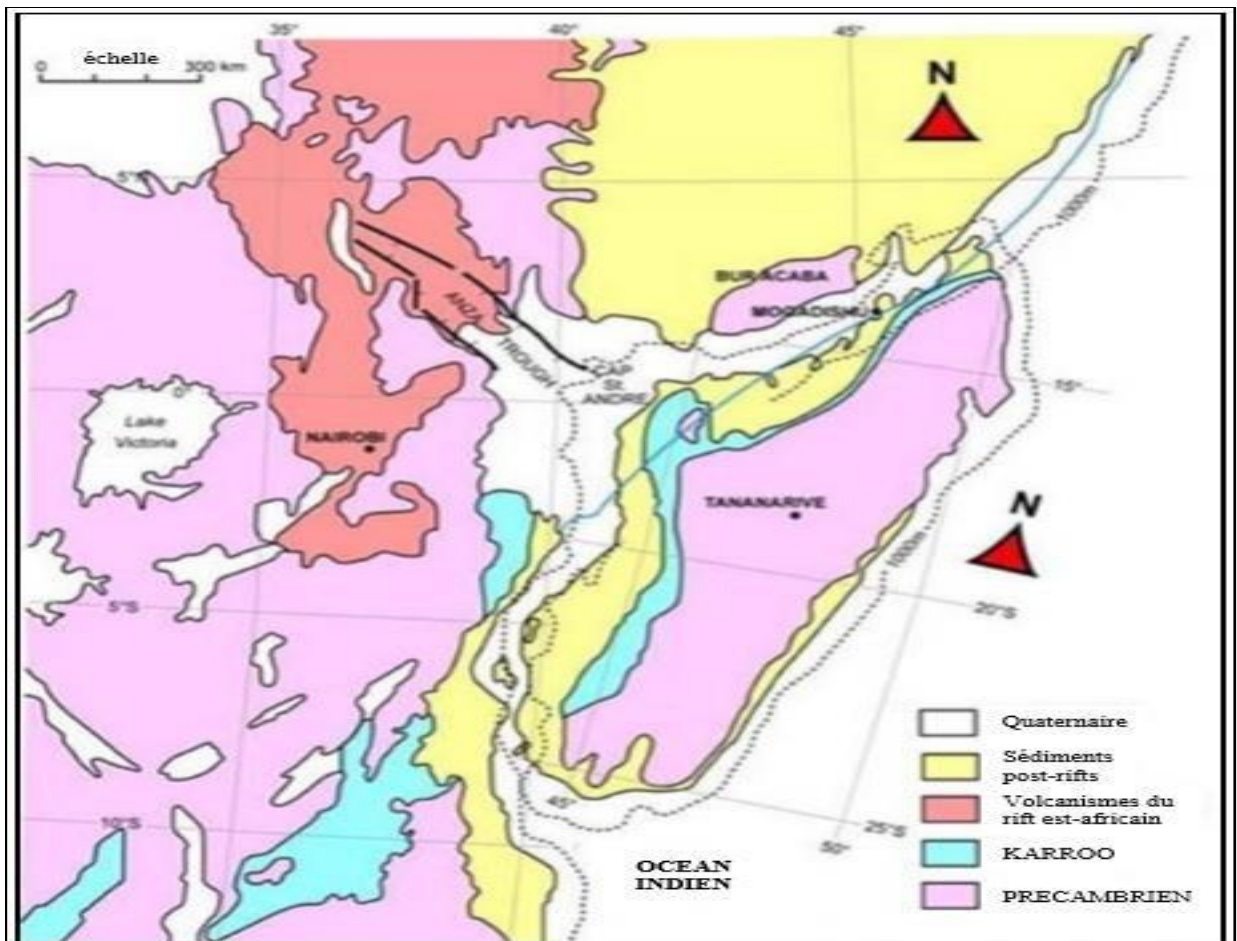


Figure 5 : Bassins est-africains et Malgache

Source : Reeves *et al.* ,2002

I.2.1.5.1 Formations sédimentaires

Le bassin sédimentaire de Mahajanga est représenté par deux (02) grandes formations, le Karroo et le Post-Karroo (Bésairie & Collignon ,1972) (Figure 6).

- **Formation Karroo**

Elle date du Permien supérieur au Jurassique moyen. Le Groupe Sakoa est absent dans le bassin de Mahajanga. Il y a, ainsi, de bas en haut :

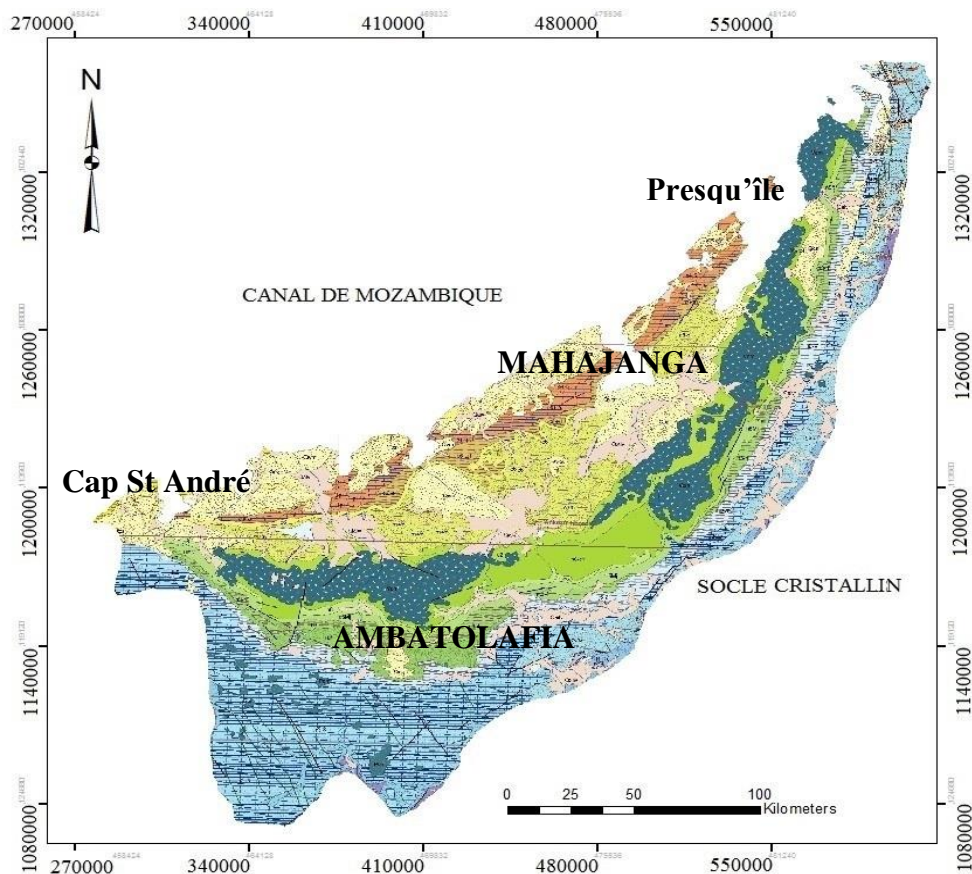
- Le Groupe Sakamena : est du Permien supérieur au Trias inférieur. Il repose directement sur le socle cristallin et n'affleure que dans la partie nord du bassin. Le Groupe Sakamena est caractérisé par la présence d'esthéries et ses dépôts sont constitués par des argiles schisteuses en plaquettes qui représentent souvent la Sakamena supérieure.
- Le Groupe Isalo : allant du Trias moyen au Jurassique moyen avec des intercalations de faciès continental et marin. Il repose de façon discordante sur le socle cristallin. Le Groupe Isalo est recouvert par une épaisse succession de couches marines et terrestres interstratifiées qui s'y accumulent du Jurassique supérieur au Crétacé.

- **Formation Post-Karroo**

Elle correspond à la fin de la sédimentation syntectonique, d'âge Jurassique supérieur à Actuel. Elle se différencie du groupe précédent par son caractère marin franc et ses faciès beaucoup plus diversifiés, de bas en haut :

- Le Jurassique est marin, très fossilifère, caractérisé par des alternances de dépôts calcaireux et marneux. Des niveaux de schistes à lignite et à gypse ont été identifiés au Jurassique moyen et supérieur ;
- Le Crétacé, très fossilifère, est marqué par des épisodes marins et continentaux. Des niveaux de basaltes turoniens, inter stratifiés 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



j6-7	n3-4	- Argile ferrugineuse, argile sableuse, grès grossier, marne, grès glauconieux
j4-5	n3	- Grès grossier, argile à la base
j2-3	n2-3	- Argile, marne à gypse, grès
j1	n1-2	- Argile, marne à glauconie, calcaire, grès
j2-3c	j6-7	- Marne glauconieuse, calcaire marneux, calcaire sableux
j4-5	j4-5	- Calcaire marneux, marne
j2-3	j2-3	- Faciès marin - Calcaire, calcaire argileux, calcaire marneux, marne
j1	j2-3c	- Faciès continental Isalo III - Grès, grès carbonaté et calcaire argileux
j4-j1c	j1	- Grès à ciment calcaire, calcaire dolomitique, calcaire sableux, marne et argile à gypse
t3-13c	j4-j1c	- Faciès continental Isalo II - Grès et argile avec bois pétrifiés fréquents
	t3-13c	- Faciès continental Isalo I - Grès, argile et conglomérat continental

Légende

	Faille
	Dyke
Qdm	Qalv - Alluvion et sable
Qdv	Qdv - Dune vive
q1-3	q1-3 - Sable blanc
Qcl	Qcl - Cuirasse latéritique
Qarl	Qarl - Argile et grès
Qcs	Qcs - Cuirasse sableuse
Qcc	Qcc - Cuirasse calcaire
Qvm	Qvm - Vase de mangrove
p	p - Grès versicolore à stratifications entrecroisées, grès argileux, argile, marne à bois silicifiés
m-p	m-p - Grès peu induré à stratifications entrecroisées, argile, concrétion
m1-6	m1-6 - Marne, calcaire marneux, calcaire sableux
m1-2	m1-2 - Grès argileux à blocs, calcaire, tuf basaltique
e4-7g	e4-7g - Marne à huitres
e4-7	e4-7 - Dolomie, tuf basaltique, argile sableuse, calcaire
e4-5	e4-5 - Calcaire, dolomie, calcaire argileux, marno-calcaire, marne sableuse, argile à gypse
e5	e5 - Calcaire, calcaire argileux
e4	e4 - Grès, calcaire sableux, calcaire oolithique
e1-3	e1-3 - Dolomie, calcaire argileux, grès, dolomie, calcaire dolomitique
c6-e1	c6-e1 - Marne, calcaire argileux, niveaux phosphatés
c6	c6 - Argile, marne, grès
c5-6	c5-6 - Grès, lumachelle, argile, marne, calcaire crayeux
c3-6	c3-6 - Grès, marne gréseuse, sable
c5	c5 - Grès, calcaire sableux
c3-5	c3-5 - Grès argileux à stratifications entrecroisées
c3-4m	c3-4m - Calcaire récifal
c3-4c	c3-4c - Grès à stratifications entrecroisées
c2-4	c2-4 - Argile
n6-c4	n6-c4 - Marne, grès calcaire à intercalations d'argile, grès à stratifications entrecroisées, arg
c2	c2 - Grès, argile
n6-c2c	n6-c2c - Faciès mixte : Conglomérat, grès rouge, argile, grès blanc
n6-c2m	n6-c2m - Grès, marne, argile
c1	c1 - Grès
n6-c1	n6-c1 - Grès, marne, argile à nodules ferrugineux, calcaire, glauconite
n6	n6 - Marne, argile, calcaire argileux, grès argileux
n3-6	n3-6 - Grès arkosique à stratifications entrecroisées
n5Md	n5Md - Grès glauconieux, grès à stratifications entrecroisées
n5Mj	n5Mj - Grès grossier, calcaire sableux, calcaire glauconieux, marne, calcaire

Figure 6 : Carte géologique du Bassin de Mahajanga

Source : Roig et al. 2012

I.2.1.5.2 Stratigraphie du Crétacé

Le Crétacé est encadré par les périodes Jurassique et Paléogène. Il offre une succession de dépôts divers, tant marin que continental. Le Crétacé malgache peut être subdivisé en trois séries : inférieure, moyenne et supérieure (Tableau 2) :

- Le Crétacé inférieur est à prédominance marin ;
- Le Crétacé moyen, ce découpage, qui n'est pas fréquent (Gradstein *et al.*, 2012), regroupe les étages : Aptien, Albien, Cénomaniens et Turonien plus ou moins continus ;
- Le Crétacé supérieur est à prédominance continental. Le Santonien, le Coniacien et le Campanien sont représentés par des formations à reptile c'est-à-dire continental. Seule la partie terminale, le Maastrichtien est marin.

Tableau 2 : Échelle stratigraphique du Crétacé

Périodes	Séries	Étages	Âges (Ma)
Paléogène	Paléocène	Danien	65,0- 59,0
Crétacé	supérieur	Maastrichtien	72,1- 65,0
		Campanien	83,6 – 72,1
		Santonien	86,3 – 83,6
		Coniacien	89,8 – 86,3
	moyen*	Turonien	93,9 – 89,8
		Cénomaniens	100,5 – 93,9
		Albien	113,0 – 93,9
		Aptien	125,0 – 113,0
	inférieur	Barrémien	129,4 – 125,0
		Hauterivien	132,9 – 129,4
		Valanginien	139,8 – 132,9
		Berriasien	145,0 – 139,8
Jurassique	Malm	Tithonien	152,1 – 145,0

* *spécifique à Madagascar*

Source : Auteur

I.2.1.5.3 Crétacé moyen du bassin de Mahajanga

Il est représenté par : l'Aptien, l'Albien, le Cénomaniens et le Turonien, qui séparent le Crétacé moyen et supérieur du Bassin. Le Crétacé moyen est marqué par une phase d'augmentation de l'apport en sédiments (lié au Rifting indo-malgache d'où le basculement de Madagascar vers l'ouest) ainsi qu'un puissant épanchement volcanique, déclenché au Turonien. En affleurement, la séquence est constituée essentiellement de sédiments clastiques à gros grains, environ 50 à 200m l'épaisseur.

De bas en haut (Bésairie & Collignon, 1972) :

- L'Aptien présente un faciès mixte à prédominance continental mais avec plusieurs intercalations marines. L'étage est complet entre Mahavavy et Ihopy.
- L'Albien affleure depuis la presqu'île Radama sur la côte nord-occidentale de Madagascar jusqu'à Soalala aux environs du Cap St André. Cet étage est plus développé dans la partie nord de la Betsiboka. Il est marqué par une grande transgression marine ;
- Pendant le Cénomaniens, les formations sont marines du nord du bassin, passent au sud aux grès continentaux d'Ankarafantsika épais de 250 m. Dans le centre du Bassin, le Crétacé moyen présente un faciès gréseux à grains moyens à grossiers, avec des intercalations d'argiles ;
- Le Turonien, constitué par des coulées basaltiques épais de 20 m, surmontant les grès cénomaniens. Ces coulées sont recouvertes par des niveaux continentaux discordants d'argiles et de grès à reptiles du Turonien et du Coniacien.

I.2.1.5.4 Etage Albien (d'Orbigny, 1842-1843)

Créé en 1842-1843 dans la partie orientale du bassin de Paris (Vallée de l'Aube), il regroupe des terrains constitués de bas en haut par :

- Des sables verts (glauconieux) daté de -109 plus ou moins 4 MA à -103 plus ou moins 4 MA par Odin *et al*, 1982 ;
- Des argiles ;
- Des marnes ;

L'étude des foraminifères de l'Albien stratotypique a fait l'objet d'une étude minutieuse (Magniez-Janin, 1975).

I.2.1.5.5 Albien du bassin de Mahajanga

L'Albien marin est continu dans tout le bassin très riches gisements fossilifères qui ont permis de séparer plusieurs zones paléontologiques. L'Albien basal, équivalent du niveau de *Clansayes* est gréseux et renferme une faune très classique à *Acanthoplites nolani* et *Acanthoplites bergeroni*. Il est bien caractérisé dans la province d'Analalava et la campagne de 1938 l'a identifié dans le District de Sitampiky. L'Albien inférieur, équivalent des couches à *Leymeriellia* existe mais n'a pas fourni de microfossile. L'Albien moyen renferme deux niveaux de base marneux ou gréseux, est caractérisé par *Douvielleiceras mamillare* avec *Uhligella* et *Beudanticoras* tandis que le niveau supérieur, gréseux, parfois gloconieux, renferme la superbe faune à *Oxytropidoceras* et *Manuaniceras*. L'horizon à *Oxytropidoceras* est souvent transgressif, en particulier dans l'extrême nord. L'Albien supérieur est représenté par des couches à *Pervinquieria* et *Hysterocheras*. Le faciès est gréseux, calcaréo-gréseux ou argilo-marneux.

Enfin l'Albien terminal montre très localement dans le nord de l'Ile quelques espèces du genre *Budaiceras* (Bésairie & Collignon, 1972).

I.2.1.6. Formation albienne du secteur d'Ambatolafia

Le bassin de Mahajanga a subi plusieurs événements tectoniques, notamment des épisodes de rift et de subsidence, qui ont affecté l'histoire géologique du secteur. Le Canal de Mozambique s'est ouvert à l'ouest alors que la plaque Malgache est encore endossée, vers l'est, au bloc Seychelle- Inde (Barron *et al*, 1981). La formation albienne est principalement composée de grès, de marnes et de calcaires, qui ont été déposés dans un environnement marin (Figure 7).

La formation est caractérisée par la présence d'ammonites, d'inocérames et d'autres fossiles, qui sont typiques de l'étape d'Albien. Les sédiments de la formation d'Albien d'Ambatolafia ont été déposés dans un environnement marin peu profond, (Bésairie & Collignon, 1972).

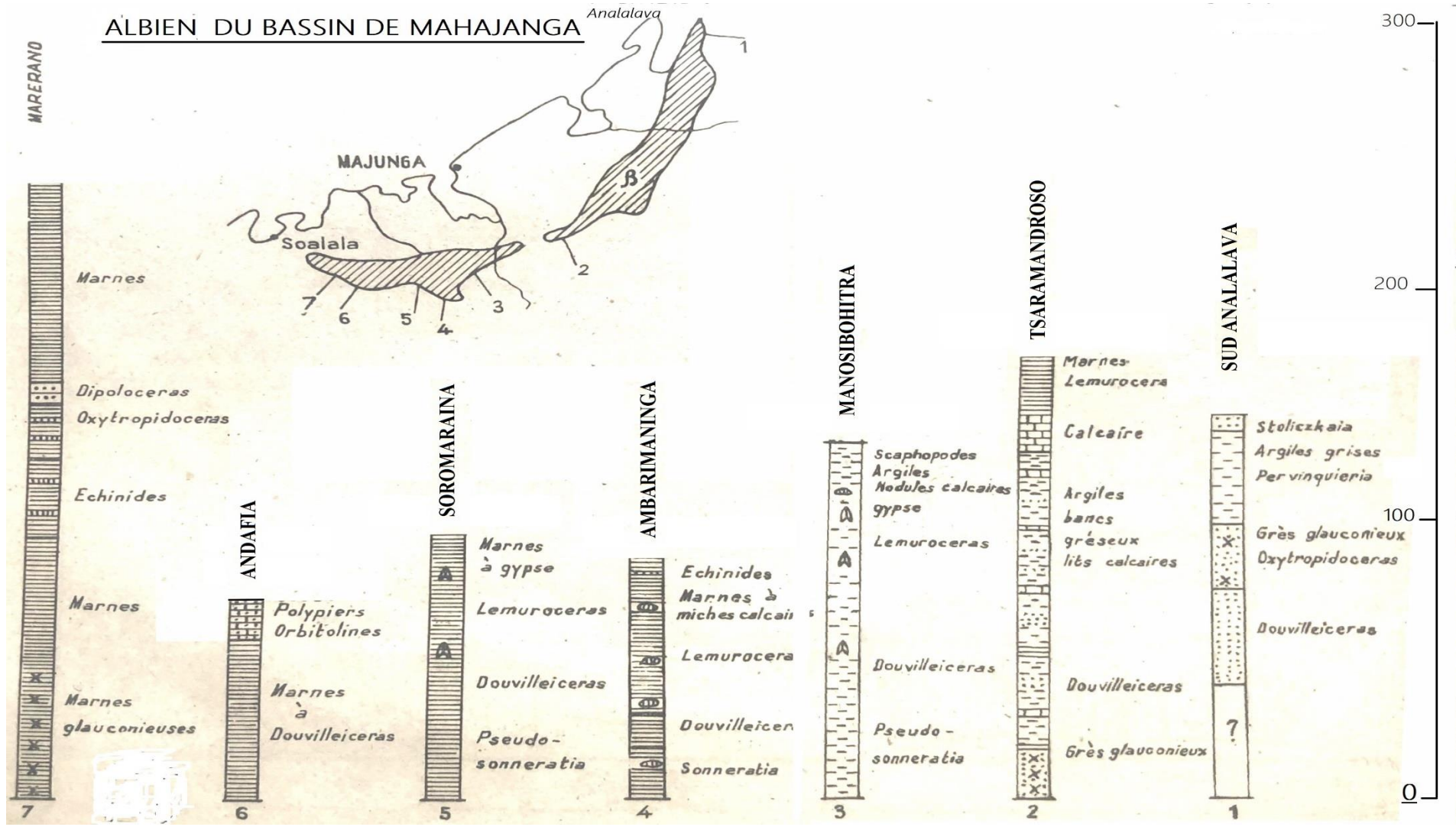


Figure 7 : Corrélation de l'Albien dans le bassin de Mahajanga

Source : Bésairie & Collignon, 1972

I.2.1.7. Biostratigraphie de l'Albien d'Ambatolafia

Les ammonites de l'Albien (Crétacé moyen, environ 113 à 100 millions d'années) sont des outils importants pour la biostratigraphie, permettant une datation précise et la corrélation de couches sédimentaires à l'échelle mondiale. La biostratigraphie des ammonites de l'Albien, une branche de la paléontologie, se concentre sur la classification et la datation des couches géologiques de l'Albien en utilisant des mollusques céphalopodes fossiles (Collignon, 1949, 1950, 1951). Leur grande diversité et leur abondance durant cette période, combinées à leur évolution rapide et leur large distribution géographique, en font des marqueurs stratigraphiques exceptionnels.

Le Colloque sur le Crétacé moyen (Lyon, 1963) a établi une biozonation internationale pour l'Albien. Parallèlement, Collignon a proposé en 1963 une biozonation spécifique pour Madagascar, comprenant notamment les zones à *Douvilleiceras inaequinodon*, *Lemuroceras spathi*, et *Lyelliceras lyelli* (Tableau 3).

Tableau 3 : Stratotype de l'Albien et les décisions du Colloque sur le Crétacé moyen in Collignon

	Stratotype de l'Albien et les décisions du COLLOQUE en 1963	
	P. et J.P. DESTOMBES	COLLOQUE
Vraconien	Gaize de l'Argonne (stoliczkien) Marnes de Brienne p.p.	Albien supérieur <i>Zone à Stoliczkaia dispar</i>
Albien supérieur	(Pervequierien)Marnes de Brienne p.p. <i>Zone inf. à Hystoceras</i>	<i>Zone à Mortonicerias inflatum</i>
Albien moyen	<i>Zone à Dipoloceras cristatum et Hojsisovicsia subdelaruel</i> (Dipolocératien) Boulonnais	<i>Zone à Dipoloceras cristatum</i>
	<i>Zone à Hoplites dentatus intermedius - niobe</i> (Hoplitien) Aube et Boulonnais	Albien moyen <i>Zone à Euhoplites lautus</i>
	<i>Zone à Lyelliceras lyelli et Hoplites benettianus</i> Aube et Hte-Marne	<i>Zone à Hoplites dentatus et Lyelliceras lyelli</i>
	<i>Zone à Tegoceras camatteanum et Isohoplites eodentatus</i>	
Albien inférieur	(Douvilleicératien) Aube et Haute-Marne (Leymeriellien) Nièvre et Aube	Albien inférieur <i>Zone à Douvilleiceras mammillatum</i> <i>Zone à Leymeriella tardefurcata</i>

Source : Randrianasolo, 1986

I.3. Matériels

I.3.1. Matériels utilisés sur terrain

Pour prélever les échantillons sur terrain, les matériels suivants ont été utilisés :

- Cartes géologique et topographique ;
- GPS ;
- Marteau de géologue ;
- Sachet pour les échantillons ;
- Sac à échantillons ;
- Carnet de terrain ;
- Mètre ruban ;
- Couteau ;
- Spatule ;
- Chiffon ;
- Corde solide ;
- Appareil photo.

I.3.2. Matériel biologique

Les fossiles sont très riches dans l'Albien d'Ambatolafia, où les ammonites constituent le groupe le plus important. Ces ammonites sont caractérisées par leur grande taille, leur forme variée et leurs ornements complexes, qui leur donnaient une apparence unique.

Les ammonites sont des mollusques céphalopodes de l'ordre des Ammonoidea (Photo 2). La coquille est externe, univalve, enroulée en spirale dans le plan (planispiralée), cloisonnée et de nature calcaire. Elle comporte une partie régulièrement divisée en loges par des cloisons, l'ensemble constituant le phragmocône, et une dernière loge, la loge d'habitation, occupée par l'animal de son vivant. Il existe aussi quelques formes déroulées.

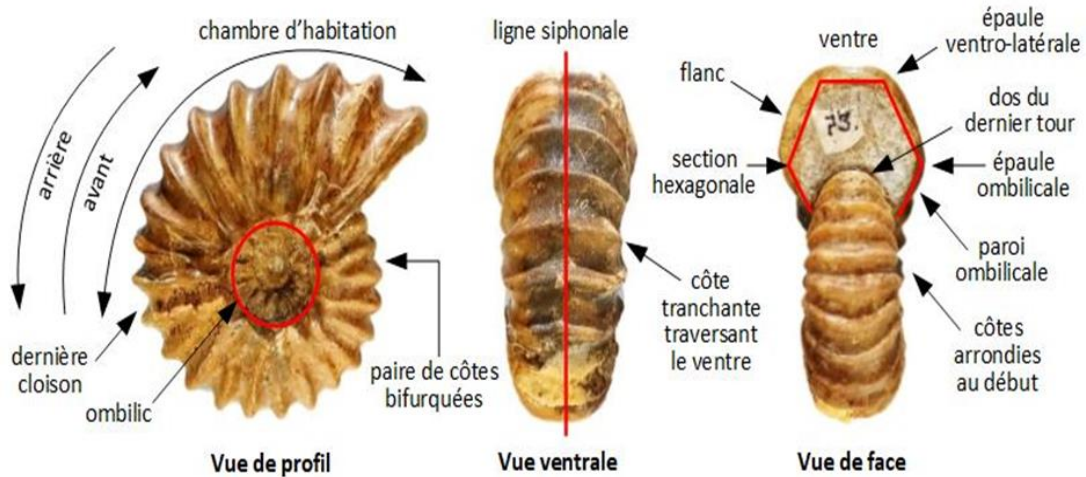


Photo 2 : Différente vue d'une ammonite

Source : Prins, 2005

I.3.3. Autres matériels

- **Pied à coulisse**

Le pied à coulisse a été utilisé pour mesurer les différentes variables de caractères de l'ammonite (le diamètre maximal (D) de la coquille, les hauteurs externes de la section du dernier tour (H) et les épaisseurs de la section du dernier tour (E)).



Photo 3 : Pied à coulisse

- **Moyens de transport**

Les moyens de transport allé et retour sont : voiture, pirogue (photo 4 a) et tracteur (photo 4 b).

- **Matériels au laboratoire**

Les matériels de traitement des échantillons prélevés sont variés en fonction de la méthodologie adoptée qui sont :

Pour les microfossiles

- Tamis à mailles croissantes (photo 6.1) ;
- Bécher ;
- Loupe binoculaire ;

- Flacons en verre (photo 6.2) ;
- Boîtes de pétri (photo 6.3) ;
- Cellule multiple pour rangement des microfossiles (photo 6.4).

Pour les macrofossiles

- Marteaux ;
- Burins ;
- Aiguilles ;
- Bassine ;
- Brosse.

I.4. Méthodes

I.4.1. Recherche documentaire

Avant la descente sur le terrain, la consultation des revues bibliographiques s'est révélée essentielle, car elle a permis d'acquérir des connaissances préliminaires, d'identifier les travaux antérieurs, et de mieux orienter les objectifs ainsi que la méthodologie de l'étude.

I.4.2. Descente sur terrain

Par la suite, la descente sur le terrain a constitué un moment important pour confronter les recherches à la réalité du site, une mission de terrain a été entreprise en empruntant successivement des moyens de transport routier, fluvial (pirogue et tracteur) (Photo 4) et des marches à pied.

À l'arrivée dans la Commune Rurale Sitampiky concernée, une visite de courtoisie a été effectuée auprès du Monsieur le Maire, dans le but de présenter officiellement les objectifs de l'étude et de solliciter son aval ainsi que son soutien logistique éventuel.

La descente sur terrain a ensuite permis d'accéder à la carrière d'exploitation illicite de fossiles d'Ambatolafia, localisée à environ 30 kilomètres au sud de la Commune Rurale de Sitampiky. Cette reconnaissance préliminaire a offert une première évaluation de l'état des affleurements fossilifères et de l'intensité des activités d'extraction non autorisées observées sur le site.



Photo 4 : Moyens de transport utilisé (a : pirogue, b : tracteur)

I.4.3. Collecte des données sur terrain

I.4.3.1. Prélèvement des sédiments

La partie superficielle des formations sédimentaires est presque toujours exposée aux intempéries. Ainsi, elle est plus ou moins altérée et mélangée aux sédiments voisins. Dès lors, il est nécessaire de racler cette partie superficielle et de faire les prélèvements à une certaine profondeur pour avoir des échantillons frais. Chaque prélèvement de l'ordre de 300 g a ensuite été codé par un numéro d'ordre de prélèvement inscrit sur une étiquette glissée à l'intérieur du sachet renfermant l'échantillon des sédiments prélevés. Le même numéro, les observations et les notes concernant le sédiment a alors été soigneusement noté dans le carnet de terrain.

I.4.3.2. Collecte des fossiles

A la suite d'une prospection du terrain, une carrière localisée au nord du village d'Ambatolafia a été retenue comme site d'étude en raison de la présence d'un affleurement fossilifère bien conservé et particulièrement riche en macrofossiles, notamment en ammonites

(Photo 5). Ce site présente un intérêt scientifique majeur pour la reconstitution des paléoenvironnements du Crétacé moyen, plus précisément de l'Albien, dans le bassin sédimentaire de Mahajanga.

Sur le plan géologique, le Secteur d'Ambatolafia appartient à la formation sédimentaire du bassin de Mahajanga, formée au cours du Mésozoïque. La succession stratigraphique y est caractérisée par des dépôts marins peu profonds d'origine épicontinentale, composés essentiellement de marnes, de siltites et de calcaires fossilifères. Ces formations sont connues pour leur richesse paléontologique et leur potentiel à fournir des données sur les dynamiques sédimentaires, la biodiversité marine et les conditions paléoécologiques de l'Albien.

Le site étudié se présente sous la forme d'un puits d'extraction artisanale mesurant environ 1 mètre de diamètre et atteignant une profondeur de 30 mètres. L'échantillonnage a été réalisé avec l'autorisation préalable du propriétaire de la carrière. Une corde solide a été utilisée pour assurer les allers retours le long du puits lors des opérations de prélèvement. L'équipement utilisé comprend un couteau, une spatule, un chiffon propre, des sachets en plastique et un sac à échantillon.

La méthodologie d'échantillonnage adoptée comprend les étapes suivantes :

- Mesure de l'épaisseur de la couche fossilifère, à l'aide d'un mètre ruban ;
- Raclage soigneux de la couche contenant les fossiles afin d'éviter leur altération mécanique ;
- Extraction manuelle des fossiles, avec des outils adaptés garantissant la préservation des spécimens ;
- Prélèvement de sédiments associés, en vue d'analyses granulométriques, minéralogiques et géochimiques.

Chaque échantillon est identifié par un code unique, conditionné dans un sachet plastique propre, puis stocké dans un sac à échantillons en vue de son transport vers le laboratoire pour traitement et analyse ultérieure.

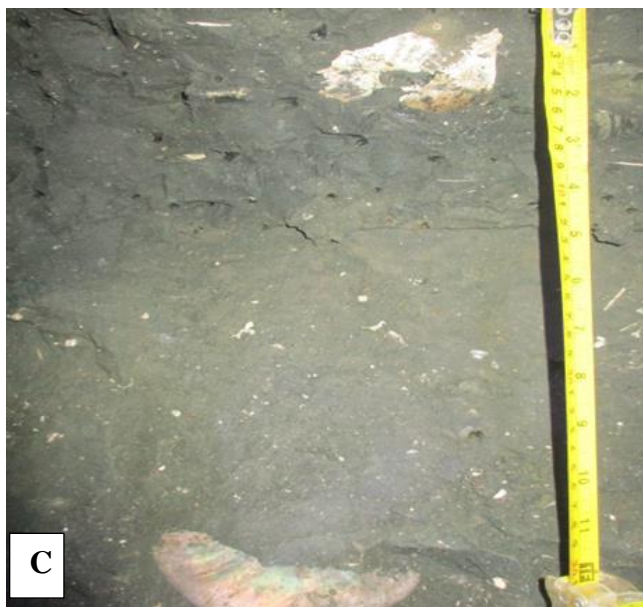


Photo 5 : Puits d'extraction des fossiles (A : puits couvert par un toit en paille, B : descente dans le puits, C : affleurement et mesure des couches, D : intérieur du puits)

I.4.4. Analyse des échantillons au laboratoire

I.4.4.1. Analyses des éléments non biogéniques

I.4.4.1.1 Analyses géochimiques

C'est un outil indispensable pour une meilleure compréhension de l'environnement, de l'histoire de la terre et de l'évolution des êtres vivants. Citons le quartz, le gypse, la teneur en silice et en carbonate du matériel. L'analyse géochimique peut donner aussi des indications sur la nature des sédiments, la profondeur et la température du milieu.

Elle est basée essentiellement sur le dosage des éléments majeurs contenu dans la roche afin de déterminer sa nature indiquant le milieu de dépôt (Figure 8). Cette analyse consiste à déterminer la teneur des éléments chimiques majeurs oxydés contenus dans les sédiments à savoir : Fe_2O_3 , Al_2O_3 , CaO , MgO et SiO_2 .

Préparation des échantillons :

Cette analyse débute par le broyage de l'échantillon, permettant d'aboutir à une granulométrie passant au tamis n°24, soit environ $0,008 \mu\text{m}$. Ensuite, on prélève 5 g de cet échantillon broyé pour la fusion alcaline et l'analyse des éléments majeurs proprement dite. Pour ce faire, des creusets en porcelaines sont utilisés pour y mettre l'échantillon.

Attaque au carbonate double de Na et de K

La prise d'essai se fait avec 5 g de roche broyée. Le mode opératoire a été comme suit :

- Attaquer jusqu'à fusion complète pendant 30 minutes dans un four ;
- Reprendre dans un bécher de 400 ml avec 100 ml de HCl de (1/2) ;
- Recouvrir le bécher d'un verre de montre ;
- Laisser attaquer jusqu'au bouillonnement ;
- Enlever le couvercle en rinçant avec une pipette d'eau bouillante, pour éviter les pertes.

Dosage de la silice SiO_2 par précipitation

Prise d'essai : liqueur d'attaque

Par principe, une partie de la silice se trouve sous forme colloïdale donc impossible de la filtrer. Pour la récupérer totalement, on doit évaporer à sec la liqueur d'attaque de la fusion alcaline.

Le mode opératoire se fait comme suit :

- Apporter le bécher contenant la liqueur précédente au bain de sable à $90 \text{ }^\circ\text{C}$ et aller à sec une première fois jusqu'à fin de dégagement de vapeur chlorhydrique ;
- Recommencer avec 25 ml d'HCl concentré puis aller à sec une deuxième fois ;
- Ajouter dans le bécher contenant le résidu sec, 5 ml d'HCl concentré après refroidissement et laisser refroidir pendant 1/4 d'heure ;
- Reprendre par 50 ml d'eau bouillante. Seule la silice reste insoluble ;
- Filtrer à chaud.

Le processus de cette analyse se résume dans l'organigramme ci-dessous.

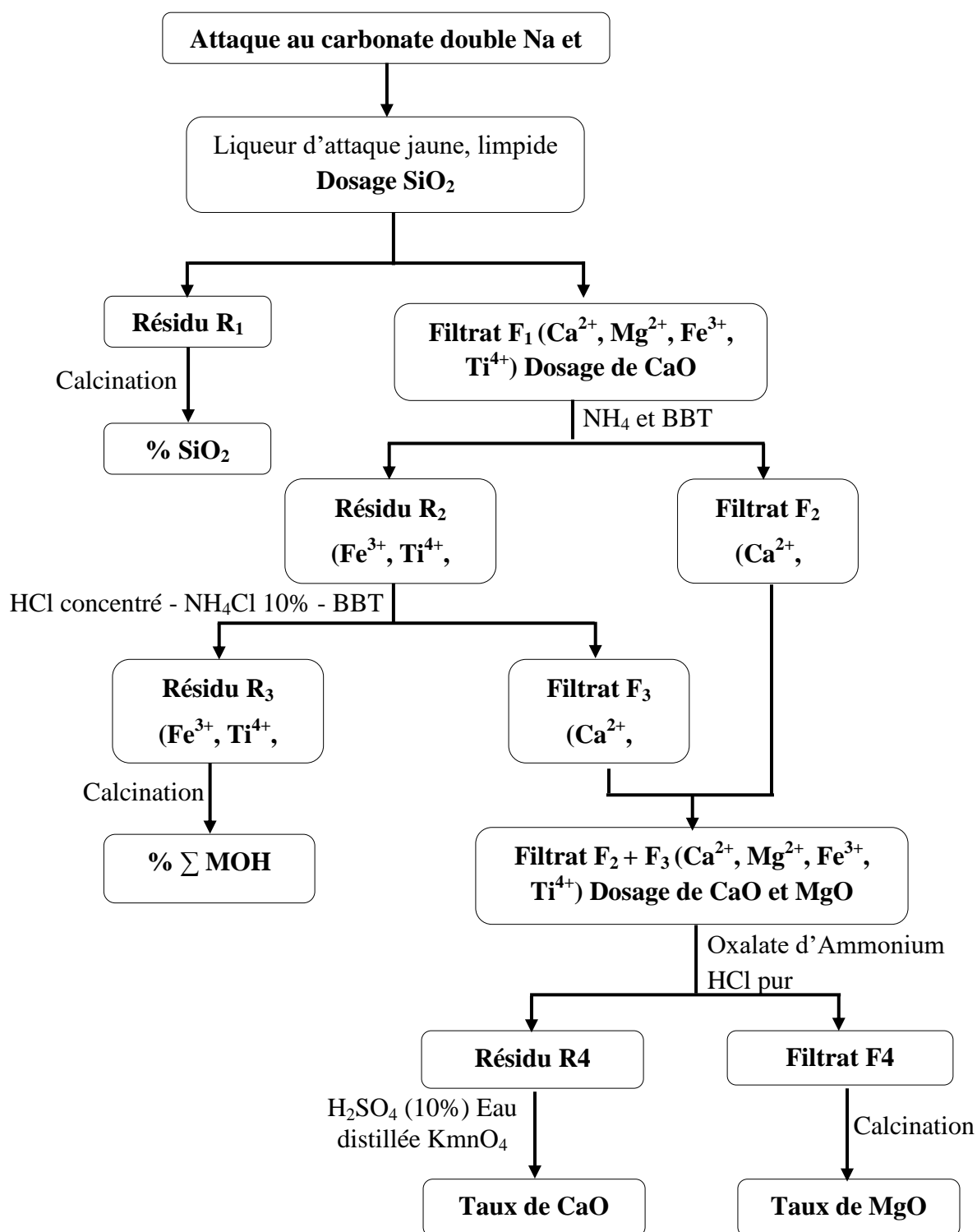


Figure 8 : Organigramme d'analyses géochimiques des sédiments

Elle participe en majorité dans la caractérisation lithologique d'une roche ou sédiment si ce dernier est d'origine chimique (faciès marin), par contre, si les roches ou les sédiments sont d'origine détritique, celle-ci doit être combinée avec l'analyse granulométrique.

L'analyse géochimique permet d'avoir aussi des indications sur la nature des sédiments, la profondeur et la température du milieu à étudier.

Détermination du carbonate de calcium (CaCO₃) par la méthode de calcul

La calcimétrie de Bernard permet de déterminer le taux de CaCO₃. Mais il y a aussi une autre méthode simple pour avoir le taux de CaCO₃. C'est une méthode par calcul : « Document COPRO : PTV 845 Version 1.0 du 2006-06-15 ».

Elle s'exprime en pourcent, calculée à partir de la teneur en chaux totale CaO, exprimée en pourcent, en appliquant la relation :

$$\text{CaCO}_3 = \text{CaO} * 1,78$$

I.4.4.1.2 Etude morphoscopique

L'étude morphoscopique consiste à identifier la nature, l'origine et le degré d'usure des particules sédimentaires (Figure 9). L'examen des grains de quartz sous la loupe binoculaire (de grandissement de 5 fois à 80 fois), 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.

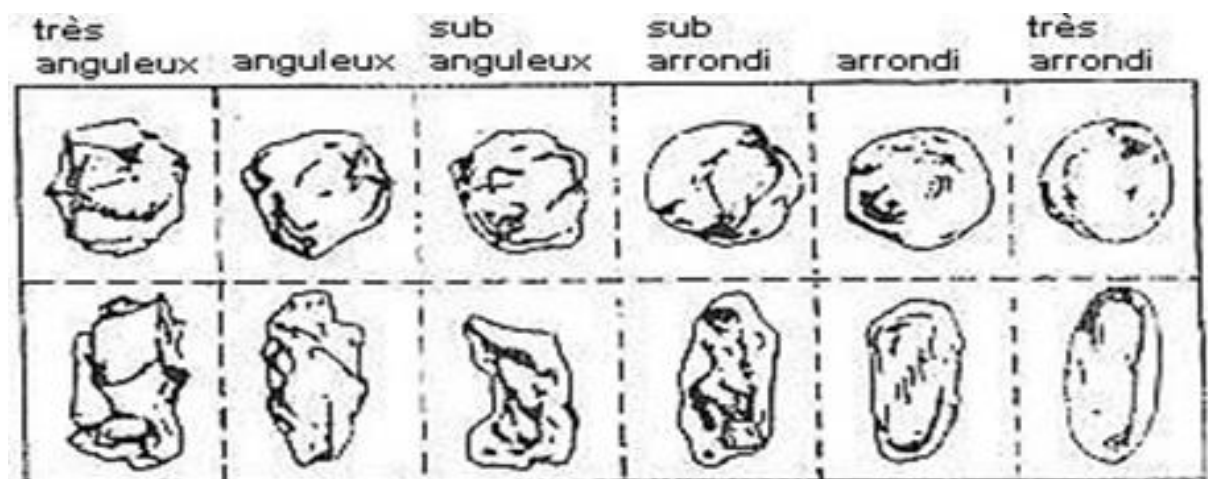


Figure 9 : Carte visuelle permettant l'estimation de la sphéricité et de l'éroulé des graviers et du sable

Source : Powers, 1953.

Ce classement tient compte de deux critères :

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

On aboutit ainsi à quatre catégories principales de grains :

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

✓ *Les grains « Non-Usés » (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 mâté. Ils sont caractéristiques d'une évolution sur place et surtout dans les creux, les grains sont cimentés par des ciments ferrugineux ou quartzeux. Par ailleurs, l'émoissé 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'émoissé 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'émoissé sont concomitants l'une de l'autre en même temps que la distance.

I.4.4.2. Analyses des éléments biogéniques

I.4.4.2.1 Analyses des microfossiles

- **Analyses physico-chimiques des sédiments marneux**

Les sédiments sont destinés à des traitements appropriés selon leur nature : les dépôts marneux, friables sont destinés au processus physico-chimique. Cette méthode est très importante car elle fournit simultanément des renseignements lithologiques et biologiques dans le microfaciès. Le lavage des sédiments a été réalisé dans des séries de tamis à mailles croissantes de 0.160 mm, 0.250 mm et 0.500 mm (Photo 6.1).

Des échantillons de sédiments de 200 g, ont été trempés dans du pétrole. Après 1 h, le pétrole a été remplacé par de l'eau, il a ainsi obtenu une sorte de boue.

Le lavage proprement dit s'est fait sur une série de tamis soumis à un jet d'eau, jusqu'à obtention d'un filtrat clair. Une fois le lavage terminé, le résidu a été séché puis

versé dans des flacons bien identifiés avec leur code respectif (Photo 6.2).

Il faut noter qu'après chaque lavage, il est important de tremper les tamis avec la solution de bleu de méthylène (pendant 1 à 2 minutes) afin de marquer les résidus coincés entre les mailles et susceptibles de se mélanger aux lavages ultérieurs. (Figure 10). La série de tamis a été enfin rincée à grande eau, lavages ont été réalisés dans le cadre de cette étude.



1. Série de 3 tamis



2. Refus deséchés dans des pilluliers



3. Tri des microfossiles



4. Microfossile mis en cellule

Photo 6 : Etapes de la préparation des microfossiles

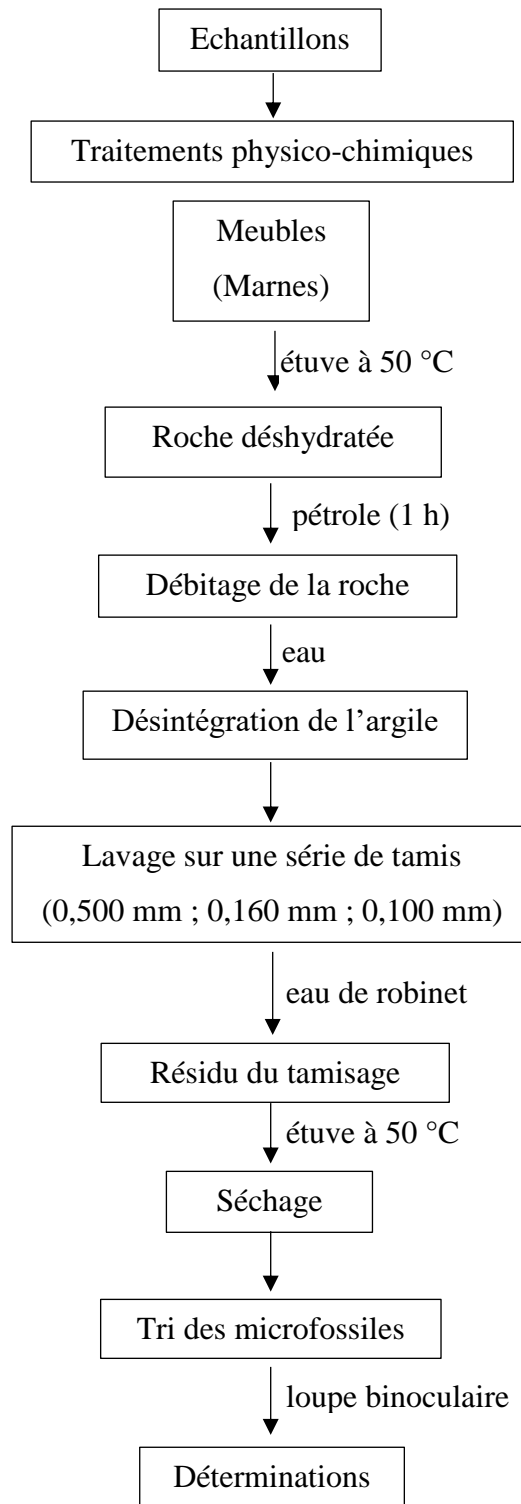


Figure 10 : Traitement physico-chimique des sédiments meubles (Cas des marnes)

Une fois le lavage terminé. Les résidus ont été récupérés dans des boîtes de pétri puis séchés à l'étuve. La température ne doit pas dépasser 60°C afin de préserver les spécimens fragiles, notamment les arénacés. Le refus séché a été stocké dans des flacons, portant le numéro de code correspondant à celui du sédiment traité.

- **Détermination des microfossiles dans les sédiments**





La détermination des microfossiles se fait à l'aide d'une loupe binoculaire, de grossissement 40 à 120, en moyenne, largement suffisant pour l'observation des foraminifères (Tableau 4). Les identifications sont basées sur les travaux de Loeblich & Tappan (1964, 1984, 1988). A la fin de la détermination, chaque microfossile doit avoir sa propre fiche qui va porter son :

- Image ;
- Diagnose et caractère spécifique ;
- Âge attribué à l'origine ;
- Nom du genre et espèce.

On est ensuite passé au tri et au comptage des microfossiles. Les tests ont été sélectionnés selon

- ✓ La nature du test : agglutiné, calcaire,
- ✓ La forme : planctonique, benthique.

Tableau 4 : Classification des foraminifères

1. Nature du test groupe 2. Microstructure de la paroi	GROUPE 	FAMILLE 	GENRE 	ESPECE 
3. Nombre de loges 4. Forme générale 5. Absence ou présence de pores 6. Ouverture (forme, position, nombre)				
7. Libre ou fixé 8. Structure interne				
9. Dimension du test 10. Forme, dimension, nombre de loges 11. Caractère des sutures 12. Ornementation				

Source : Loeblich & Tappan (1964, 1984, 1988)

I.4.4.2.2 Analyses des macrofossiles

- **Etude qualitative des fossiles collectés**

Les fossiles constituent des indicateurs précieux pour comprendre les écosystèmes marins et continentaux passés et les événements d'extinction. Leur étude quantitative est essentielle en paléontologie, contribuant à la reconstitution de l'histoire de la vie marine.

Pour l'étude qualitative des macrofossiles, les identifications ont été réalisées par comparaison morphologique avec des spécimens décrits dans la littérature spécialisée. Les principales références utilisées sont les ouvrages de Péron & Teisseire (1990), Lehmann (1981), Maisey (1991), qui fournissent des critères diagnostiques détaillés pour la reconnaissance des groupes fossiles, notamment les ammonites et autres mollusques céphalopodes. Les étapes successives de traitement des échantillons au laboratoire sont les suivantes (Photo 7) :

- **Dégagement des fossiles** : Les fossiles sont extraits de leur gangue sédimentaire à l'aide d'outils manuels tels que des marteaux, des burins et des aiguilles, notamment lorsque les sédiments sont très indurés. Cette opération se fait avec précaution afin de ne pas abîmer les structures morphologiques.

- **Ramollissement des gangues** : Les fragments contenant des fossiles sont immergés dans une bassine remplie d'eau pendant une durée de 2 à 4 heures, selon la cohésion des sédiments, afin de faciliter la désagrégation des gangues et d'accéder plus facilement aux fossiles.

- **Nettoyage** : Les fossiles sont ensuite soigneusement brossés et lavés à l'eau claire pour éliminer les particules résiduelles. Cette étape vise à rendre les caractères morphologiques (ornementation, sutures, coquille, etc.) bien visibles pour l'analyse.

- **Séchage** : Après nettoyage, les fossiles sont mis à sécher à l'air libre, sur des surfaces propres, à température ambiante, afin d'éviter toute altération thermique ou mécanique.

- **Pré-tri morphologique** : Une première sélection est réalisée en regroupant les fossiles présentant des caractéristiques morphologiques similaires (forme générale, taille, ornementation, etc.).

- **Classement systématique** : Les spécimens sont classés en fonction de leurs caractères morphologiques externes (section, spires, côtes, tubercules, etc.) afin de faciliter leur identification.

➤ **Comparaison taxonomique** : Les formes identifiées sont ensuite comparées aux descriptions et illustrations disponibles dans des catalogues paléontologiques de référence (monographies, traités, publications scientifiques).

➤ **Détermination et classification** : Enfin, chaque spécimen est déterminé et classé dans la hiérarchie taxonomique appropriée (famille, genre, espèce) selon les critères définis par la littérature spécialisée.



Photo 7 : Préparation et triage des échantillons

- **Etude quantitative des ammonites**

La figure 11 illustre les caractères distinctifs de l'espèce, considérés ici comme des variables. Ces variables présentent une variabilité ontogénique, sexuelle, chronologique et environnementale. Les mesures dimensionnelles des ammonites (en millimètres) sont réalisées au pied à coulisse sur des échantillons en bon état, non déformés ni endommagés.

Les variables étudiées (Morphométrie) sont :

- Le diamètre maximal (D) de la coquille, mesuré à son point le plus large, représente la taille de l'animal. Cette mesure permet de caractériser la forme générale de la coquille ;
- Les hauteurs externes de la section du dernier tour (H) ;
- Les épaisseurs de la section du dernier tour (E) ;

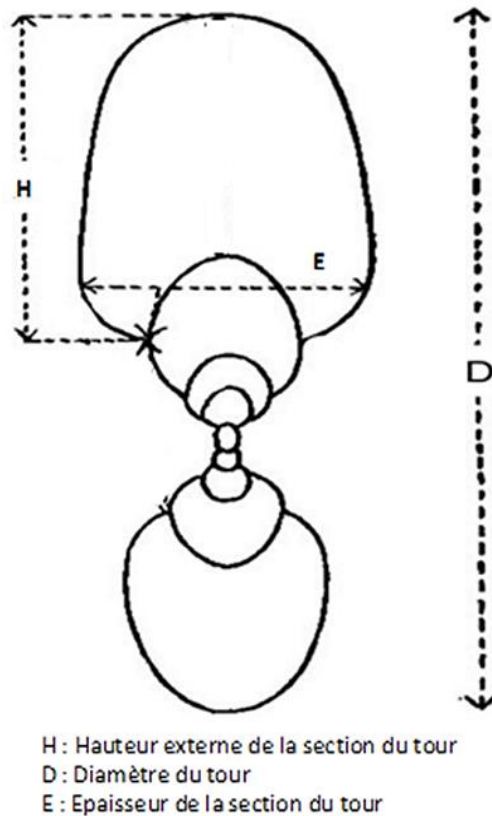


Figure 11 : Mensuration de l'ammonite

Le test de Kruskal-Wallis a été utilisé pour comparer les paramètres (Diamètre, Epaisseur et Hauteur de la coquille) indépendants égales ou différentes dans des espèces des ammonites. Il teste l'hypothèse nulle selon laquelle les populations ont la même fonction de distribution.

1. Par hypothèses :

Hypothèse nulle (H0) : Il n'y a pas de différence significative entre les valeurs des paramètres morphométriques des espèces.

Hypothèse alternative (H1) : Il existe une différence significative entre les variables. Les paramètres morphométriques des espèces varient tellement d'une espèce en une autre.

2. Calcul statistique

La statistique de **test de Kruskal-Wallis**, notée H , est calculée comme suit :

$$H = [12 / (N (N+1))] \sum [Ri^2 / ni] - 3(N+1) \quad (1)$$

Où :

- N est le nombre total d'observations dans tous les groupes combinés.
- k est le nombre de groupes.
- ni est la taille de l'échantillon du groupe i .
- Ri est la somme des rangs du groupe i .
- Σ indique la somme sur tous les groupes.

3. Détermination du degré de liberté :

Le degré de liberté (df) pour le test de Kruskal-Wallis est calculé comme suit :

$$df = k - 1 \quad (2)$$

Où :

- k est le nombre de paramètre morphometrie (D, E, H).

4. Détermination de la valeur p :

- Comparons la statistique de test H à une distribution du khi-deux avec $k - 1$ degrés de liberté.
- Trouvons la valeur p correspondant à la statistique de test H . La valeur p est la probabilité d'obtenir une statistique de test aussi extrême ou plus extrême que celle observée, en supposant que l'hypothèse nulle est vraie.

5. Prise de décision :

- Choisissons un niveau de signification α (α). Généralement, α est fixé à 0,05.
- Si la valeur p est inférieure ou égale à α ($p \leq \alpha$), rejeté l'hypothèse nulle. Cela signifie qu'il existe une différence significative entre au moins deux des paramètres.
- Si la valeur p est supérieure à α ($p > \alpha$), accepté l'hypothèse nulle. Cela signifie qu'il n'y a pas de preuve suffisante pour conclure qu'il existe une différence significative entre les paramètres.

I.5. Etude de la corrélation linéaire

I.5.1. Analyses descriptives uni variées

Les analyses descriptives visent à décrire un ensemble de données à l'aide d'un indice de position (ou tendance centrale) et de dispersion. Les analyses unies variées consistent à calculer les paramètres statistiques propres à l'échantillon et à comparer les paramètres entre plusieurs échantillons pris deux à deux, soit dans la comparaison de la distribution des variables à un modèle théorique.

Les paramètres calculés sont la moyenne, la variance et le coefficient de variation.

I.5.2. Tendance centrale

La moyenne est l'une des indicateurs de tendance centrale de la distribution d'une variable la plus utilisée. Soit un échantillon de n valeurs observées $x_1, x_2, x_3, \dots, x_n$ d'un caractère quantitatif X . La moyenne observée \bar{X} est définie par la moyenne arithmétique des n valeurs.

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3)$$

Il est à noter que la moyenne ne reflète pas l'allure de distribution de données, mais il est important de compléter par d'autres sous peines d'avoir des représentations trompeuses

I.5.3. Mesures de la variabilité

Les mesures de variabilité sont essentielles car elles nous donnent une idée de la distribution de données. Elles sont un complément essentiel aux mesures de tendance centrale. En plus,

la variabilité peut être définie comme la dispersion. Dans cette étude, nous avons utilisés l'écart-type, la variance et le coefficient de variation comme mesures de dispersion.

La variance reflète aussi un degré de dispersion de la série de donnée qui indique l'étalement des autres échantillons. Une variance élevée indique une plus grande dispersion des données autour de la moyenne. La variance observée (S^2) est définie par la moyenne arithmétique des carrés des écarts à la moyenne. En d'autres termes, c'est l'écart-type au carré.

$$\mathbf{var}(X) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2 \quad (4)$$

Avec X une variable, X_i les valeurs des variables pour les individus de la population, \bar{X} est la moyenne de X , et n est l'effectif de la population.

L'écart-type (standard déviation in English) permet de mesurer la dispersion de donnée, cela décrit en moyenne, quelle sera la distance à la moyenne d'un résultat dans l'échantillon. Plus

l'écart-type est grand, plus les valeurs de la série de donnée seront dispersées.

$$\sigma_X = \sqrt{\text{var}(X)} \quad (5)$$

Le coefficient de variation est un paramètre relatif de la dispersion qui nous permet de comparer facilement la variabilité des divers caractères entre plusieurs échantillons. Le calcul de coefficient d'asymétrie donne la forme de la distribution et exprime le sens (positif ou négatif) et l'intensité de la distribution, permet de tester l'homogénéité des variables et voir la prédominance d'un stade de croissance. Mathématiquement, le **coefficient de variation (CV)** est le ratio entre l'écart-type σ_X et la moyenne \bar{X} d'une variable quantitative X , dont son expression est donnée par l'équation suivante. Plus il est important, plus la dispersion est grande. Plus il est proche de 0, plus les données sont homogènes. Néanmoins, il est sensible aux valeurs extrêmes.

$$\text{CV}(X) = \frac{\sigma_X}{\bar{X}} \quad (6)$$

I.5.4. Analyses descriptives bi variées

Les analyses bi variées cherchent à quantifier l'association entre une variable à expliquer (réponse) et une variable explicative (facteur), en l'ajustant en fonction d'autres facteurs. L'objectif de cette analyse est de connaître les liaisons pouvant exister entre deux caractères au cours de la croissance et du développement de l'individu.

I.6. Régression linéaire simple

C'est l'une des méthodes statistiques la plus utilisées dans les sciences appliquées et dans les sciences de l'homme et de la société. Son objectif est double : il consiste tout d'abord à décrire les relations entre une variable privilégiée, appelée variable expliquée (ou dépendante), et plusieurs variables jouant un même rôle par rapport à la première, appelées variables explicatives (ou indépendantes). (C'est à dire : c'est la présentation de Y utilisant des X). Elle permet aussi d'effectuer des prévisions de la variable expliquée en fonction des variables explicatives.

Les liaisons entre les variables explicatives exercent une influence très importante sur l'efficacité de la méthode, quel que soit l'objectif dans lequel elle est utilisée. En général, le modèle de régression linéaire simple est donné par l'équation suivante.

$$Y = \mathbf{b}_0 + \mathbf{b}_1 X + \epsilon \quad (7)$$

Avec Y est la variable dépendante ou expliquée ; X est la variable indépendante ou explicative ; b0 et b1 sont des coefficients théoriques de régression (ou les paramètres de modèle) à estimer à l'aide des échantillons ; et ϵ est l'erreur théorique aléatoire (d'autres facteurs influencent Y)

Méthode des moindres carrés

Il s'agit d'obtenir une droite équidistance des points situés de part et d'autre d'elle-même. Pour réaliser ceci, on cherche à minimiser la somme des distances des points à la droite au carré. En considérant une série statistique à deux variables qui justifie un ajustement affine

Définition

On appelle covariance de la série statistique double de variables x et y le nombre

$$\text{Cov (X, Y)} = \sigma_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y}) \quad (8)$$

Pour les calculs, on pourra aussi utiliser :

$$\text{Cov (X, Y)} = \sigma_{XY} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i Y_i - \bar{X}\bar{Y} \quad (9)$$

Remarque

La variance

$$\text{Cov (X, X)} = \sigma_{X^2} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i^2 - \bar{X}^2 = V(X) \quad (10)$$

Calcul des coefficients de régression

Les estimations des coefficients de régression obtenues par la méthode des moindres carrés peuvent être exprimées par les équations suivantes.

$$b_0 = \bar{Y} - b_1 \bar{X} \quad (11)$$

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (12)$$

$$\bar{Y} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Y_i \quad (13)$$

$$b_1 = \text{covariance (X, Y)} / \text{variance (X)}$$

$$\epsilon = 0$$

$$b_1 = \frac{\sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum (x_i - \bar{x})^2} = \frac{Cov(X,Y)}{V(X)} \quad (14)$$

I.7. Régression linéaire multiple

Le modèle de régression multiple est une généralisation du modèle de régression simple lorsque les variables explicatives sont en nombre fini.

$$Y_i = b_0 + b_1 X_{i1} + b_2 X_{i2} + \dots + b_p X_{ip} + \epsilon_i \quad (15)$$

I.7.1. Critères de validation des modèles

Pour mesurer la qualité et l'efficacité d'un modèle de régression linéaire, plusieurs outils ou indicateurs peuvent être utilisés, en particulier, le coefficient de détermination et le coefficient de corrélation entre deux variables.

I.7.1.1. Coefficient de détermination

Le coefficient de détermination (R^2) est une mesure statistique importante utilisée pour évaluer l'efficacité d'un modèle de régression linéaire dans la description de la relation entre les variables (« D » : le diamètre maximum de dimension de la coquille ; « H » : les hauteurs externes de la section du dernier tour ; « E » : les épaisseurs de la section du dernier tour).

Ce coefficient quantifie la proportion de la variance de la variable dépendante qui est prévisible à partir des variables indépendantes. Autrement dit, le coefficient de détermination mesure dans quelle mesure les fluctuations d'une variable peuvent être expliquées par les variations d'une ou plusieurs autres variables, dans le cadre d'un modèle de régression.

Le R^2 se calcule à partir de la formule suivante :

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \hat{x}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (16)$$

Avec y_i la valeur du point i , \hat{y}_i la valeur prédite pour le point i par la régression linéaire, \bar{y} la moyenne empirique des points donnés.

Ce coefficient est exprimé sur une échelle de 0 à 1 et croît avec l'adéquation de la régression au modèle :

- Si le R^2 est proche de zéro, alors le modèle de régression linéaire ne parvient pas à coller avec l'ensemble des points donnés, indiquant ainsi une adéquation inexistante.

- Si le R^2 d'un modèle est de 0.50, alors la moitié de la variation observée dans le modèle calculé peut être expliquée par les points
- Si le R^2 est de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Il y a une adéquation parfaite du modèle. En pratique, il est impossible d'obtenir un R^2 de 1 à partir de données empiriques. On considère qu'un R^2 est élevé lorsqu'il se situe entre 0.85 et 1.

Le R^2 se distingue de la corrélation en ce sens que, si la corrélation mesure la force et la direction de la relation linéaire entre deux variables, le R^2 se concentre sur la capacité d'une variable ou de plusieurs variables indépendantes à prédire la variation d'une variable dépendante.

En pratique, un R^2 élevé signifie que le modèle de régression capture une grande partie de la variance disponible, ce qui est souvent interprété comme une indication de la qualité ou de la précision du modèle.

Néanmoins, il est important de noter que si un R^2 élevé peut indiquer une bonne adéquation du modèle, il ne garantit pas nécessairement que les prédictions soient exactes ou que le modèle soit le plus approprié pour des données spécifiques.

D'autres diagnostics et mesures doivent être considérés pour évaluer pleinement la pertinence d'un modèle de régression. En résumé, le R^2 est un outil précieux pour comprendre et évaluer la qualité d'un modèle de régression, mais il doit être utilisé judicieusement et en complément d'autres indicateurs.

I.7.1.2. Coefficient de corrélation linéaire

Définition

Le Coefficient de corrélation linéaire d'une série statistique de variables x et y est le nombre réel R défini par :

$$\mathbf{R} = \frac{\mathit{Cov}(X,y)}{\sigma_X\sigma_Y} \quad (17)$$

Où $\mathit{Cov}(X, Y)$ est la covariance ;

σ_X l'écart type de la variable x ;

σ_Y l'écart type de la variable y .

Les coefficients de corrélation permettent de donner une mesure synthétique de l'intensité de la relation entre deux caractères et de son sens lorsque cette relation est monotone. Le coefficient de corrélation de Pearson permet d'analyser les relations linéaires et le coefficient de corrélation de Spearman permet aussi d'analyser les relations non-linéaires monotones. Dans cette étude, nous avons utilisé le coefficient de corrélation de Pearson.

Ce coefficient permet de détecter la présence ou l'absence d'une relation linéaire entre deux caractères quantitatifs continus. Pour calculer ce coefficient il faut tout d'abord calculer la covariance. La covariance est la moyenne du produit des écarts à la moyenne.

Le degré de corrélation est exprimé par le coefficient de corrélation, varie théoriquement entre -1 et +1. L'interprétation des valeurs du coefficient de corrélation est la suivante :

- Si R est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre deux variables « D » et « E » ; « D » et « H » ; « E » et « H ».
- Si R est proche de -1, il existe une forte relation linéaire négative (sens opposé : croissance / décroissance) entre deux variables « D » et « E » ; « D » et « H » ; « E » et « H ».
- Si R est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive (même sens : croissance / croissance) entre « D » et « E » ; « D » et « H » ; « E » et « H ».

Le signe de R indique donc le sens de la relation tandis que la valeur absolue de R indique l'intensité de la relation c'est-à-dire la capacité à prédire les valeurs de « D » en fonction de celles de « E » ; « H ».

Deuxième partie :
RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Deuxième partie : RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Cette section présente les résultats détaillés des différentes analyses effectuées sur les échantillons prélevés dans les dépôts albiens d'Ambatolafia. Les analyses géochimiques ont permis de caractériser la composition minéralogique et la teneur en éléments majeurs et traces des roches. Les observations macroscopiques ont mis en évidence les caractéristiques sédimentologiques et texturales des faciès. Enfin, l'étude paléontologique a révélé la diversité et la composition de la macrofaune et de la microfaune préservée dans ces niveaux.

II.1. Eléments non biogéniques

Les éléments non biogéniques sont présents dans les roches, les minéraux et les sols. Ils sont présents dans l'environnement et souvent en quantités importantes.

II.1.1. Géochimie des éléments majeurs

Il est indispensable d'étudier le matériel accompagnant la faune. Citons le quartz, le gypse, la teneur en carbonate et en silice du matériel. Elle peut donner aussi des indications sur la nature des sédiments et des renseignements paléoécologiques des fossiles prélevés dans le secteur d'Ambatolafia. Le tableau 5 ci-dessous donne la répartition des éléments majeurs.

Tableau 5 : Répartition des éléments majeurs contenus dans les sédiments prélevés dans le Secteur d'Ambatolafia

Eléments majeurs	Echantillons prélevés dans le Secteur d'Ambatolafia						
	CN°1	CN°2	CN°3	CN°4	CN°5	CN°6	CN°7
SiO ₂ (%)	19,78	18,52	19,44	19,21	35,45	45,01	47,02
Fe ₃ O ₃ (%)	40,64	36,92	37,64	34,38	11,72	10,86	13,32
Al ₂ O ₃ (%)	19,14	18,63	20,31	20,36	35,05	40,94	35,17
MgO (%)	1,96	1,29	1,02	1,54	1,32	0,77	1,98
CaO (%)	17,76	22,45	1,51	22,90	15,76	1,25	1,53

D'après ce tableau, la teneur en MgO est très faible, variant de 0,77 à 1,98 %. Cette teneur en MgO indique un milieu chaud situé de préférence en zone côtière ou littorale. Les taux en oxyde (Al₂O₃ et Fe₂O₃) sont plus ou moins proportionnels, ils sont présents dans les sédiments en quantité plus ou moins élevées, atteignant à une valeur aux environs de 40 % (Figure 12). Ces oxydes sont riches dans le milieu continental et leur présence élevée dans le milieu marin

témoigne de la présence des sédiments continentaux. Il en a de même pour la teneur en SiO₂ qui est élevée dans les échantillons CN°6 et CN°7 avec un taux de 45 %. Ces valeurs montrent que le milieu de dépôts se trouve non loin du continent.

II.1.2. Lithologie

Dans le cadre de cette étude, la lithologie est déduite à partir des résultats de la géochimie en SiO₂ et de la teneur en CaCO₃ effectuée (Tableau 6). Plusieurs paramètres doivent être consultés avant de déterminer la lithologie des roches sédimentaires.

Tableau 6 : Lithologie du site d'étude

Paramètres	Echantillons prélevés dans le Secteur d'Ambatolafia						
	CN°1	CN°2	CN°3	CN°4	CN°5	CN°6	CN°7
SiO ₂ (%)	19,78	18,52	19,44	19,21	35,45	45,01	47,02
CaCO ₃ (%)	31,61	39,99	29,38	40,07	28,05	2,22	2,76
Lithologie	Argilo-calcaire gréseuse	Marne gréseuse	Argilo-calcaire gréseuse	Marne gréseuse	Argilo-calcaire gréseuse	Grès	Grès

La lithologie du site d'étude est constituée par une succession de formations sédimentaires marines. La partie sommitale est constituée par des grès. On observe d'abord une alternance de dépôts argilo-calcaires gréseux et de marnes gréseuses sur une épaisseur d'environ 1 mètre. Cette unité basale témoigne d'un environnement de dépôt relativement calme et probablement peu profond, propice à la sédimentation des particules fines argileuses et calcaires. La présence de niveaux gréseux intercalés suggère des apports détritiques épisodiques et des variations mineures de l'énergie du milieu.

Cette première unité est surmontée par une épaisse formation de grès argilo-calcaires gris, d'une épaisseur d'environ 21 mètres (Figure 12). Ces grès sont très fossilifères, contenant notamment une abondance d'ammonites, mais aussi probablement d'autres fossiles (bivalves, brachiopodes, échinodermes, etc...). La richesse en fossiles, en particulier en ammonites, indique un milieu marin ouvert et oxygéné, favorable à la vie et à la préservation des organismes. La présence d'argile et de calcaire au sein des grès suggère des variations des conditions de dépôt, avec des périodes plus calmes et des apports terrigènes plus importants.

II.1.3. Caractéristiques morphoscopiques

La morphoscopie des grains a été réalisée après lavage des sédiments, c'est-à-dire que les fractions retenues sur une série de tamis d'ouverture 0,100 mm–0,075 mm–0,063 mm ont été examinées à la loupe binoculaire. Les échantillons CN°1 et CN°2 présentent des grains d'argile, de calcite et de silice aux formes subanguleuses, ce qui indique un transport relativement plus ou moins long depuis leur source d'origine, entraînant un certain arrondi des particules. L'échantillon CN°3 est constitué principalement de grains très fins, facilement transportables, et montre peu d'altération morphologique, suggérant un transport efficace mais peu abrasif.

Pour les échantillons CN°4 et CN°5, les grains d'argile conservent une forme subanguleuse, due à leur plasticité qui permet une certaine déformation lors du transport. En revanche, les grains de silice et de calcite sont majoritairement anguleux, ce qui implique un transport plus court et moins d'usure mécanique. Cette observation suggère que ces minéraux plus durs ont une origine potentiellement marine, où le transport est limité et rapide, favorisant la préservation de leurs arêtes vives (Photo 8).

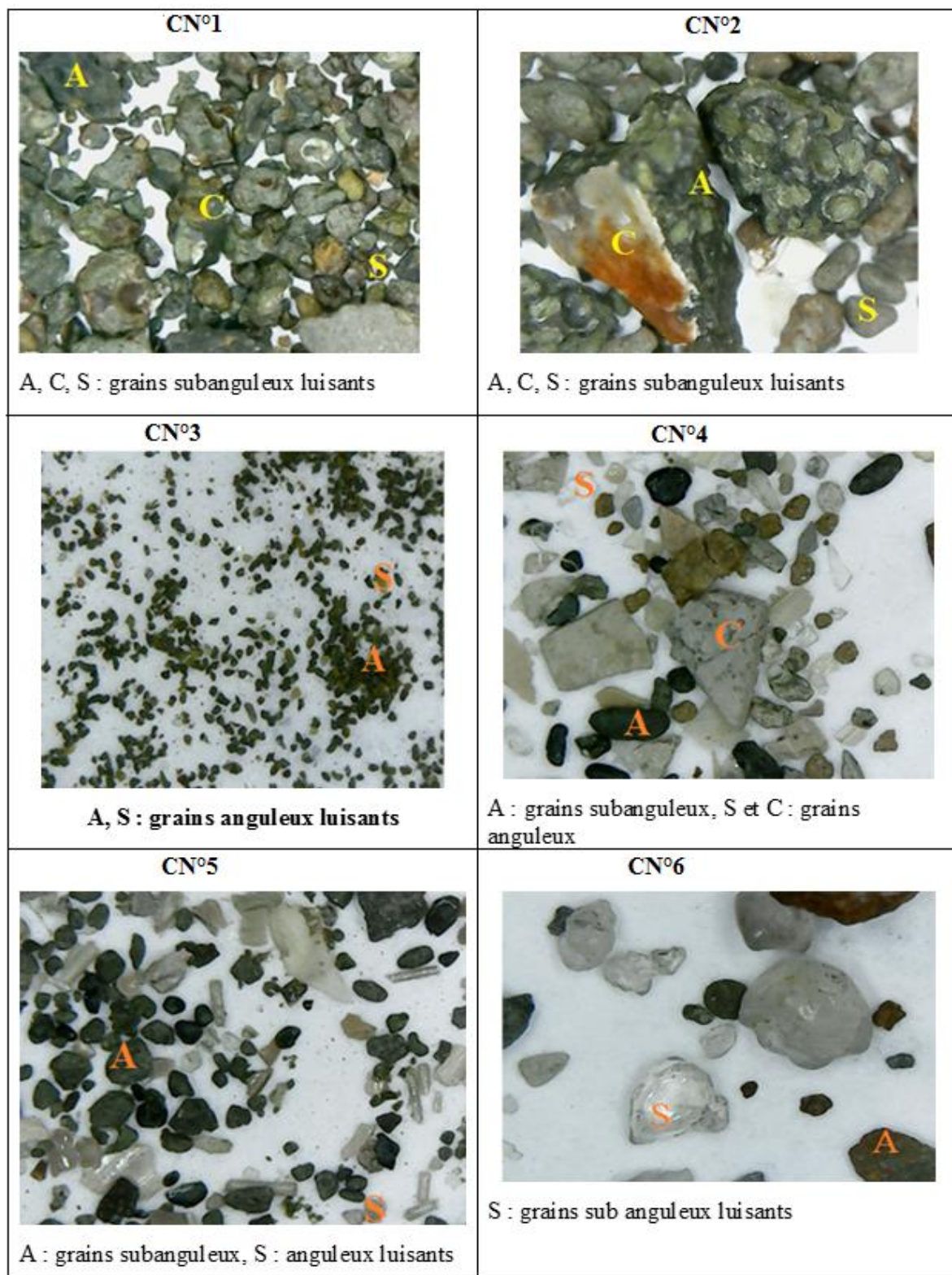


Photo 8 : Morphoscopie des différentes couches lithologiques (CN°1à CN°6) du Secteur d'Ambatolafia

II.2. Eléments biogéniques

Généralement, la composition de la faune varie dans le temps en fonction de plusieurs paramètres, tels que la nature du sédiment, la chimie de l'eau (notamment la salinité, l'oxygénation et la concentration en nutriments), ainsi que les variations du niveau de la mer (eustatisme). Ces facteurs influencent directement les conditions environnementales, modifiant la diversité, l'abondance et la répartition des organismes marins dans les milieux sédimentaires.

II.2.1. Différents groupes de microfossiles collectés

L'analyse quantitative des microfossiles a été effectuée après chaque lavage des échantillons. Cette analyse a permis d'estimer la diversité des groupes de microfossiles présents (foraminifères, microgastéropodes, microbrachiopodes).

- **Foraminifères**

Règne : ANIMAL

Embranchement : RHIZOPODES

Classe : FORAMINIFÈRES

Ordre : VAGINULINIDA

Famille : VAGINULINIDA

Genre : *Lenticulina*

Espèce : *Lenticulina gibba* D'ORBIGNY, 1826

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 9 : Vue externe

Description : La forme est benthique avec un test hyalin et planispiralé involute. L'ouverture terminale est radiée, suture visible mais peu arquée (Photo 9).

- **Brachiopodes**

Règne : ANIMAL

Embranchement : BRACHIOPODA

Classe : RHYNCHONELLATA

Ordre : TEREBRATULIDA

Famille : TEREBRATULIDAE

Genre : *Dyctyothyris*

Espèce : *Dyctyothyris coartata*, PARKINSON, 1811

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 10 : Vue externe

Description : La coquille est trigone, ornée de côtes rayonnantes, nombreuses et fines. Ces côtes présentent des stries d'accroissement avec une faible nodosité aux intersections.

Le crochet est assez élevé. La valve dorsale est dépourvue d'un large sillon médian, limité de chaque côté par un bourrelet saillant (Photo 10).

- **Mollusques**

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSCA

Classe : GASTEROPODA

Ordre : LITTORINIMORPHA

Famille : NATICIDAE

Genre : *Cepatia*

Espèce : *Cepatia cepacea*, PALLERONNI & HOLMES, 1981

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 11 : Vue externe

Description : La Coquille plus ou moins ovoïde ou sphéroïdale, enroulée en une spire, semi-elliptique ou ovale, à croissance rapide, le dernier tour très recouvrant et ventru. La surface est lisse. L'ouverture est semi-circulaire, semi elliptique ou ovale, à paroi axiale bordée par une callosité qui s'étend depuis l'angle de raccord du bord de l'ouverture sur la paroi de dernier tour, en surface, et vers l'extrémité basale. Cette callosité allongée ou arrondie en gros bouton, présente parfois un pli saillant à sa naissance, près du raccord du bord, rarement plusieurs à la suite (Photo 11).

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSCA

Classe : GASTEROPODA

Ordre : LITTORINIMORPHA

Famille : RISSOACAE

Genre : *Rissoacea*

Espèce : *Rissoacea sp.*, GRIS DE RISSOIDEA, 1847

Répartition stratigraphique : Crétacé-Actuel



Photo 12 : Vue externe

Description : La coquille est subglobuleuse, fissure ombilicale, côtes longitudinales chargées de nodosités. L'ouverture est large ovoïde, légèrement épanchée en haut et en bas (Photo 12).

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSCA

Classe : GASTEROPODA

Ordre : LITTTORINIMORPHA

Famille : NATICIDAE

Genre : *Cyclozyga*

Espèce : *Cyclozyga sp.*, KNIGHT, 1930

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen

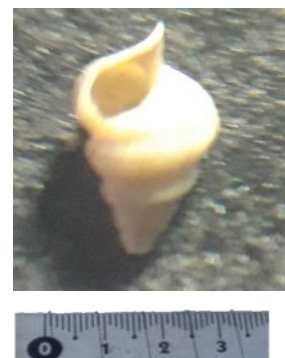


Photo 13 : Vue externe

Description : La coquille est enroulée en une spire conoïdale plus ou moins allongée, à tours arrondi. La surface externe est lisse ou chargée de stries spirales fines, ou encore de bande plate définie par des sillons intercalés. L'ouverture est ovale, un peu dilatée en arrière, s'attachant obliquement sur la paroi du dernier tour (Photo 14).

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSCA

Classe : GASTEROPODA

Ordre : LITTTORINIMORPHA

Famille : RISSOIDAE

Genre : *Rissoa*

Espèce : *Rissoa membranacea*, ADAMS, 1800

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 14 : Vue externe

Description : La coquille est ovale allongée, avec de nombreux tours dont le premier tour présente de nodosité et le dernier tour est grand prolongé en avant, brillante, à couleur vive, rarement ombiliquée (Photo 14).

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSCA

Classe : GASTEROPODA

Ordre : MUCHIISONINA

Famille : SOLINISCIDES

Genre : *Leptotygya*

Espèce : *Leptotygya carrizoensis*, WINCHELL, 1863

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 15 : Vue externe

Description : La coquille est de petite taille en pointe étroite et très aigue, formée par l'enroulement d'une spire à tours nombreux, plans et lisse, souvent luisant en surface. L'ouverture est longuement elliptique (Photo 15).

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSCA

Classe : GASTEROPODA

Ordre : ADAPEDONTA

Famille : SOLENIDAE

Genre : *Solen*

Espèce : *Solen sloanni*, SOPPANI, 1974

Répartition stratigraphique : Crétacé-



Photo 16 : Vue externe

Description : La Coquille est enroulée en une spirale formant pointe plus ou moins effilée, à tour nombreux presque plan. Les derniers tours sont plus courts que la somme des autres avec terminaison arrondie. L'ouverture est ovale dilatée avec un bord mince presque continu. La surface soit lisse, soit chargée des côtes ou stries spirales, parfois recoupées par des sillons transversaux accentués auprès des sutures postérieures (Photo 16).

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSCA

Classe : GASTÉROPODA

Sous-classe : PROSOBRANCHES.

Ordre : CAENOGASTROPODA

Famille : HYDROBIIDAE.

Genre : *Hydrobia*

Espèce : *Hydrobia dubuissoni*, BOUILLET, 1834

Répartition stratigraphique : Jurassique supérieur-Actuel

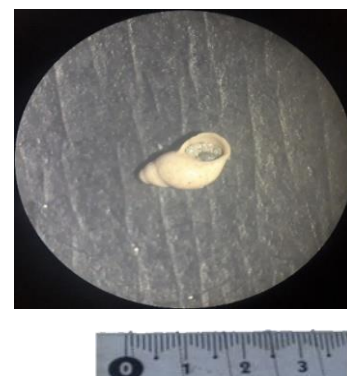


Photo 17 : Vue externe

Description : La coquille est de petite taille enroulée en une spirale, plus ou moins allongée, pointue, formée d'assez nombreux tours un peu arrondi et terminés par une ouverture ovale à bord mince. La surface est lisse (Photo 17).

Conclusion

Les résultats de l'analyse des microfossiles (Figure 13) de l'Albien d'Ambatolafia indiquent une rareté significative des spécimens. La faune de foraminifères est représentée par un unique spécimen du genre *Lenticulina* sp. Des microgastéropodes (*Rissoa membranacea*, *Cyclozyga* sp., *Rissoacea* sp.) et des microbrachiopodes (*Dyctyothis coartata*) ont également été identifiés, bien qu'en faible nombre.

La rareté des foraminifères, généralement abondant dans les sédiments marins, suggère des conditions environnementales défavorables à leur développement et/ou à leur préservation.

Plusieurs facteurs peuvent expliquer cette faible diversité et cette faible quantité :

- **Conditions physico-chimiques du milieu** : Des variations de la salinité, de la température, de l'oxygénation ou de la turbidité de l'eau peuvent limiter le développement des foraminifères. Une analyse géochimique des sédiments pourrait apporter des informations complémentaires sur les conditions paléoenvironnementales.
- **Disponibilité des nutriments** : Une faible concentration en nutriments dans l'eau peut également limiter la prolifération des foraminifères.
- **Dissolution diagénétique** : Les tests calcaires des foraminifères peuvent être dissous après leur dépôt, en particulier dans des environnements à faible taux de sédimentation ou soumis à des circulations de fluides diagénétiques et l'oxydation partielle dans le milieu.

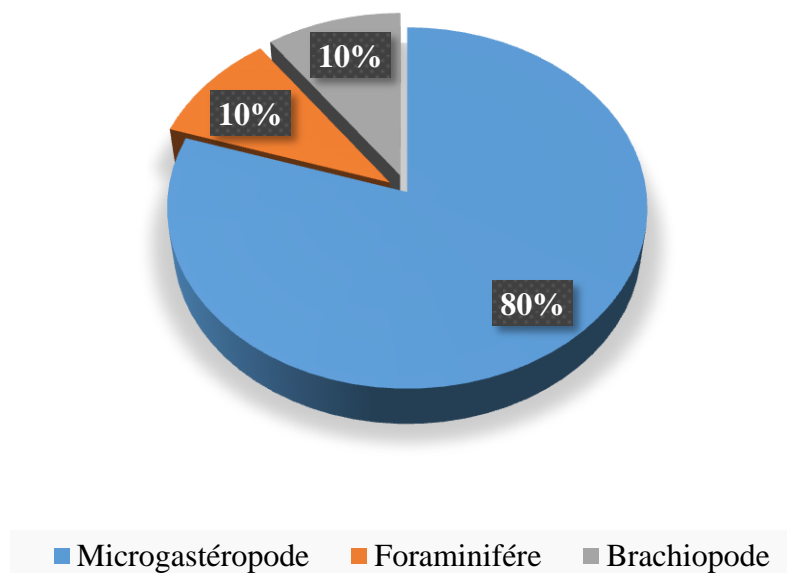


Figure 13 : Répartition des microfossiles de l'Albien d'Ambatolafia

II.2.2. Différents groupes de macrofossiles collectés

II.2.2.1. Evaluation qualitative des macrofossiles

L'étude qualitative des macrofossiles, et plus particulièrement des ammonites, repose notamment sur l'analyse morphologique de la coquille, incluant sa forme générale, ses dimensions, ses ornements (côtes, tubercules, épines, etc.) ainsi que la structure de la ligne de suture, éléments essentiels pour la détermination taxonomique.

- **Mollusques**

- **Céphalopodes**

- ✓ **Ammonites de formes enroulées**

La classification systématique ainsi que la description détaillée des échantillons recueillis sont présentées ci-après, en se basant sur leurs caractéristiques morphologiques.

Echantillon codé 01-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous-Ordre : ANCYLOCERATINA, Wiedmann, 1966

Super-Famille : DOUVILLEICERATAEAE, Parona & Bonarelli, 1897

Famille : DOUVILLEICERATIDAE, Parona & Bonarelli, 1897

Sous-Famille : DOUVILLEICERATINAE, Parona & Bonarelli, 1897

Genre : *Douvilleiceras* DE GROSSOUVRE, 1894

Espèce : *Douvilleiceras mammillatum*, Schlotheim, 1813

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Photo 18 : Différente vue de l'espèce *Douvilleiceras mammillatum*

Description :

La coquille est très épaisse à enroulement semi-évolutive ; la section du tour est arrondie ou circulaire avec un ombilic large. L'ornementation comporte des fortes côtes radiales, ces côtes portent des tubercules ombilicaux, latéraux et ventro-latéraux (Photo 18).

Echantillon codé 02-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous-Ordre : ANCYLOCERATINA, Wiedmann, 1966

Super-Famille : DOUVILLEICERATACEAE, Parona & Bonarelli, 1897

Famille : DOUVILLEICERATIDAE, Parona & Bonarelli, 1897

Sous-Famille : DOUVILLEICERATINAE, Parona & Bonarelli, 1897

Genre : *Douvilleiceras* DE GROSSOUVRE, 1894

Espèce : *Douvilleiceras albense*, Spatt, 1900

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)

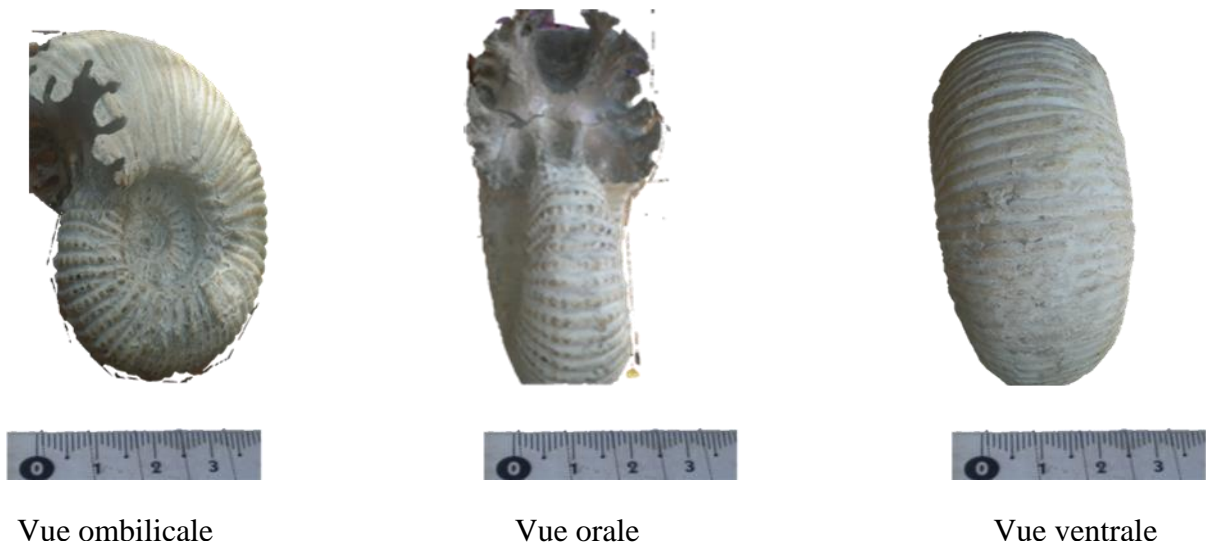


Photo 19 : Différente vue de l'espèce *Douvilleiceras albense*

Description :

La coquille est très épaisse à enroulement semi-évolutive; la section du tour est arrondie ou circulaire avec un ombilic large. L'ornementation comporte des fortes côtes radiales, ces côtes sont plates avec des tubercules petits et très serrés. Les côtes deviennent lisses au niveau de chambre d'habitation (Photo 19).

Echantillon codé 03-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous- Ordre : AMMONITINA, Hyatt, 1889

Super- Famille : DESMOCERATACEAE, Zittel, 1895

Famille: CLEONICERATIDAE, Whitehouse, 1926

Genre: *Cleoniceras*, Parona et Bonarelli ,1897

Espèce : *Cleoniceras besairiei*, Collignon. 1949

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Vue ombilicale



Vue orale

Photo 20 : Différente vue de l'espèce *Cleoniceras besairiei*

Description :

La coquille est involute, avec un tour interne serré, à flancs nettement convexes ; la section est ogivale. L'ornementation présente des côtes plates, de faible falciforme, épaisses, pas de trace de tubercules (Photo 20).

Echantillon codé 04-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous- Ordre : AMMONITINA, Hyatt, 1889

Super- Famille : DESMOCERATACEAE, Zittel, 1895

Famille: CLEONICERATIDAE, Whitehouse, 1926

Genre : *Cleoniceras*, Parona et Bonarelli ,1897

Espèce : *Cleoniceras madagascarensis*, Collignon. 1949

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Vue ombilicale

Photo 21 : Vue ombicale de l'espèce *Cleoniceras madagascarensis*

Description :

L'ammonite est moyennement épaisse ayant tendance à s'aplatir légèrement. Le tour est moyennement embrassant, découvrant un ombilic voisin du quart du diamètre maximal. La paroi ombilicale est oblique. Les flancs sont nettement convexes, s'abaissent jusqu'à la région externe subaiguë.

La section du tour est ogivalo-elliptique. L'ornementation comprend des côtes très fortes, peu serrées et falciformes. Cette ornementation s'efface progressivement, d'abord sur les flancs, puis sur la région externe. On distingue très nettement des fines côtes au nombre de cinq à six entre deux constrictions consécutives, celles-ci sont arquées, convexe en avant, traversant la région externe en dessinant un chevron accentué vers l'avant. La partie interne du flanc est lisse (Photo 21).

Echantillon codé 05-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous-Ordre : AMMONITINA, Hyatt, 1889

Famille : PHYLLOCERATIDAE, Zittel 1887

Sous-Famille : PHYLLOCERATINAE, Prinz 1904

Genre : *Phylloceras* SUESS 1854-1865

Espèce: *Phylloceras velledae*, Michelin

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 22 : Différente vue de l'espèce *Phylloceras velledae*

Description :

L'enroulement de la coquille est involute épaisse à flanc bombé. Le bord ventral est largement arrondi, la section du tour est circulaire. L'ornementation comprend des côtes fines flexueuses, absentes sur le tiers interne du flanc et bien marquée sur le tiers externe du flanc et sur la région ventrale, mais les proportions sont bien différentes (Photo 22).

Echantillon codé 06-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous-Ordre : AMMONITINA, Hyatt, 1889

Famille : TRAGONITIDAE, Hyatt, 1900

Genre : *Eotetragonites*, Breistroffer, 1947

Espèce : *Eotetragonites umbilicostratus*, Collignon, 1953

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Photo 23 : Différente vue de l'espèce *Eotetragonites umbilicostratus*

Description :

La coquille présente un tour involute. Les flancs sont légèrement convexes et presque plats, reliés à la suture des tours précédent. La section des tours est subrectangulaire. Un ombilic large et profond. Ornementation : à la suture ombilicale s'élève à partir d'un léger bourrelet des costules serrées, fines, limitées en hauteur à la moitié du mur ombilical (Photo 23).

Echantillon codé 07-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous -Ordre : AMMONITINA, Hyatt, 1889

Super -Famille : DESMOCERATOIDAE, Zittel, 1895

Famille : DESMOCERATAEAE, Zittel, 1895

Sous-Famille : PUZOSIINAE, Spath, 1922

Genre : *Puzosia*, Bayle, 1878,

Espèce : *Puzosia nov.sp*, Collignon, 1963

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Photo 24 : Différente vue de l'espèce *Puzosia nov.sp.*

Description :

L'enroulement de la coquille est évolutive, section quadratique, porte de 4 à 6 constrictions par tour. Il y a 15 à 25 côtes entre deux constrictions, faibles et concaves en bas des flancs, se renforcent et devenant convexes à mi-flancs, de nouveau concaves en haut des flancs, puis fortement projetées pour traverser le ventre en une large convexité. Les constrictions sont absentes sur la partie de la chambre d'habitation (Photo 24).

Echantillon codé 08-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous -Ordre : AMMONITINA, Hyatt, 1889

Super- Famille : DESMOCERATOIDAE, Zittel, 1895

Famille : DESMOCERATACEAE, Zittel, 1895

Sous-Famille : PUZOSIINAE, Spath, 1922

Genre : *Puzosia*, Bayle, 1878

Espèce : *Puzosia malandiandroensis nov.sp*, Collignon, 1963

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)

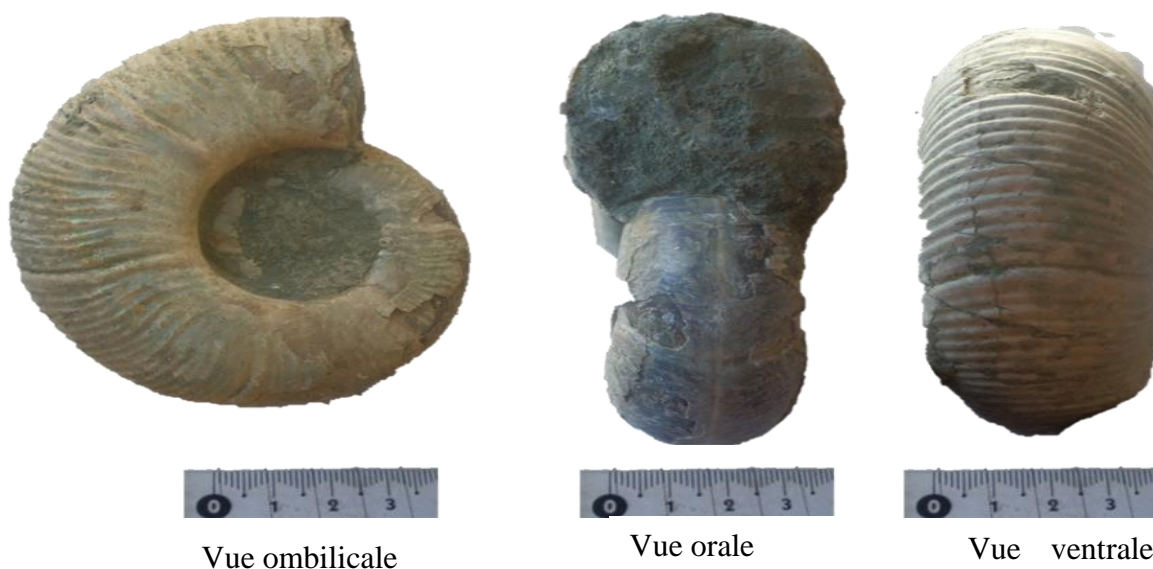


Photo 25 : Différentes vues de l'espèce *Puzosia malandiandroensis nov.sp*

Description :

Le tour est épais et haut, à flanc légèrement convexe et s'abaisse doucement vers la région externe. La section est ovale. Le mur ombilical est très élevé, vertical avec un bord arrondi.

Les ornements présentent des constrictions caractérisées par l'épaississement progressif de leurs lèvres postérieures. La section du tour est subquadratique (Photo 25)

Echantillon codé 09-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous -Ordre : AMMONITINA, Hyatt, 1889

Super-Famille : DESMOCERATOIDEA, Zittel, 1895

Famille : SILESITIDAE, Hyatt, 1900

Genre : *Neosilesites*, Breistroffer, 1951

Espèce : *Neosilesites ambatolafiensis*, Collignon, 1963

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 26 : Différente vue de l'espèce *Neosilesites ambatolafiensis*

Description :

L'enroulement de la coquille est évolutive à section circulaire. Le flanc est plat avec un ventre largement arrondi ; les côtes primaires sont aiguës, denses et espacées, se divisant dans la partie externe des flancs en deux côtes secondaires fines qui traversent le ventre (Photo 26).

Echantillon codé 010-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous-Ordre : AMMONITINA, Hyatt, 1889

Super-Famille : DESMOCERATOIDEA, Zittel, 1895

Famille : SILESITIDAE, Hyatt, 1900

Genre : *Neosilesites*, Breistroffer, 1951

Espèce : *Neosilesites maximus*, Collignon, 1963

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Photo 27 : Vue ombilicale de l'espèce *Neosilesites maximus*

Description :

La coquille présente un enroulement évolutive, la section de la tour est circulaire. Le flanc est complexe, le bord externe est bien arrondi avec un ombilic large. L'ornementation comporte des côtes serrées, tranchantes. La ligne des sutures n'est pas visible (Photo 27).

Echantillon codé 011-AMBL

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSQUES

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier 1795

Ordre : Ammonites

Sous-Ordre : Ammonitina

Super-Famille : Scaphitoidea

Famille : Scaphitidae

Genre : *Scaphites*

Espèce : *Scaphites manasoensis nov.sp*

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)

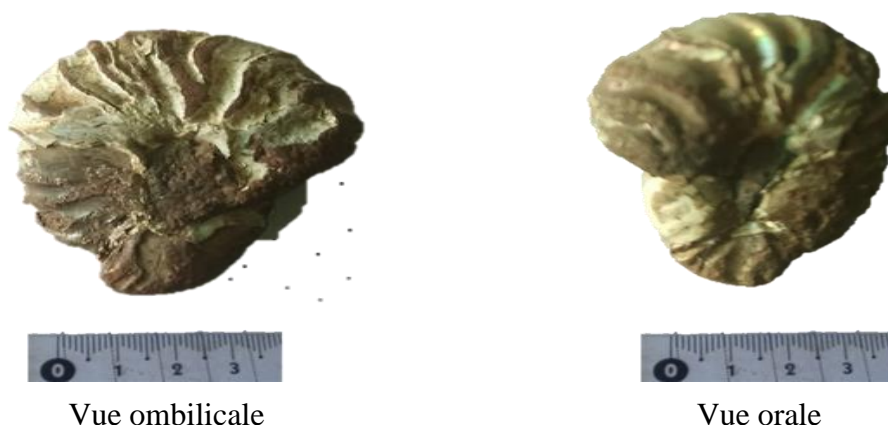


Photo 28 : Différente vue de l'espèce *Scaphites manasoensis nov.sp*

Description :

La forme est étirée en hauteur. La spire est ornée de côtes principales fines donnant 2-3 côtes secondaires, d'abord radiales, puis devenant convexes en avant. A partir du début de la chambre d'habitation (bas de la hampe) les côtes principales se desserrent et se surélèvent sans donner

de tubercule : le plus souvent elles donnent deux secondaires et, entre elles, il y a une intercalaire (Photo 28).

✓ **Ammonite de formes déroulées.**

Echantillon Codé : 12-AMBL

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSQUES

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1795

Sous-Classe : AMMONOIDEA

Ordre : AMMONITIDA

Sous-Ordre : LYTOCERATINA, Hyatt, 1889

Super-Famille : HAMITACEAE, Hyatt, 1900

Famille : HAMITIDAE, Hyatt, 1900

Genre : *Plesiohamites*, Beistoffer, 1947

Espèce : *Plesiohamites* sp.

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 29 : Vue latérale *Plesiohamites* sp

Description :

La coquille est en forme de J ou de crochet. La partie initiale est enroulée en une petite spirale, puis la coquille se déroule en une tige plus ou moins droite, parfois légèrement incurvée. La section du tour est ovale, l'ornementation est formée de côtes fines obliques et la ligne de suture est très découpée (Photo 29).

Echantillon Codé : 13-AMBL

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSQUES

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier 1797

Sous-Classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous-Ordre : LYTOCERATINA, Hyatt, 1889

Super-Famille : LYTOCERATACEAE, Buckman, 1894

Famille : LYTOCERATIDAE, Neumayr, 1875

Sous-Famille : LYTOCERATINAE, Neumayr, 1927

Genre : *Pictetia*

Espèce : *Pictetia asteriana*, Uhlig, 1883

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Photo 30 : Vue latérale de l'espèce *Pictetia asteriana*

Description :

Elle présente un enroulement de type criocône, c'est-à-dire enroulement très lâche. Les tours ne se touchent pas ou très peu avec une section du tour circulaire, l'ornementation est faible et la ligne de suture est très découpée (Photo 30).

Echantillon Codé : 14-AMBL

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSQUES

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1795

Sous-Classe : AMMONOIDEA

Ordre : AMMONITIDA

Sous-Ordre : LYTOCERATINA, Hyatt, 1889

Super-Famille : TURRILITACEAE, Meek, 1876

Famille : HAMITIDAE, Hyatt, 1900

Genre : *Hemiptyhoceras*, Spath, 1925

Espèce : *Hemiptyhoceras* sp.

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 31 : Vue latérale.

Description :

La coquille est en forme de U ou de trombone. Une partie de la coquille est enroulée en une spirale, puis elle se déroule en une tige qui se recourbe ensuite, formant une boucle. Les côtes sont intercalées par deux bandes plus ou moins grandes périodiquement. La section du tour est arrondie (Photo 31).

Echantillon Codé : 15-AMBL**Nombre : 01**

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSQUES

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1795

Sous-Classe : AMMONOIDEA

Ordre : AMMONITIDA

Sous-Ordre : LYTOCERATINA, Hyatt, 1889

Super-Famille: TURRILITACEAE, Meek, 1876

Famille : ANISOCERATIDAE, Hyatt, 1900

Genre : *Metahamites* d'Orb. Collignon, 1963Espèce : *Metahamites sp.aff.sablieri**(Hamites sablieri, Orbigny, 1842)*

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen

**Photo 32 :** Vue latérale de l'espèce *Metahamites sp.aff.sablieri***Description :**

Similaire à *Plesiohamites*, l'espèce *Metahamites sp.aff. sablieri* présente une coquille en forme de bâtonnet ou de crochet. La partie initiale est enroulée, puis la coquille se déroule en une tige droite ou légèrement incurvée. La section du tour est circulaire, l'ornementation est constituée par des côtes obliques invariables. La ligne de suture est de type ammonitique (Photo 32).

Echantillon Codé : 16-AMBL

Superfamille : TURRILITACEA, Meek, 1876

Famille : ANISOCERATIDAE, Hyatt, 1900

Genre : *Ephamulina*, Collignon, 1963

Espèce : *Ephamulina cf. arcuta*, Collignon, 1963

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Vue latérale

Photo 33 : Vue latérale de l'espèce *Ephamulina cf. arcuta*

Description :

La coquille qui commence par une petite spirale, puis se déroule en une longue tige droite, comme. Elle présente une ornementation extrêmement fine de faisceaux de 5 à 6 côtes serrées, annulaires, séparées par des secteurs lisses sur lesquels apparaissent les traces de gros tubercules probablement au nombre de deux seulement. Sur la région dorsale, les côtes dessinent un sinus arrondi en avant. Une ligne de suture persillée. Le lobe latéral énorme, encadré par les extrémités du lobe siphonal étroit et du lobe anti siphonal largement étalé et en particulier, est grand et finement divisé (Photo 33).

✓ **Nautilus**

Echantillon Codé : 17-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier, 1797

Ordre : NAUTILIDA, SPATH, 1927

Famille : NAUTILIDAE, SPATH, 1927

Genre : *Cymatoceras*, HYATT, 1883

Espèce : *Cymatoceras (Nautilus) sakalavus*, Collignon ,1949

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen

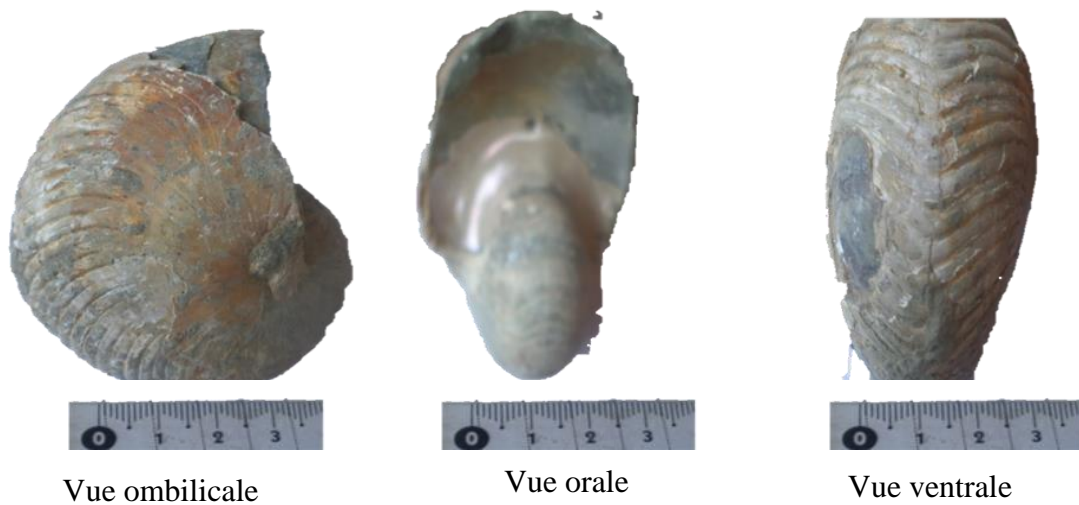


Photo 34 : Différente vue de l'espèce *Cymatoceras (Nautilus) sakalavus*

Description :

La forme est massive et large. Les flancs sont fortement convexes, la région ventrale est large, section du tour subtrapézoïdale. L'ombilic est étroit et très profond, à parois subverticales. Le siphon se trouve en moyenne au tiers inférieur de la hauteur des tours, au-dessus de la région dorsale. L'ornementation comporte un grand nombre de côtes fortes, saillantes, serrées et séparées par des espaces intercostaux de même largeur (Photo 34).

➤ **Lamellibranches**

Echantillon Codé : 21-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : LAMELLIBRANCHES

Famille : CYPRINIDAE, Zittel

Genre : *Venelicardia*, Stol, 1870

Espèce : *Venelicardia lineolata*, Sow

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen



Photo 35 : Vue externe de l'espèce *Venelicardia lineolata*

Description :

Coquille forte, épaisse, large, subquadrangulaire, très arrondie, inéquilaterale. Bords antérieur et inférieur arrondis. Bord postérieur nettement oblique, formant un angle obtus avec le bord inférieur. Crochet fort, proéminent recourbé en avant au-dessus de la lunule. Lunule cordiforme, excavée, bien délimitée. Écusson étroit, profond limité par une carène aiguë. L'ornementation comprend des stries d'accroissement très fines, très serrées, il y a aussi quelques plis importants vers les bords, variables en nombre et en situation suivant les individus. Charnière invisible car les deux valves sont unies (Photo 35).

Echantillon Codé : 22-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : LAMMELLIBRANCHES

Famille : ARCIDAE, Lamark

Genre : *Arca*, Linne, 1758

Espèce : *Arca chavani*, Collignon , 1949

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Photo 36 : Vue externe de l'espèce *Arca chavani*

Description :

La valve est de forme subparallelipédique. Le crochet est sensiblement élevé, saillant, au-dessus d'une charnière rectiligne. Le bord antérieur est largement arrondi, bord inférieur recourbé, bord postérieur rectiligne. L'ornementation comporte des stries d'accroissement concentriques très fines. Avec de l'aire ligamentaire triangulaire, très large et très basse, paraissant striée. La cavité palléale et les traces des muscles adducteurs sont cachées par des gangues (Photo 36).

➤ **Gastéropodes**

Echantillon Codé : 18-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : GASTEROPODA, Cuvier, 1798

Ordre : NEOTAENIOGLOSSA

Famille : NATICIDAE, Forbes

Sous-Famille : NATICINAE

Genre : *Gyrodes* , Conrad, 1860

Espèce : *Gyrodes aff tenelis*, Stol

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)



Photo 37 : Différente vue de l'espèce *Gyrodes aff tenelis*

Description :

La coquille est très courte composée de deux tours en gradins, elle se reconnaît à sa spire basse dont le dernier tour est très considérable. Enroulement dextre, Omphale large. Péristome continu, subelliptique. L'ornementation comprend des stries d'accroissement transversales très fines et très serrées (Photo 37).

Echantillon Codé : 19-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : GASTEROPODA, Cuvier, 1798

Ordre : NEOTAENIOGLOSSA

Famille : APORRHAIIDAE, Adams, 1858.

Genre : *Anchura*, Conrad, 1860

Sous-Genre : *Perisoptera*, Tate, 1865

Espèce : *Périsoperai besairiei*, Collignon 1949



Vue latérale

Photo 38 : Vue latérale de l'espèce *Périscopera besairiei*

Description :

La coquille est de taille moyenne fusiforme. Enroulement dextre. Sept tours sur ces exemplaires (on a un moule interne et un moule externe. Le péristome a la forme ovale. L'ornementation comprend des côtes transverses, fines, légèrement obliques. Recoupées sur toute la surface du tour par de costules longitudinales, fines, de plus en plus fines de la suture supérieure à la suture inférieure, produisant un treillisage à maille fine allongées longitudinalement. Sur le dernier tour, à proximité de l'ouverture, les costules s'espacent et se renforcent (Photo 38).

- **Vermidiens**

- **Brachiopodes**

Echantillon Codé : 20-AMBL

Règne : ANIMALIA, Linnaeus, 1758.

Embranchement : MOLLUSCA, Linnaeus, 1758.

Classe : BRACHIOPODES, Suzanne Fabre

Ordre : ARTICULES

Famille: TEREBRATULIDAE, King Emend Davidson

Sous-Famille: PUZOSIINAE, Spath, 1922

Genre: *Terebratula*, Liwyd, 1696

Espèce : *Terebratula sella*, Sow.

Répartition stratigraphique : Crétacé moyen (Albien inférieur)

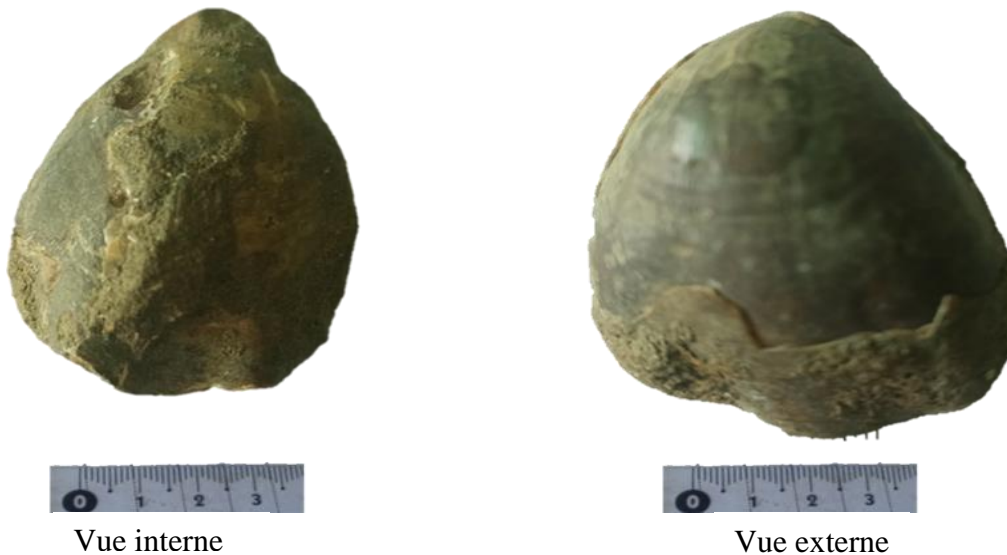


Photo 39 : Différente vue de l'espèce *Terebratula sella*

Description :

La coquille est ovale peu globuleuse, la valve pédonculaire ou valve ventrale généralement un peu plus bombée que la valve brachiale ou valve dorsale qui présente deux plis courts accentués. Crochet court, épais à l'angle du bec incurvé. Foramen grand et commissure frontale rectimarginale. Les commissures latérales plus ou moins incurvées. Le bord frontal, très sinueux, a la forme d'un M renversé très ouvert. Le test est lisse, avec des lignes d'accroissement fines et serrées (Photo 39).

Conclusion

Les macrofossiles sont abondants et généralement bien conservés dans ce gisement. Les ammonites sont particulièrement nombreuses, dominées par des formes planispiralées (enroulées). On observe également quelques ammonites à coquille déroulée. D'autres groupes de macrofossiles sont présents, notamment des brachiopodes et des lamellibranches.

L'abondance et la bonne conservation des macrofossiles suggèrent des conditions de fossilisation favorables. Cela pourrait indiquer un enfouissement rapide après la mort, limitant la dégradation des organismes et l'action des prédateurs. Un environnement calme, avec peu de courants marins, pourrait également contribuer à la préservation des fossiles.

La dominance des ammonites planispiralées (enroulées) indique un environnement marin ouvert et probablement pélagique (nectonique ou planctonique). Ces formes sont adaptées à la nage active. La présence, quoique moins fréquente, d'ammonites déroulées suggère une diversification des niches écologiques. Ces formes pourraient être adaptées à des modes de vie necto-benthiques (nageant près du fond) ou benthiques (vivant sur le fond marin).

Leur présence pourrait indiquer des variations locales de l'environnement, comme des zones moins profondes ou plus turbides.

La présence de brachiopodes et de lamellibranches complète le tableau paléoécologique. Ces organismes sont généralement benthiques et fournissent des informations sur la nature du substrat et les conditions environnementales qui régnaient sur le fond marin. L'analyse de ces groupes peut aider à déterminer la profondeur de l'eau, la salinité, et la disponibilité en oxygène.

L'assemblage fossile décrit, avec son abondance d'ammonites planispiralées, quelques formes déroulées, et la présence de brachiopodes et lamellibranches, suggère un environnement marin diversifié durant l'Albien dans le secteur d'Ambatolafia.

Association faunistique de l'Albien d'Ambatolafia

L'association faunistique des ammonites de l'Albien offre une riche diversité qui est importante. Les ammonites, en association avec d'autres fossiles marins, permettent de reconstituer les environnements marins anciens et de comprendre les dynamiques écologiques de cette période du Crétacé moyen.

Généralement, la composition de la faune varie avec le temps, la nature du sédiment et le chimisme de l'eau ainsi qu'en fonction de la variation du niveau de la mer (eustatisme). Les Foraminifères sont rares dans les dépôts du secteur d'Ambatolafia. Alors que les microgastéropodes sont abondants.

Dominance des Céphalopodes :

- Les céphalopodes représentent 68 % (167 spécimens) de l'échantillon total, ce qui est très significatif. Cela suggère un environnement marin, probablement pélagique, favorable à ces organismes nageurs comme les ammonites et les bélemnites (Figure 14).
- Les lamellibranches (bivalves) constituent 22 % (54 spécimens) de l'échantillon. Leur présence indique des zones benthiques avec un substrat adapté à leur mode de vie (fixé ou enfoui dans le sédiment).
- Les gastéropodes représentent 9 % (21 spécimens) de l'assemblage. Leur présence modérée peut indiquer des zones moins profondes ou des habitats variés sur le fond marin.
- Les brachiopodes ne constituent que 1 % (2 spécimens) de l'échantillon. Cette faible

représentation pourrait suggérer des conditions moins favorables pour ces organismes, peut-être en raison de la compétition avec les bivalves ou des conditions environnementales spécifiques.

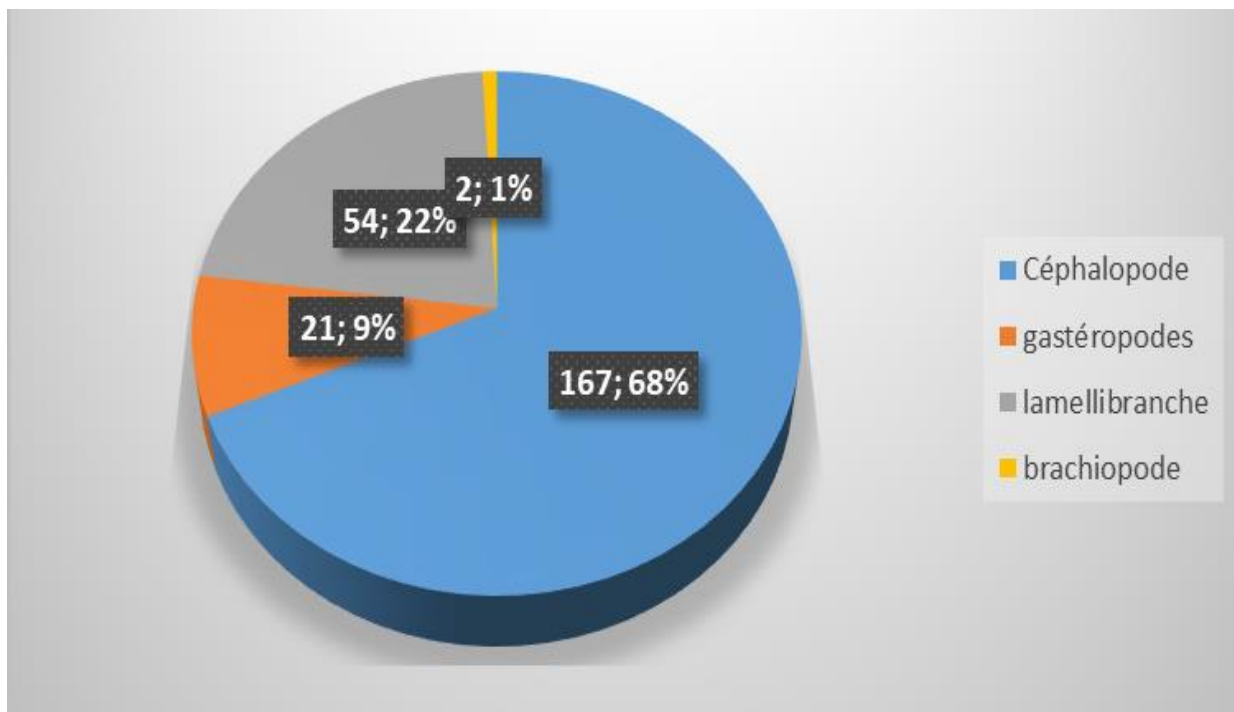


Figure 14 : Répartition des mollusques dans le Secteur d'Ambatolafia

Interprétation :

- L'environnement semble être principalement marin néritique, favorable aux céphalopodes pélagiques.
- La présence significative de lamellibranches et de gastéropodes indique également des habitats benthiques diversifiés.
- La faible présence de brachiopodes pourrait indiquer un déclin de ce groupe à cette époque ou des conditions locales moins favorables pour eux.
- Cette répartition suggère un écosystème marin diversifié, probablement une zone de transition entre des environnements plus profonds (dominés par les céphalopodes) et des zones plus côtières ou de plateau continental (avec les bivalves et gastéropodes).

Cette interprétation fournit un aperçu de l'écologie marine de l'Albien dans le secteur d'Ambatolafia, reflétant probablement des conditions marines relativement stables et productives.

La répartition des ammonites selon leur mode d'enroulement dans un échantillon donné est illustrée par la figure 15 ci-dessous.

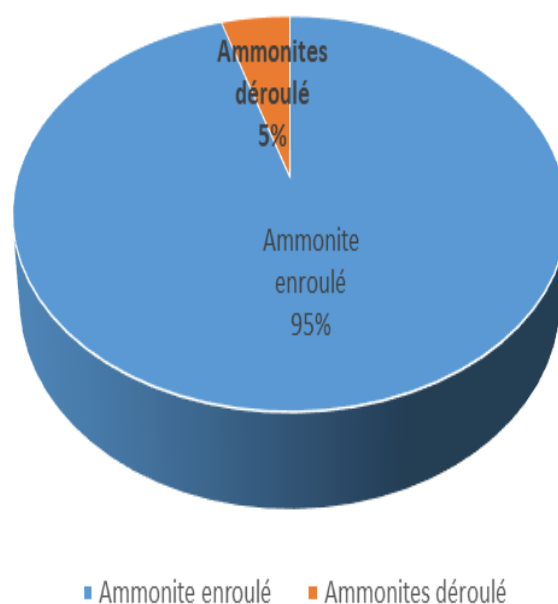


Figure 15 : Répartition des ammonites suivant leur mode d'enroulement

Dominance des ammonites enroulées :

- 95 % des ammonites observées sont enroulées. C'est la forme typique et la plus courante des ammonites, avec une coquille spiralée dans un plan.
- Cette forte proportion suggère des conditions environnementales stables et favorables aux formes "classiques" d'ammonites.

Présence une minoritaire d'ammonites déroulées :

- Seulement 5% des ammonites sont déroulées. Ces formes sont plus rares et peuvent inclure des genres comme *Hamites*, *Ancyloceras*, ou *Baculites*.
- Les ammonites déroulées sont souvent considérées comme des formes plus spécialisées ou adaptées à des niches écologiques particulières.

Implications paléoécologiques :

- La prédominance des formes enroulées suggère un environnement marin "typique" pour les ammonites, probablement un milieu pélagique ouvert.

- La présence, même faible, de formes déroulées indique une certaine diversité d'habitats ou de modes de vie au sein de l'écosystème.

Considérations évolutives :

- Cette répartition reflète la tendance générale chez les ammonites, où les formes enroulées étaient plus courantes et les formes déroulées représentaient souvent des expérimentations évolutives.

Interprétation stratigraphique :

La proportion d'ammonites déroulées peut parfois varier selon les périodes géologiques. Sans contexte temporel précis, il est difficile d'en tirer des conclusions stratigraphiques, mais cette faible proportion pourrait être caractéristique de certains intervalles de temps. Cette répartition fournit un aperçu intéressant de la morphologie des ammonites dans cet échantillon, reflétant probablement des conditions environnementales favorables aux formes classiques enroulées, avec une niche écologique minoritaire occupée par les formes déroulées.

Autres fossiles présents dans l'Albien du secteur d'Ambatolafia

Pendant l'Albien, les macrofossiles (Phylloceratidae, Cleoniceratidae, Douvelliceratidae ...) sont très abondants dans le secteur d'Ambatolafia alors que les microfossiles (foraminifères) sont rares représentés uniquement par l'espèce *Lenticulina gibba* (avec un seul spécimen).

II.2.2.2. Variations morphologiques des ammonites

II.2.2.2.1 Comparaison des paramètres morphométriques par espèce

Les résultats des calculs de la moyenne, de la variance et de l'écart-type des paramètres morphométriques des espèces étudiées permettent d'analyser les variations morphologiques au sein des populations d'une même espèce, et ainsi de mieux comprendre les relations morphologiques entre ces populations.

- **Comparaison de la moyenne, variance et écart-type des paramètres morphométriques (Annexe II)**

Espèce 1 : *Douvilleiceras mammillatum*, Schlotheim, 1813

L'espèce 1 présente des dimensions moyennes sur les trois variables mesurées : un diamètre moyen de 7,52, une épaisseur de 3,85 et une hauteur de 2,68. Cependant,

les écarts-types relativement élevés (4,10 pour le diamètre, 2,49 pour l'épaisseur et 1,73 pour la hauteur) traduisent une forte hétérogénéité morphologique au sein de cette population. Cette dispersion suggère que les individus de cette espèce varient considérablement en taille et en forme, ce qui pourrait indiquer une diversité écologique ou génétique importante, voire la présence de plusieurs stades de croissance ou sous-groupes morphologiques.

Espèce 2 : *Cleoniceras besairiei*, Collignon, 1949

L'espèce 2 se distingue par des dimensions supérieures à celles des autres espèces, notamment avec un diamètre moyen de 10,81 et une hauteur impressionnante de 5,57. L'épaisseur moyenne est plus modeste (2,77) mais reste notable. Les écarts-types sont également très élevés, en particulier pour le diamètre (7,11) et la hauteur (3,59), indiquant une très grande variabilité morphologique. Cette hétérogénéité peut être interprétée comme le reflet d'une large gamme de tailles, peut-être liée à une longue période de croissance, à un fort dimorphisme ou à des conditions environnementales variables.

Espèce 3 : *Phylloceras velleadae*, Michelin

Chez l'espèce 3, les dimensions moyennes sont intermédiaires : le diamètre moyen est de 4,61, l'épaisseur de 2,39, et la hauteur de 2,80. Les écarts-types modérés (2,26; 1,22; 1,56) indiquent une variabilité présente mais raisonnable. Cela suggère une population relativement stable, avec des formes modérées et peu extrêmes. L'équilibre entre les trois dimensions pourrait refléter une morphologie fonctionnelle et conservée, adaptée à un environnement stable ou à une niche bien définie.

Espèce 4 : *Noesilesites ambatolafiensis*, Collignon, 1963

L'espèce 4 est clairement la plus petite de toutes les espèces étudiées, avec un diamètre moyen de seulement 2,71, une épaisseur de 0,72, et une hauteur de 0,92. Les écarts-types très faibles (0,52 ; 0,18 ; 0,16) montrent une homogénéité remarquable entre les individus. Cette très faible variabilité suggère une forte stabilité morphologique, probablement liée à une spécialisation écologique stricte ou à un faible brassage génétique. Cette espèce semble très standardisée dans sa forme.

Espèce 5 : *Puzosia malandiandroensis*, Collignon, 1963

L'espèce 5 affiche des dimensions relativement grandes, avec un diamètre moyen de 9,48, une épaisseur de 3,66 et une hauteur de 4,60. Contrairement à d'autres grandes espèces

comme ESP2, cette population est très homogène : les écarts-types sont faibles (0,83 ; 0,39 ; 0,73).

Cela traduit une forte constance morphologique. Cette homogénéité associée à de grandes dimensions peut indiquer une espèce bien définie, peut-être très spécialisée ou stabilisée évolutivement.

Espèce 6 : *Puzosia sp* , Collignon, 1963

L'espèce 6 est de taille plutôt petite, avec un diamètre moyen de 3,58, une épaisseur de 1,84 et une hauteur de 1,68. Elle se distingue par une forte dispersion morphologique, comme en témoignent ses écarts-types relativement élevés par rapport à la moyenne (1,66 ; 1,15 ; 0,87). Cela révèle une variabilité importante dans la forme des individus, pouvant s'expliquer

par une diversité de stades ontogéniques, un habitat varié ou un brassage génétique plus important que pour d'autres espèces plus homogènes.

Espèce 7 : *Neosilesites maximus*, Collignon 1963

Enfin, l'espèce 7 présente des tailles modestes avec une moyenne de 3,03 pour le diamètre, 1,08 pour l'épaisseur et 1,70 pour la hauteur. La dispersion reste faible à modérée (écarts-types de 0,61 ; 0,22 ; 0,41), ce qui indique une population relativement homogène. Cette espèce montre un bon équilibre entre stabilité morphologique et légère variabilité, peut-être en réponse à des conditions environnementales modérément fluctuantes ou à une diversité contrôlée par la sélection naturelle.

- **Comparaison d'une covariance des paramètres morphométriques**

Rappel

- Une covariance positive indique que les deux variables évoluent dans le même sens : quand l'une augmente, l'autre aussi.
- Une covariance négative suggère une relation inverse : quand l'une augmente, l'autre diminue.
- Une valeur proche de 0 indique peu ou pas de liaison linéaire.
- La magnitude (valeur absolue) reflète l'intensité de la co-variation, mais dépend des unités → elle doit être comparée au sein d'un même contexte.

Le calcul de covariance permet de connaître aussi la corrélation des variables au cours de la croissance des individus de la population des espèces.

Espèce 1 : *Douvilleiceras mammillatum*, Schlotheim, 1813

Les covariances entre les dimensions morphologiques sont toutes positives et modérées à fortes : $\text{cov}(E, D) = 9,749$; $\text{cov}(E, H) = 4,081$; $\text{cov}(H, D) = 6,699$. Cela indique une cohérence morphologique globale, où une augmentation de l'épaisseur s'accompagne d'une augmentation du diamètre et de la hauteur. Cette forte dépendance linéaire entre les dimensions est typique d'un développement corporel globalisé.

Espèce 2 : *Cleoniceras besairiei*, Collignon, 1949

Les covariances sont également fortement positives, notamment entre le diamètre et la hauteur ($\text{cov}(E, D) = 9,702$; $\text{cov}(E, H) = 4,725$; $\text{cov}(H, D) = 23,736$). Cela révèle une très forte association entre ces deux dimensions, traduisant une croissance coordonnée. Les formes évoluent ensemble, malgré une grande variabilité déjà mise en évidence.

Espèce 3 : *Phylloceras velledae*, Michelin

Les covariances sont positives et modérées ($\text{cov}(E, D) = 2,569$; $\text{cov}(E, H) = 1,789$; $\text{cov}(H, D) = 3,253$), ce qui reflète une structure morphologique équilibrée. L'épaisseur croît avec les autres dimensions, mais de manière moins marquée que chez ESP1 ou ESP2. La liaison est notable, sans être très forte.

Espèce 4 : *Noesilesites ambatolafiensis*, Collignon, 1963

Ici, les covariances sont très faibles, proches de zéro : $\text{cov}(E, D) = 0,072$; $\text{cov}(E, H) = 0,024$; $\text{cov}(H, D) = 0,060$. Cela suggère que les dimensions varient de manière quasi indépendante, bien que la forme générale soit homogène. On observe donc une stabilité géométrique sans dépendance linéaire significative.

Espèce 5 : *Puzosia malandiandroensis*, Collignon, 1963

Les covariances sont faibles, certaines même négatives : $\text{cov}(E, D) = -0,065$; $\text{cov}(E, H) = 0,184$; $\text{cov}(H, D) = -0,178$. Il y a très peu de corrélation entre les dimensions. Cela peut indiquer une morphologie stabilisée, où les caractéristiques ne croissent pas nécessairement ensemble. L'espèce est homogène, mais sans proportionnalité linéaire.

Espèce 6 : *Puzosia sp* Collignon, 1963

Les covariances sont modérées et positives : $cov(E, D) = 1,519$; $cov(E, H) = 0,777$; $cov(H, D) = 1,082$. Cela traduit une certaine proportionnalité dans le développement des dimensions, bien que celle-ci soit moins marquée que chez ESP1 ou ESP2. Les mesures évoluent ensemble, mais de façon plus modérée.

Espèce 7 : *Neosilesites maximus*, Collignon 1963

Les covariances sont faibles mais positives : $cov(E, D) = 0,101$; $cov(E, H) = 0,063$; $cov(H, D) = 0,168$. Il existe une légère co-variation entre les dimensions. La morphologie est modérément stable, avec une faible dépendance linéaire, mais une tendance commune dans l'évolution des tailles.

Tableau 7 : Tableau récapitulatif de corrélation morphologique des ammonites étudiées

Espèce	Corrélation Morphologique	Dépendance linéaire entre dimensions
ESP1	Forte	Oui (Co-croissance équilibrée)
ESP2	Très forte	Oui (surtout D–H)
ESP3	Moyenne	Oui
ESP4	Très faible	Non (indépendance morphologique)
ESP5	Faible voire négative	Non (formes stables mais indépendantes)
ESP6	Moyenne	Oui
ESP7	Faible	Légère tendance commune

II.2.2.2 Corrélation des paramètres entre espèces

L'analyse des corrélations entre les différents paramètres morphométriques mesurés chez les espèces étudiées permet de mettre en évidence d'éventuelles relations morphologiques, fonctionnelles ou évolutives, et de comparer les tendances morphométriques entre les espèces. D'après le Test de Kruskal-Wallis. Les résultats obtenus sont les suivants :

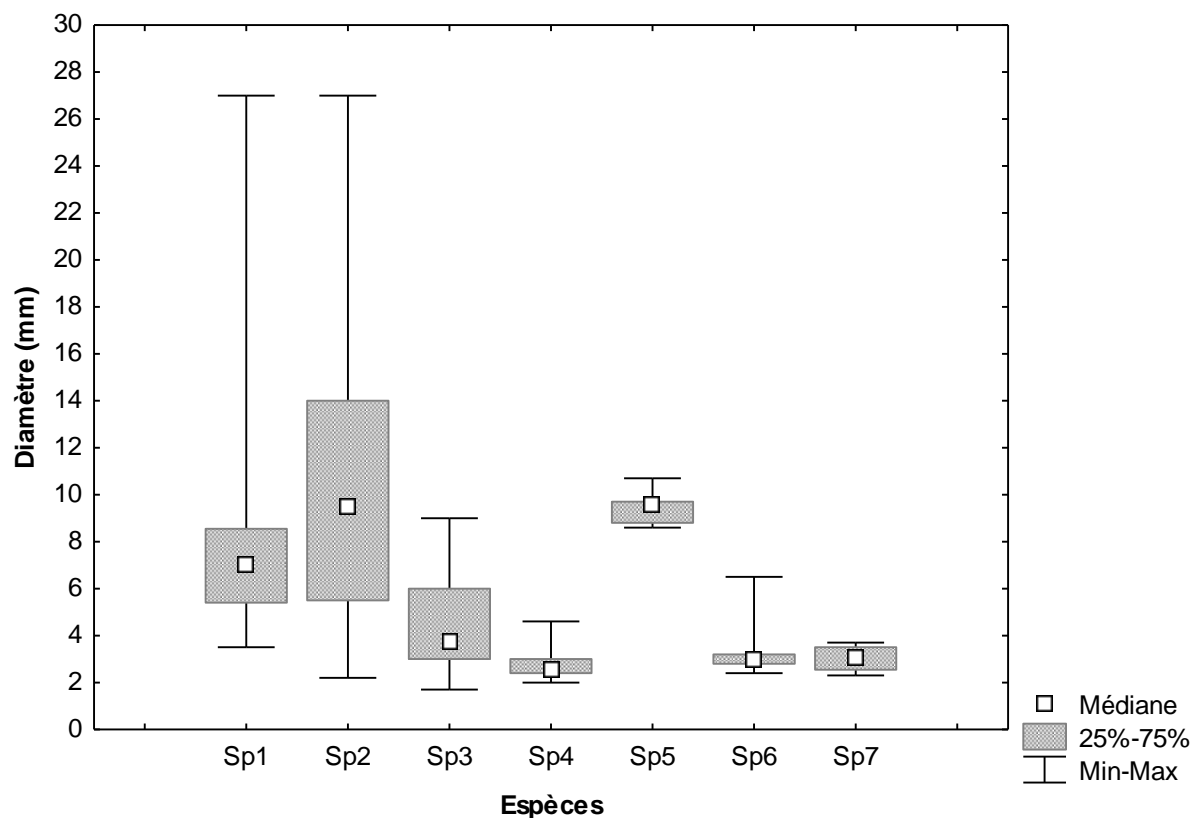


Figure 16 : Comparaison des diamètres de coquilles entre espèces

Test de Kruskal-Wallis

ANOVA de Kruskal-Wallis par Rangs ; Diamètre de la section du tour

Var. indépendante (classement) : Espèces

Test de Kruskal-Wallis : $H(6, N=134) = 70,66$ $p = 0,0001$

En effectuant le test de Kruskal-Wallis pour comparer plusieurs espèces indépendantes, les résultats montrent une valeur de $H(6, N=134) = 70,66$ avec une valeur de $p = 0,0001$ (Figure 16). Cette valeur de p étant strictement inférieure au seuil de significativité $\alpha = 0,05$, l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée. Par conséquent, on accepte l'hypothèse alternative (H_1) : la différence observée entre les espèces est significative. Cela signifie que le diamètre de l'enroulement de la coquille varie de manière importante d'une espèce à l'autre.

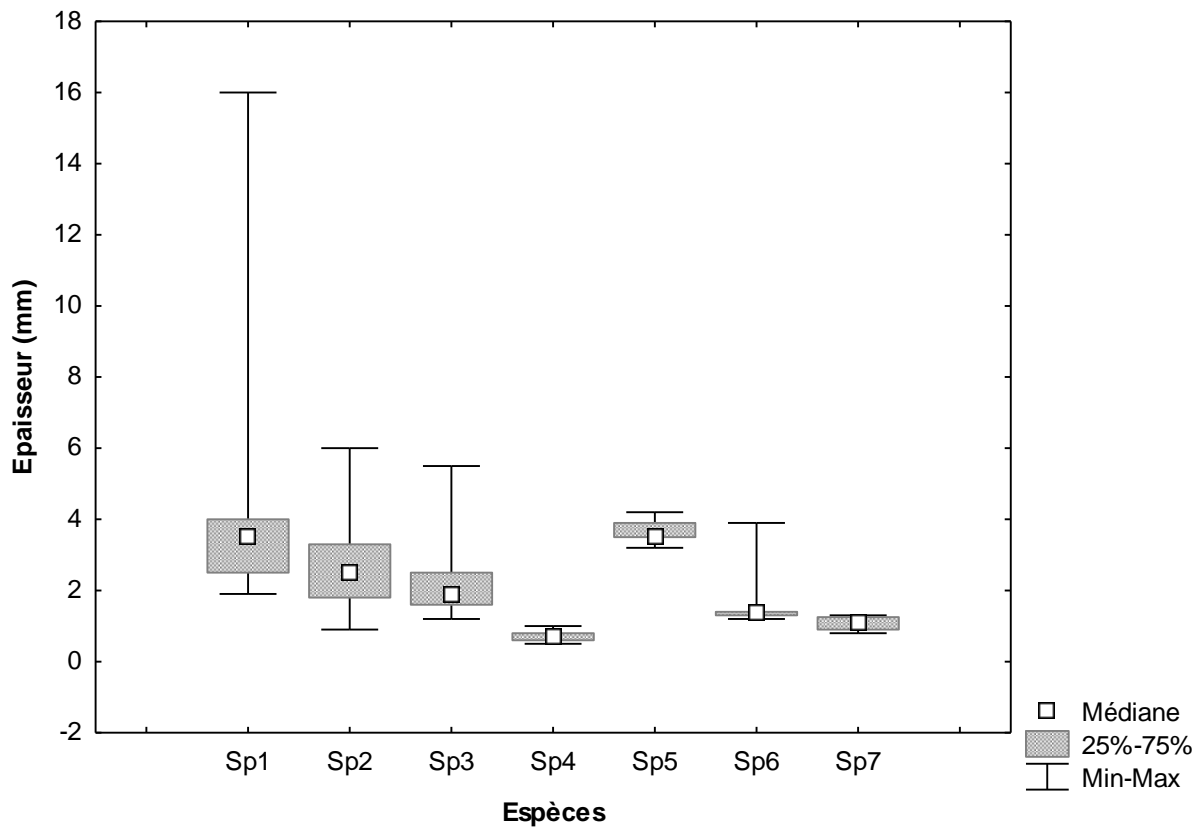


Figure 17 : Comparaison des épaisseurs de la section du tour de coquilles entre espèces

Test de Kruskal-Wallis

ANOVA de Kruskal-Wallis par Rangs ; Epaisseur de la section du tour, Var. indépendante (classement) : Espèces

Test de Kruskal-Wallis: $H(6, N= 134) = 85,78538$ $p = 0,0001$

Le test de Kruskal-Wallis a donné un résultat de $H(6) = 85,79$, $p = 0,0001$, qui est inférieur au seuil de significativité $\alpha = 0,05$ (Figure 17). Par conséquent, l'hypothèse nulle (H_0) est rejetée et l'hypothèse alternative (H_1) est acceptée. Cela signifie que les épaisseurs de la section du tour de l'enroulement de la coquille varient de manière significative entre les différentes espèces.

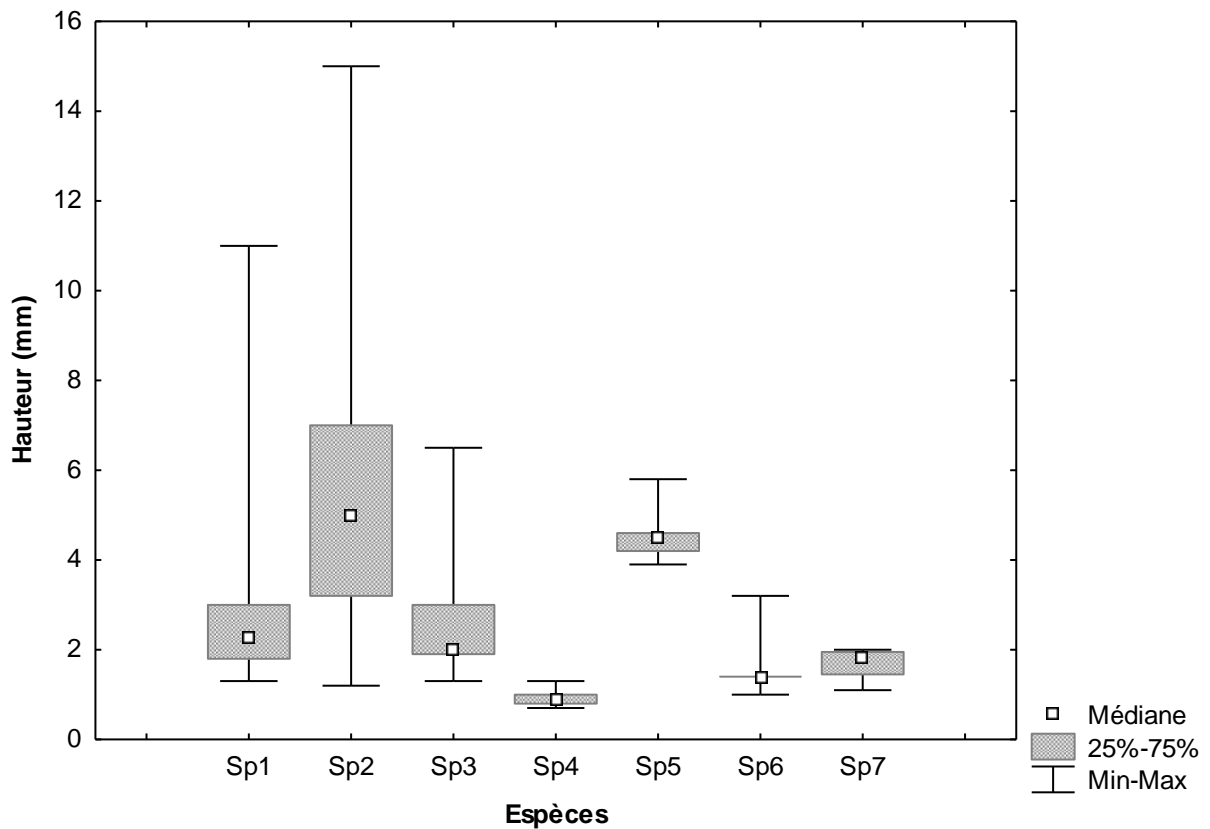


Figure 18 : Comparaison des hauteurs de la section du tour de coquilles entre espèces

Test de Kruskal-Wallis

ANOVA de Kruskal-Wallis par Rangs ; Hauteur de la section du tour,

Var. indépendante (classement) : Espèces

Test de Kruskal-Wallis : $H(6, N=134) = 87,91556$ $p = 0,0001$

Le test de Kruskal-Wallis a donné un résultat de $H(6, N=134) = 85,78538$; $p = 0,0001$. Étant donné que $p = 0,0001$ est inférieur à $\alpha = 0,05$ (Figure 18). L'hypothèse nulle (H_0) est rejetée, ce qui nous amène à accepter l'hypothèse alternative (H_1). Cela indique que la différence est significative, signifiant que hauteur de la section du tour de l'enroulement de la coquille varie considérablement d'une espèce à l'autre.

Conclusion

Les résultats du test de Kruskal-Wallis montrent que l'hypothèse nulle (H_0) est toujours rejetée et l'hypothèse alternative (H_1) est acceptée. Cela signifie que les paramètres morphométriques : diamètre, épaisseur et hauteur de la section du tour de l'enroulement de la coquille d'ammonites sont statistiquement différents entre les espèces étudiées. En d'autres termes, ces paramètres morphométriques ne sont pas indépendants des espèces, mais varient de manière significative d'une espèce à l'autre.

II.2.2.2.3 Corrélation des paramètres morphométriques par espèces

Nous avons analysé la corrélation des paramètres morphométriques (D, E, H) au cours des croissances de l'individu dans espèces.

Espèce 1 : *Douvilleiceras mammillatum*, Schlotheim, 1813

Corrélation de Diamètre et Epaisseur : $r^2 = 0,9745$; $r = 0,9871$, $p = 0,0001$; $E = -0,654917555 + 0,598742152 * D$

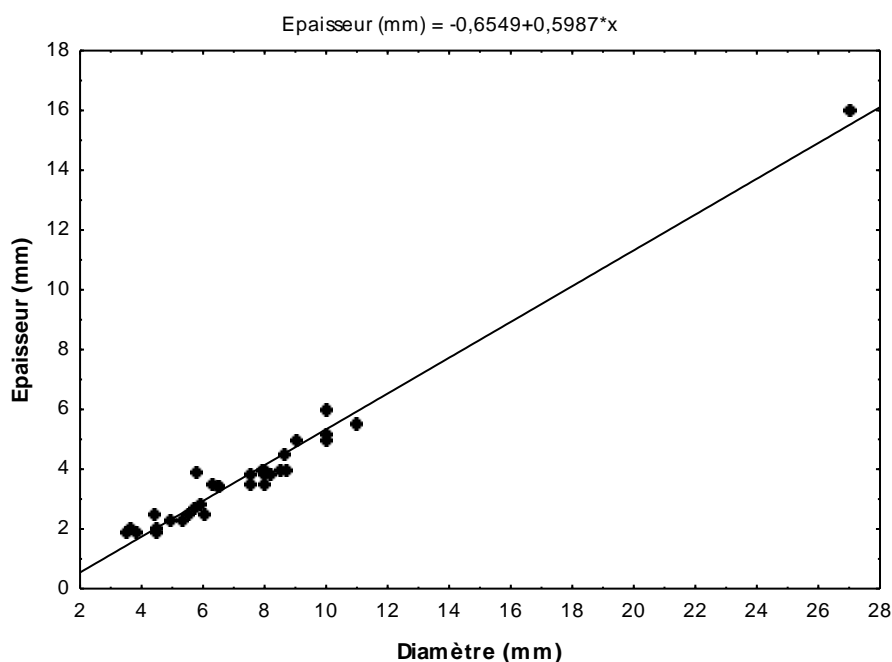


Figure 19 : Régression linéaire de l'épaisseur en diamètre de la section du tour de la coquille

$$r^2 = 0,9745 ; r = 0,9871, p = 0,0001 ; E = -0,654917555 + 0,598742152 * D$$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9745$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire (Figure 19).

Le coefficient de corrélation $R = 0,9871$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre diamètre D et l'épaisseur de la section du tour E de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce.

Corrélation de Diamètre (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,9538$; $r = 0,9766$, $p = 0,0001$;
 $H = 0,40895632 + 0,411415637 * D$ ($H=0,4089 + 0,4114D$)

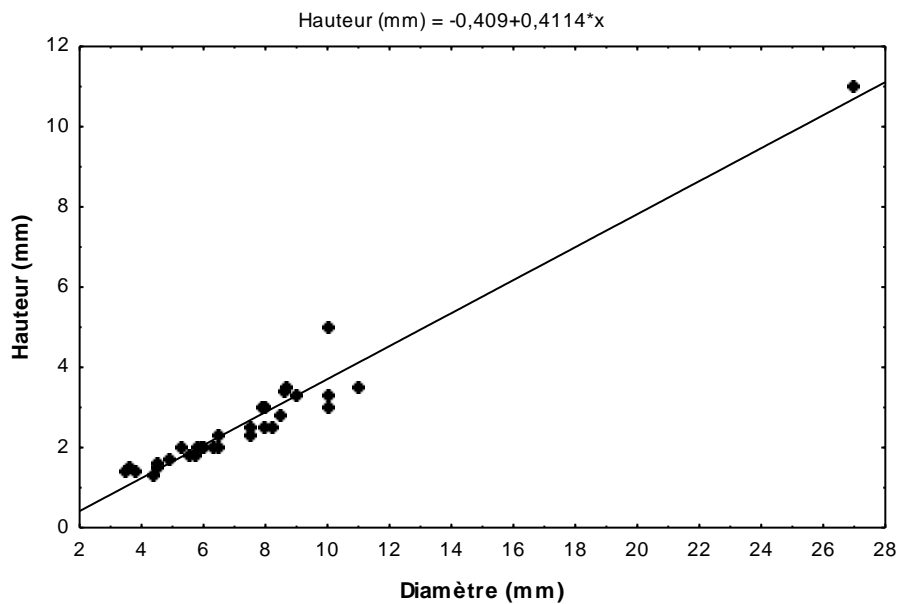


Figure 20 : Régression linéaire de la hauteur en diamètre de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,9538$; $r = 0,9766$, $p = 0,0000$; $H = -0,40895632 + 0,411415637 * D$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9538$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire (Figure 20).

Le coefficient de corrélation $R = 0,9766$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance/ croissance) entre diamètre D et hauteur H de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce.

Corrélation de Epaisseur (mm) et Hauteur (mm): $r^2 = 0,9624$; $r = 0,9810$, $p = 00,0001$;
 $H = 0,0632568983 + 0,681362951 * E$

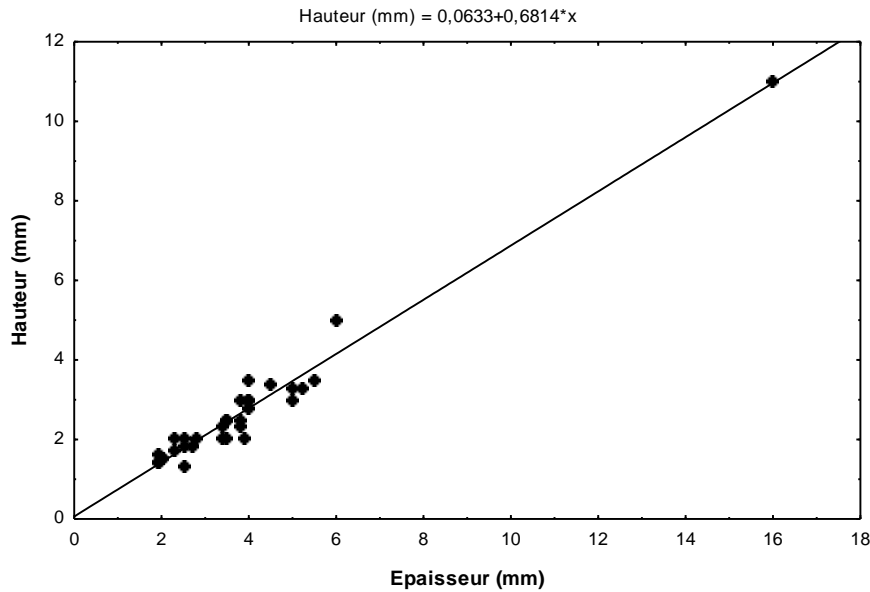


Figure 21 : Régression linéaire de la hauteur en épaisseur de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,9624$; $r = 0,9810$, $p = 00,0001$; $H = 0,0632568983 + 0,681362951 * E$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9624$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire (Figure 21).

Le coefficient de corrélation $R = 0,9810$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre épaisseur E et hauteur H de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce.

Espèce 2 : *Cleoniceras besairiei*, Collignon, 1949

Corrélation de Diamètre (mm) et Epaisseur (mm): $r^2 = 0,9675$; $r = 0,9836$, $p = 00,0001$;
 $E = 0,614570918 + 0,198907664 * D$

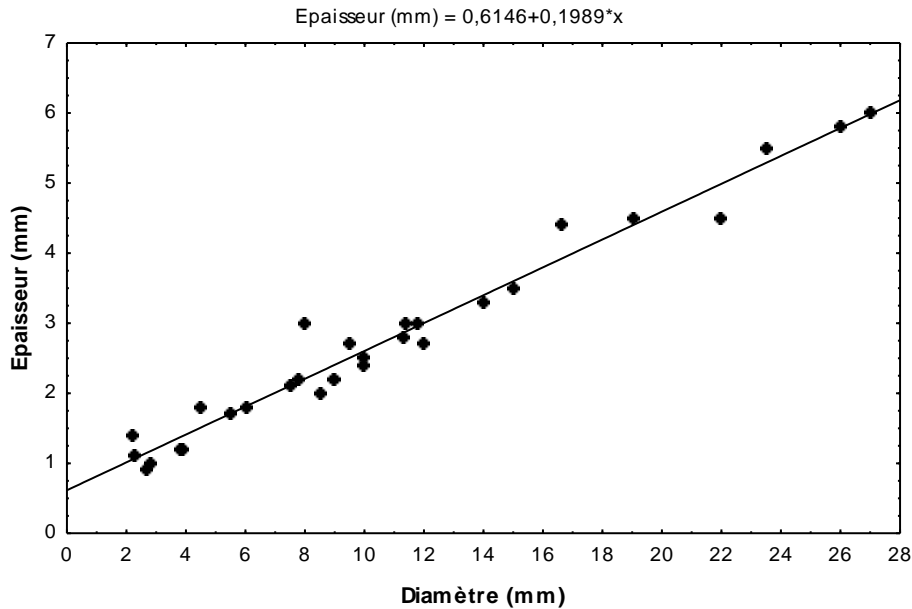


Figure 22 : Régression linéaire de l'épaisseur en diamètre de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,9675$; $r = 0,9836$, $p = 00,0001$; $E = 0,614570918 + 0,198907664 * D$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9675$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire (Figure 22).

Le coefficient de corrélation $R = 0,9836$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre diamètre D et l'épaisseur de la section du tour E de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce.

Corrélation de Diamètre (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,9276$; $r = 0,9631$, $p = 0,0001$;
 $H = 0,303060872 + 0,486642968 * D$

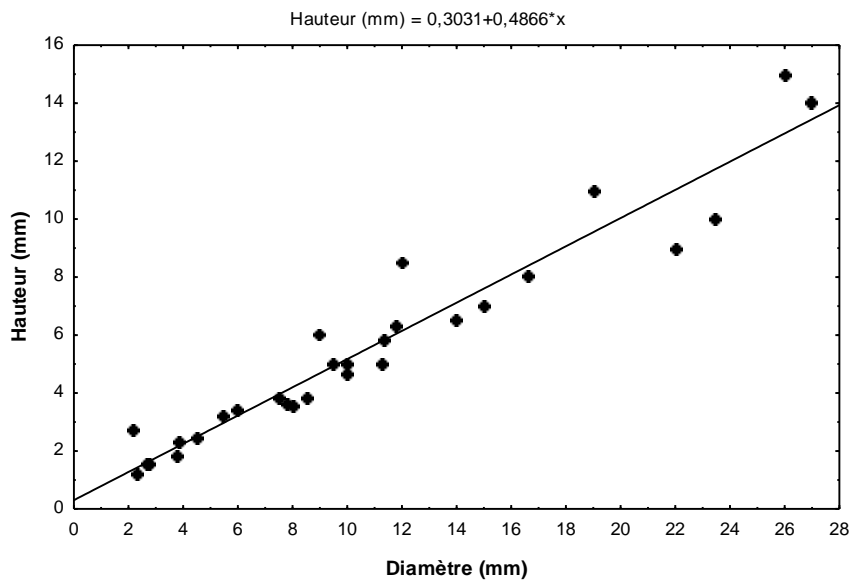


Figure 23 : Régression linéaire de la hauteur en diamètre de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,9276$; $r = 0,9631$, $p = 0,0001$; $H = 0,303060872 + 0,486642968 * D$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9276$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire. Le coefficient de corrélation $R = 0,9631$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre diamètre D et hauteur H de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce (Figure 23).

Corrélation de Epaisseur (mm) et Hauteur (mm): $r^2 = 0,8990$; $r = 0,9481$, $p = 0,0001$;
 $H = -0,985968573 + 2,36899113 * E$

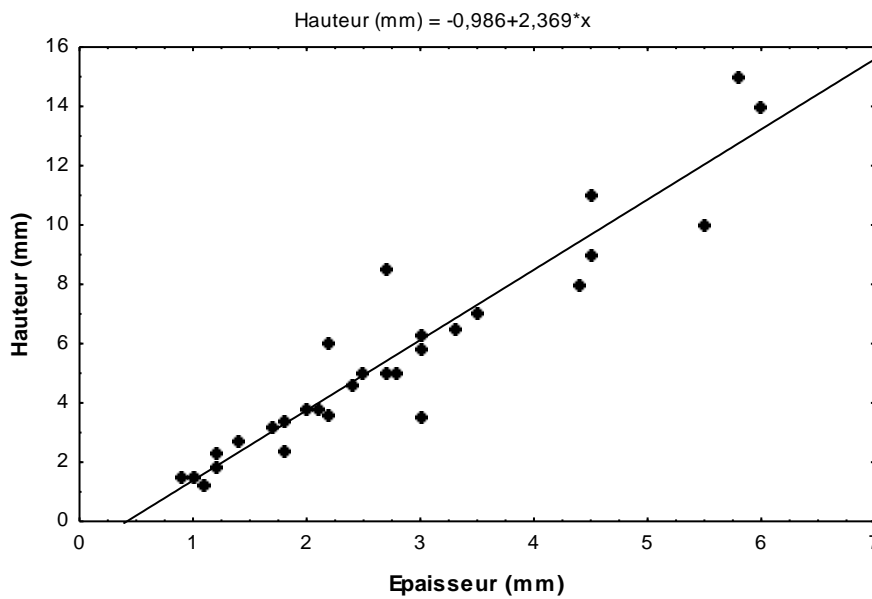


Figure 24 : Régression linéaire de la hauteur en épaisseur de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,8990$; $r = 0,9481$, $p = 0,0001$; $H = -0,985968573 + 2,36899113 * E$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,8990$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire. Le coefficient de corrélation $R = 0,9481$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre épaisseur E et hauteur H de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce (Figure 24).

Espèce 3 : *Phylloceras velledae*, Michelin

Corrélation de Diamètre (mm) et Epaisseur (mm) : $r^2 = 0,9376$; $r = 0,9683$, $p = 0,0001$;

$$E = -0,0250680671 + 0,523370508 * D$$

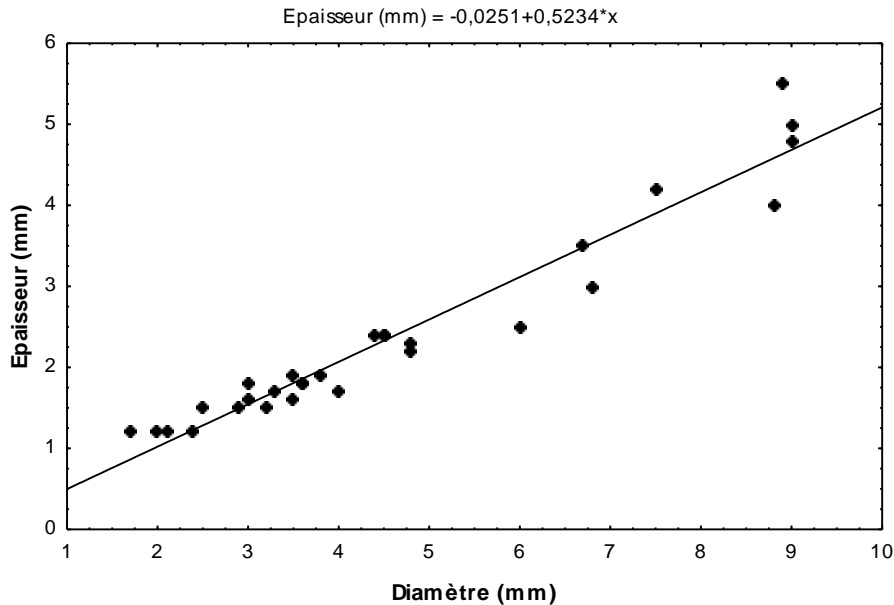


Figure 25 : Régression linéaire de diamètre en épaisseur de la section du tour de la coquille

$$r^2 = 0,9376 ; r = 0,9683, p = 0,0001 ; E = -0,0250680671 + 0,523370508 * D$$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9376$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire. Le coefficient de corrélation $R = 0,9683$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre diamètre D et l'épaisseur de la section du tour E de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce (Figure 25).

Corrélation de Diamètre (mm) et Hauteur (mm) $r^2 = 0,9159$; $r = 0,9570$, $p = 0,0001$;
 $H = -0,257615278 + 0,662711832 * D$

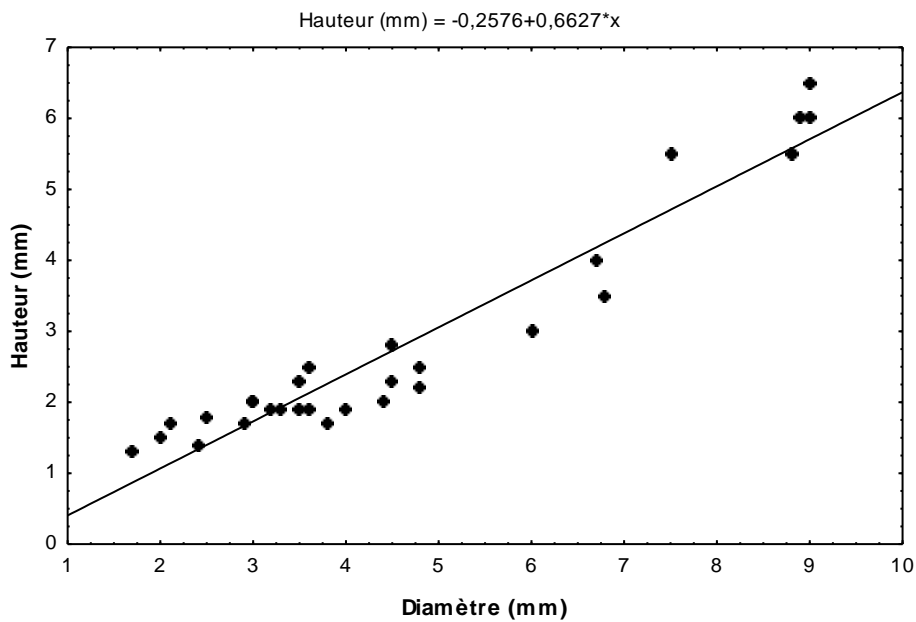


Figure 26 : Régression linéaire de la hauteur en diamètre de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,9159$; $r = 0,9570$, $p = 0,0001$; $H = -0,257615278 + 0,662711832 * D$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9159$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire. Le coefficient de corrélation $R = 0,9570$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre diamètre D et hauteur H de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce (Figure 26).

Corrélation de Epaisseur (mm) et Hauteur (mm): $r^2 = 0,9485$; $r = 0,9739$, $p = 0,0001$;
 $H = -0,181689358 + 1,24774879 * E$

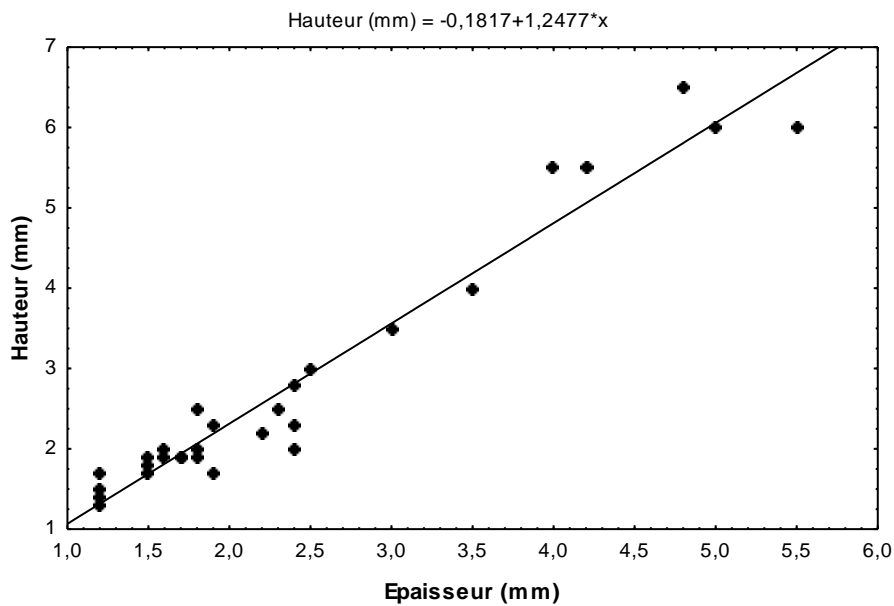


Figure 27 : Régression linéaire de la hauteur en épaisseur de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,9485$; $r = 0,9739$, $p = 0,0001$; $H = -0,181689358 + 1,24774879 * E$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9485$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire. Le coefficient de corrélation $R = 0,9739$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre épaisseur E et hauteur H de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce (Figure 27).

Espèce 4 : *Noesilesites ambatolafiensis*, Collignon, 1963

Corrélation de Diamètre (mm) et Epaisseur (mm) : $r^2 = 0,6332$; $r = 0,7957$, $p = 0,0001$;

$$E = -0,0174572578 + 0,271790144 * D$$

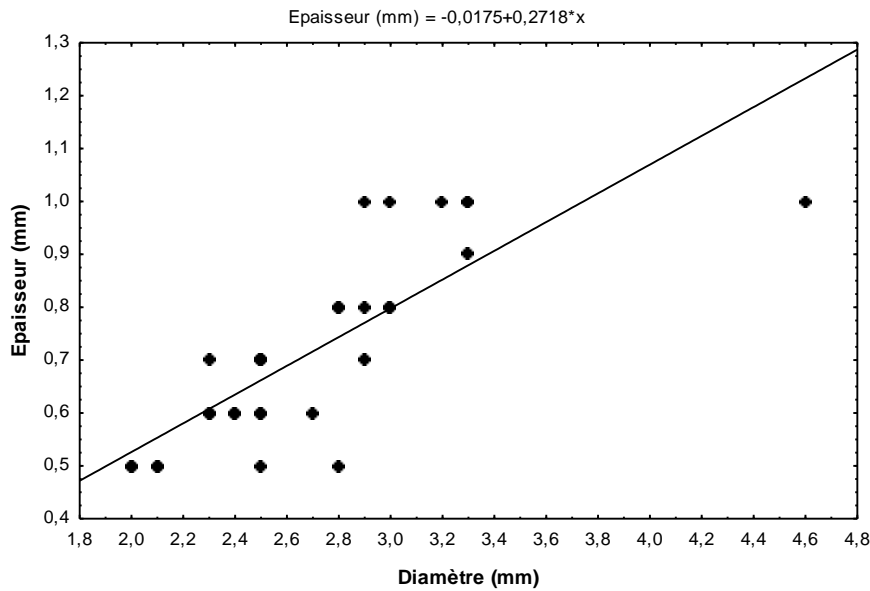


Figure 28 : Régression linéaire de l'épaisseur en diamètre de la section du tour de la coquille

$$r^2 = 0,6332 ; r = 0,7957, p = 0,0001 ; E = -0,0174572578 + 0,271790144 * D$$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,6332$ est très proche de 0,5, alors la moitié de la variation observée dans le modèle calculé peut être expliquée par les points.

Le coefficient de corrélation $R = 0,7957$, les paramètres de morphométries sont moyennement corrélés (Figure 28).

Corrélation de Diamètre (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,5830$; $r = 0,7635$, $p = 0,0001$;
 $H = 0,30192759 + 0,227790815 * D$

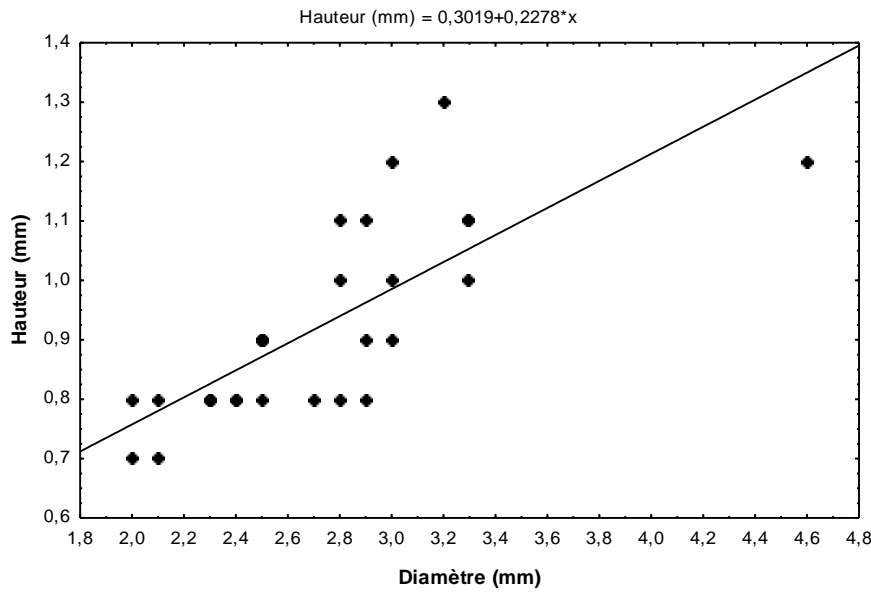


Figure 29 : Régression linéaire de la hauteur en diamètre de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,5830$; $r = 0,7635$, $p = 0,0001$; $H = 0,30192759 + 0,227790815 * D$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,5830$ est très proche de 0,5, alors la moitié de la variation observée dans le modèle calculé peut être expliquée par les points.

Le coefficient de corrélation $R = 0,7635$, les paramètres de morphométries sont moyennement corrélés (Figure 29).

Corrélation de Epaisseur (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,8066$; $r = 0,8981$, $p = 0,0001$;
 $H = 0,355172414 + 0,784482759 * D$

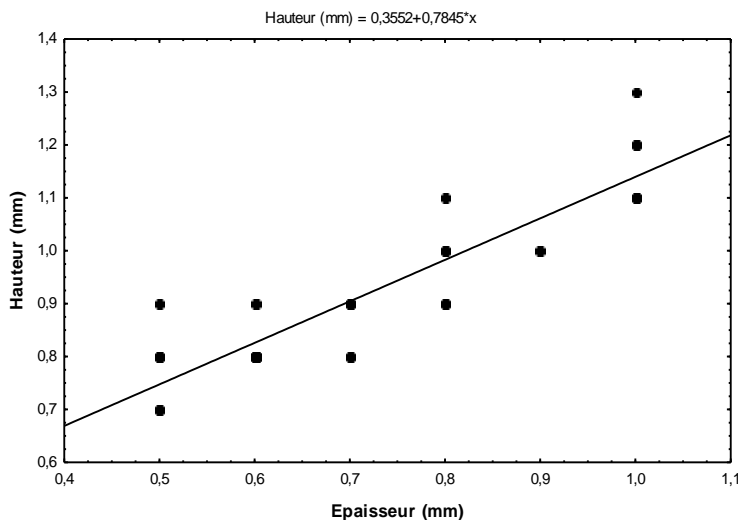


Figure 30 : Régression linéaire de la hauteur en épaisseur de la section du tour de la coquille

$$r^2 = 0,8066 ; r = 0,8981, p = 0,0001 ; H = 0,355172414 + 0,784482759 * E$$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,5830$ est très proche de 0,5, alors la moitié de la variation observée dans le modèle calculé peut être expliquée par les points.

Le coefficient de corrélation $R = 0,7635$, les paramètres de morphométries sont moyennement corrélés (Figure 30).

Espèce 5 : *Puzosia malandiandroensis* , Collignon, 1963

Corrélation de Diamètre (mm) et Epaisseur (mm) : $r^2 = 0,0615 ; r = -0,2480, p = 0,6875 ; E = 4,76169297 - 0,116212339 * D$

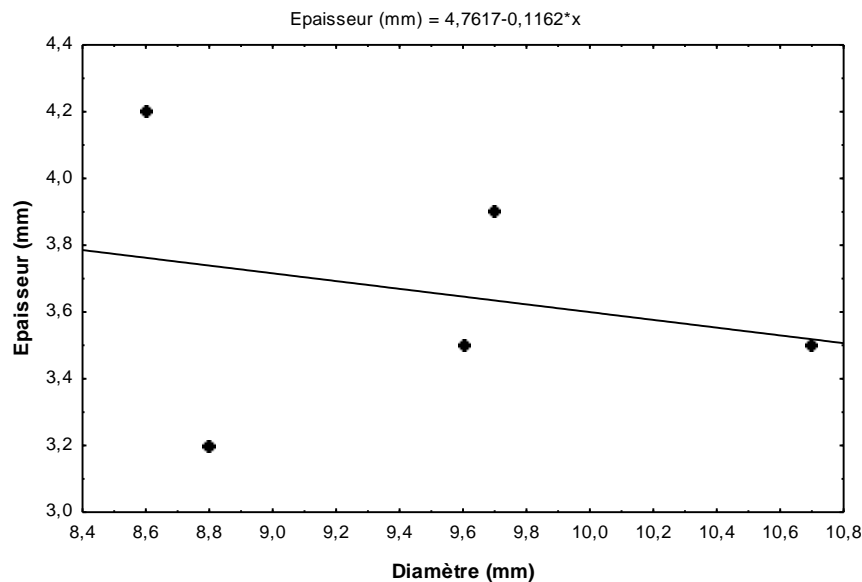


Figure 31: Régression linéaire de l'épaisseur en diamètre de la section du tour de la coquille

$$r^2 = 0,0615 ; r = -0,2480, p = 0,6875 ; y = 4,76169297 - 0,116212339 * x$$

- R^2 est proche de zéro, alors le modèle de régression linéaire ne parvient pas à coller avec l'ensemble des points donnés, indiquant ainsi une adéquation inexistante.
- R est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre deux variables « D » et « E ». (Figure 31).

Corrélation de Diamètre (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,1353$; $r = -0,3678$, $p = 0,5425$;
 $H = 7,62625538 - 0,319225251 * D$

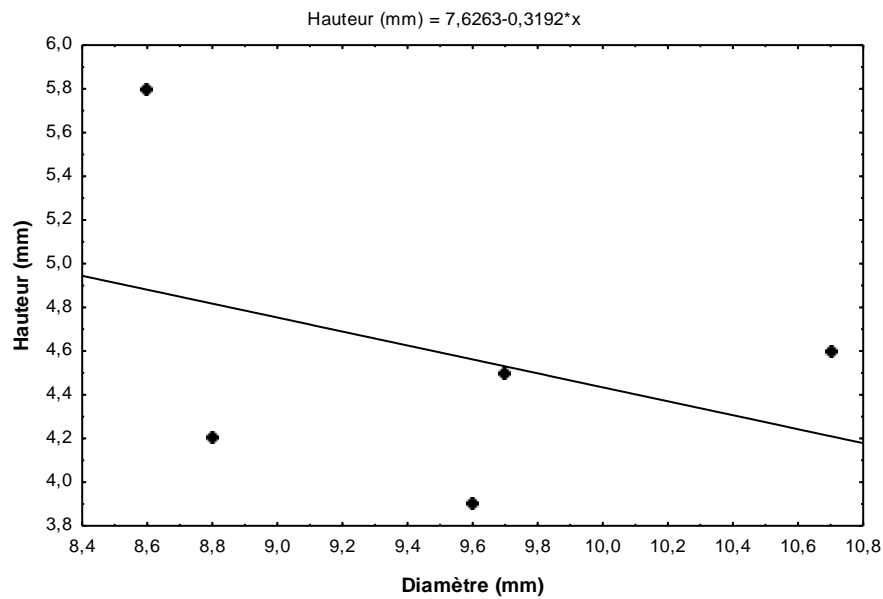


Figure 32 : Régression linéaire de la hauteur en diamètre de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,1353$, $r = -0,3678$, $p = 0,5425$; $H = 7,62625538 - 0,319225251 * D$

- R^2 est proche de zéro, alors le modèle de régression linéaire ne parvient pas à coller avec l'ensemble des points donnés, indiquant ainsi une adéquation inexistante.
- R est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre deux variables « D » et « H ». (Figure 32).

Corrélation de Epaisseur (mm) et Hauteur (mm): $r^2 = 0,6586$; $r = 0,8115$, $p = 0,0954$;
 $H = -0,901960784 + 1,50326797 * E$

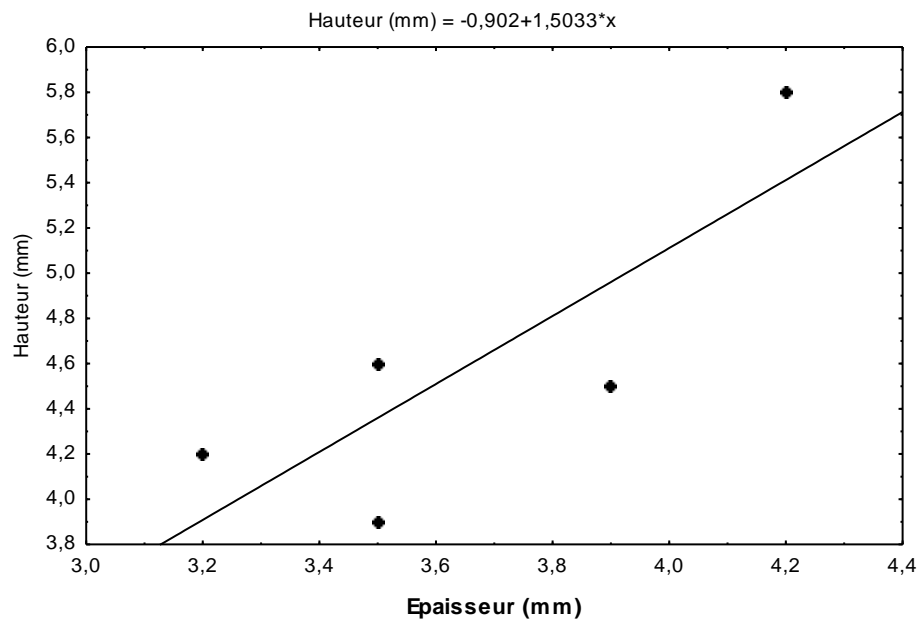


Figure 33 : Régression linéaire de la hauteur en épaisseur de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,6586$; $r = 0,8115$, $p = 0,0954$; $H = -0,901960784 + 1,50326797 * E$

- R^2 est proche de zéro, alors le modèle de régression linéaire ne parvient pas à coller avec l'ensemble des points donnés, indiquant ainsi une adéquation inexistante.
- R est proche de 0, il n'y a pas de relation linéaire entre deux variables « E » et « H » (Figure 33).

Espèce 6 : Puzosia sp Collignon, 1963

Corrélation de Diamètre (mm) et Epaisseur (mm) : $r^2 = 0,9825$; $r = 0,9912$, $p = 0,0010$;
 $E = -0,629705669 + 0,689861919 * D$

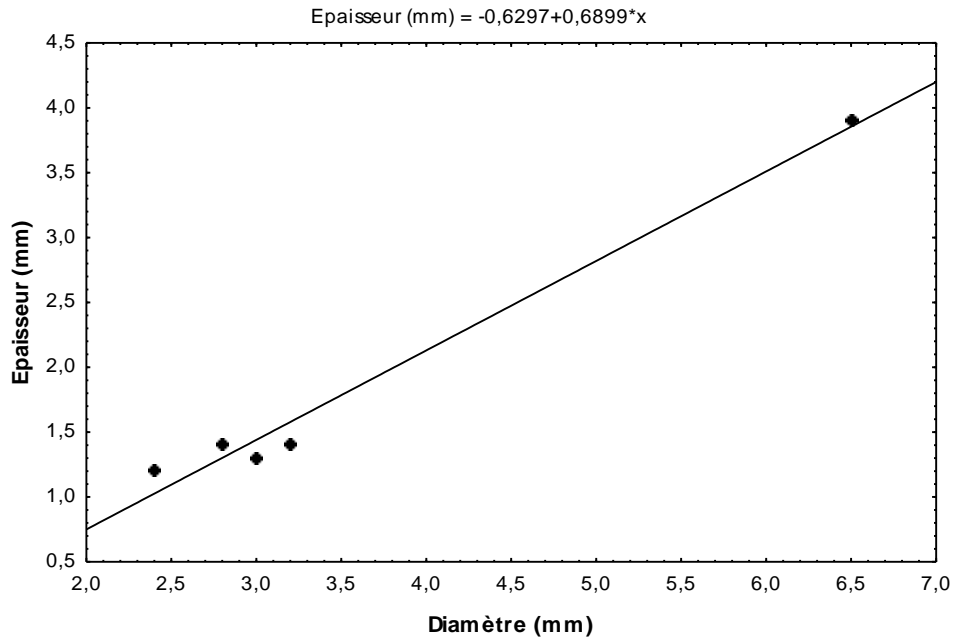


Figure 34 : Régression linéaire de l'épaisseur en diamètre de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,9825$; $r = 0,9912$, $p = 0,0010$; $E = -0,629705669 + 0,689861919 * D$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9825$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire (Figure 34). Le coefficient de corrélation $R = 0,9912$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre diamètre D et épaisseur E de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce.

Corrélation de Diamètre (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,8833$; $r = 0,9398$, $p = 0,0176$;
 $H = -0,0787790698 + 0,49127907 * D$

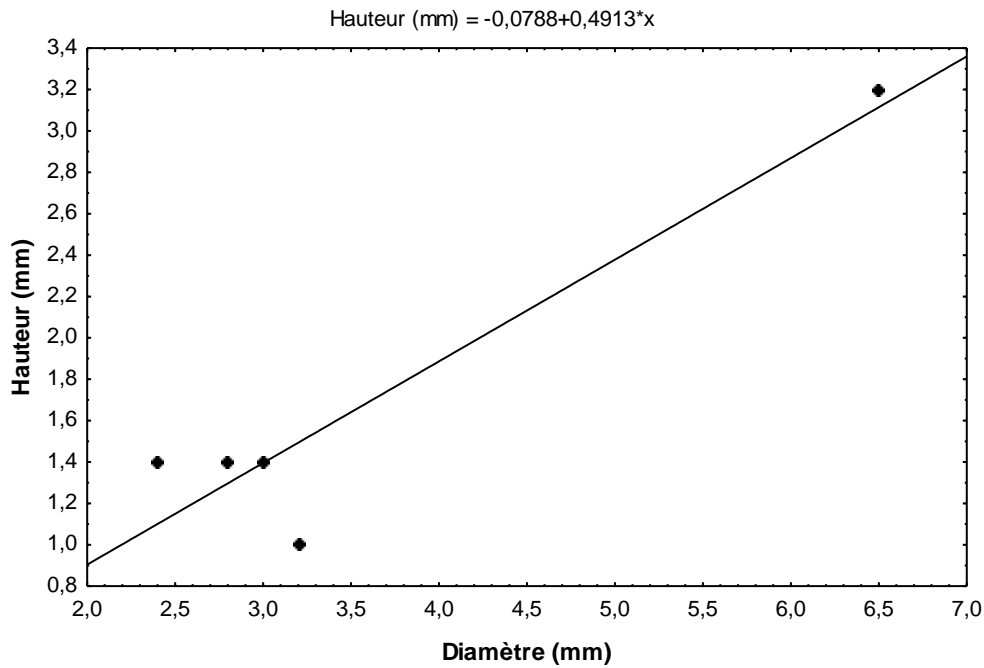


Figure 35 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,8833$; $r = 0,9398$, $p = 0,0176$; $H = -0,0787790698 + 0,49127907 * D$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9406$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire. Le coefficient de corrélation $R = 0,9698$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre diamètre D et hauteur de la section du tour H de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce (Figure 35).

Corrélation de Epaisseur (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,9406$; $r = 0,9698$, $p = 0,0063$;
 $H = 0,339684921 + 0,728432108 * E$

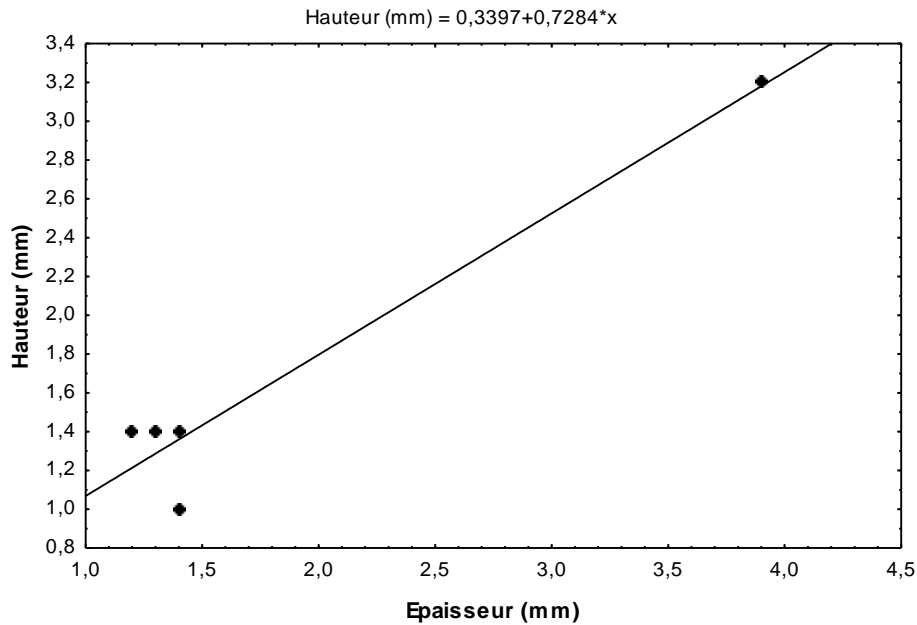


Figure 36 : Régression linéaire de la hauteur en épaisseur de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,9406$; $r = 0,9698$, $p = 0,0063$; $H = 0,339684921 + 0,728432108 * E$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,9406$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire. Le coefficient de corrélation $R = 0,9698$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre épaisseur E et hauteur H de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce (Figure 36).

Espèce 7 : *Neosilesites maximus*, Collignon 1963

Corrélation de Diamètre (mm) et Epaisseur (mm) : $r^2 = 0,9917$; $r = 0,9959$, $p = 0,0041$;

$$E = -0,0243792325 + 0,363431151 * D$$

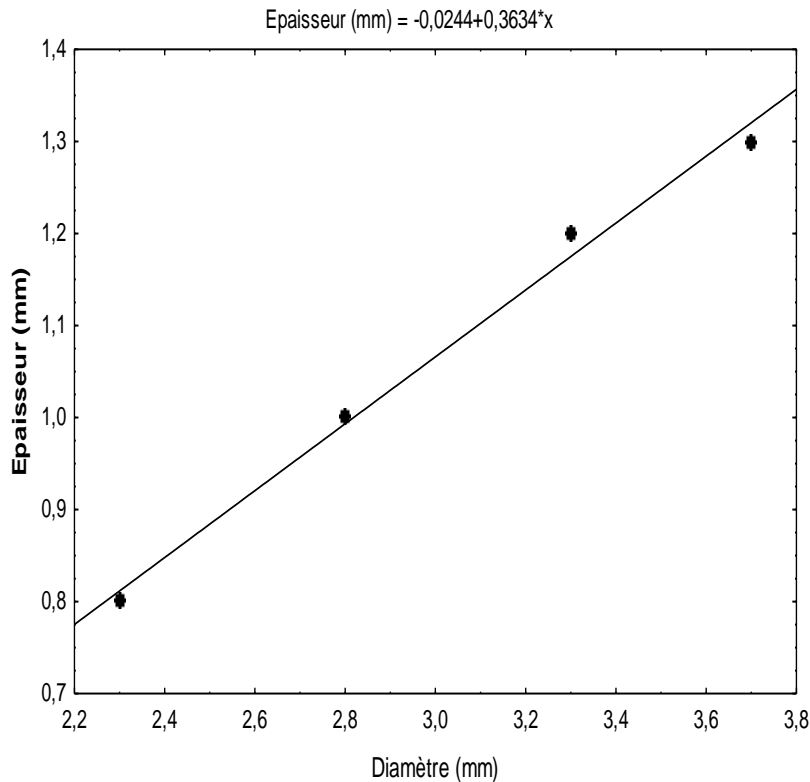


Figure 37 : Régression linéaire de l'épaisseur en diamètre de la section du tour de la coquille

$$r^2 = 0,9917 ; r = 0,9959, p = 0,0041 ; E = -0,0243792325 + 0,363431151 * D$$

Le coefficient de détermination $R^2 = 0,9917$ est très proche de 1, ce qui indique que le modèle de régression linéaire colle parfaitement aux données. Cela indique de l'efficacité de ce modèle. De plus, le coefficient de corrélation $R = 0,9959$, également proche de 1, révèle une forte relation linéaire positive entre le diamètre D et l'épaisseur E de la section du tour de la coquille au fur et à mesure de la croissance des individus de l'espèce. Ainsi, ces deux paramètres sont fortement corrélés pendant la croissance (Figure 37).

Corrélation de Diamètre (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,8107$ $r = 0,9004$, $p = 0,0996$;
 $H = -0,130022573 + 0,60496614 * D$

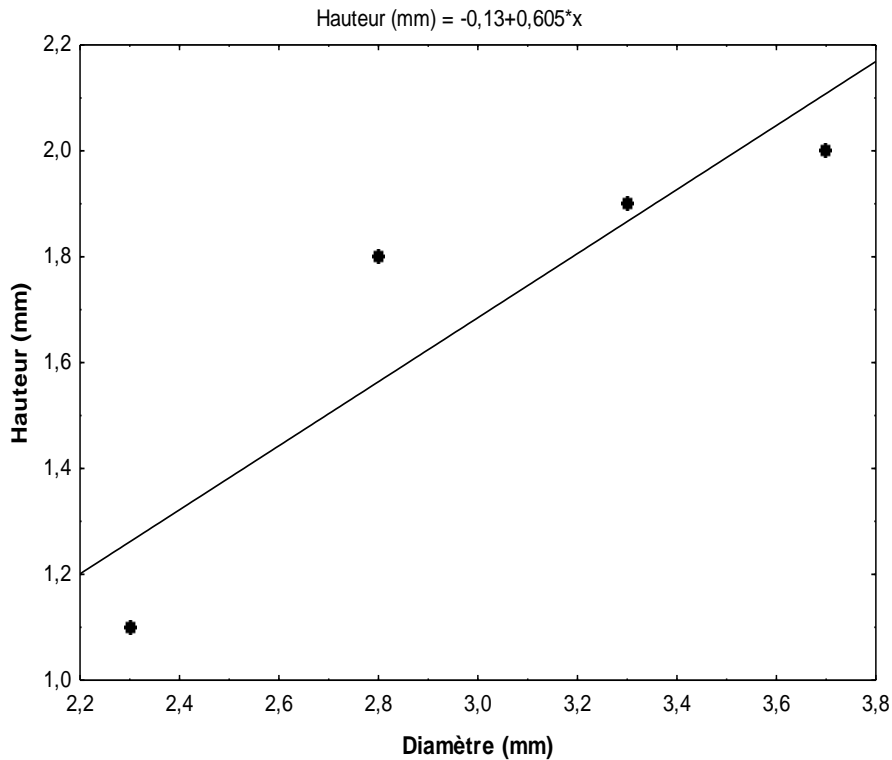


Figure 38 : Régression linéaire entre le diamètre et hauteur de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,8107$ $r = 0,9004$, $p = 0,0996$; $H = -0,130022573 + 0,60496614 * D$

Le résultat du calcul de coefficient de détermination $R^2 = 0,8107$ est très proche de 1, alors le modèle de la régression linéaire colle à 100% aux données. Cela nous montre l'efficacité d'un modèle de régression linéaire. Le coefficient de corrélation $R = 0,9004$ est proche de 1, il existe une forte relation linéaire positive, au cours de la croissance de l'individu de l'espèce, c'est à dire même sens : croissance / croissance) entre diamètre D et hauteur H de la section du tour de la coquille. Donc, les deux paramètres sont fortement corrélés au cours de la croissance des individus de l'espèce (Figure 38).

Corrélation de Epaisseur (mm) et Hauteur (mm) : $r^2 = 0,8475$; $r = 0,9206$, $p = 0,0794$;
 $H = -0,122033898 + 1,69491525 * E$

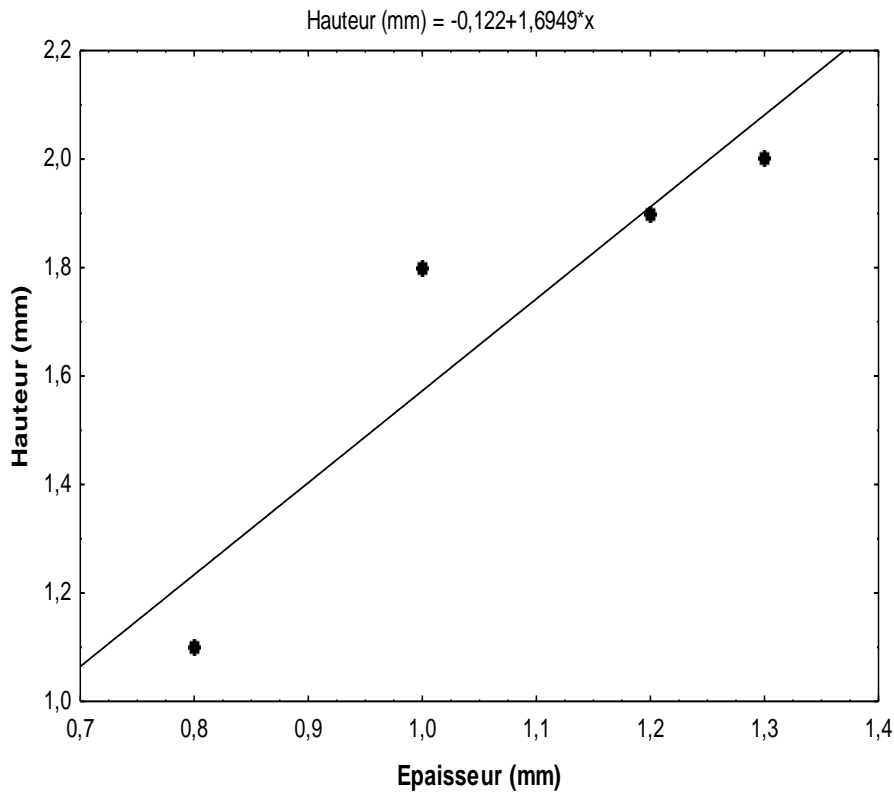


Figure 39 : Régression linéaire de la hauteur en l'épaisseur de la section du tour de la coquille

$r^2 = 0,8475$; $r = 0,9206$, $p = 0,0794$; $H = -0,122033898 + 1,69491525 * E$

Le coefficient de la détermination R^2 , qui vaut 0,8475, étant proche de 1, indique que le modèle de régression linéaire représente très bien les données observées. Cela témoigne de la performance du modèle. Par ailleurs, le coefficient de corrélation R , égal à 0,9206, indique une forte corrélation linéaire positive entre l'épaisseur (E) et la hauteur (H) de la section du tour de la coquille au cours de la croissance des individus. Ces deux variables évoluent donc de manière étroitement liée pendant cette phase de développement.

Conclusion

Pour les ammonites étudiées, une corrélation significative a été observée entre le diamètre, la hauteur et l'épaisseur de la section du tour, traduisant une croissance proportionnelle des différents paramètres morphométriques au cours du développement. Toutefois, l'espèce 5 (*Puzosia malandiandroensis*) constitue une exception : les faibles valeurs des coefficients de détermination (R^2) et de corrélation (R), proches de zéro, indiquent une absence de relation linéaire marquée entre les variables considérées. Cela pourrait refléter une variabilité morphologique plus importante, une ontogenèse différente ou encore une influence environnementale particulière sur cette espèce.

Troisième partie :
DISCUSSION

Troisième partie : DISCUSSION

Le Secteur d'Ambatolafia est un site fossilifère important pour l'étude de la faune albiennaise. Les découvertes réalisées dans cette région contribuent à mieux comprendre la diversité et la répartition des espèces marines pendant cette période. Les données sédimentologiques, géochimiques, paléontologiques et paléoécologiques recueillies permettent de reconstituer le paléoenvironnement, offrant ainsi un aperçu précieux sur les processus géologiques, l'évolution de la faune et les conditions environnementales qui prévalaient à l'époque.

III.1. Lithostratigraphie de l'Albien

Dans le bassin de Mahajanga, l'Albien est représenté par des formations sédimentaires marines dont la lithologie varie considérablement d'un secteur à un autre, témoignant d'une dynamique sédimentaire complexe et d'un contexte paléogéographique évolutif. Notre étude, portant sur le Secteur d'Ambatolafia, la succession lithostratigraphique de l'Albien est caractérisée par une alternance de dépôts argilo-calcaires gréseux et de marnes gréseuses. La composante la plus significative de cette succession est constituée par des grès argilo-calcaires d'une épaisseur d'environ 21 mètres, qui renferment une concentration importante de fossiles d'invertébrés, principalement des ammonites. Cette épaisseur notable des grès argilo-calcaires traduit un espace d'accommodation important, c'est-à-dire un haut niveau marin stable, indiquant une phase de transgression marine majeure durant l'Albien dans ce secteur. Cette montée du niveau marin a permis l'envahissement progressif du bassin par des eaux marines peu profondes, favorisant le dépôt de sédiments marins. Au Crétacé, le climat global était chaud et humide, ce qui favorisait une forte altération continentale d'où un apport important en sédiments terrigènes (Courville & Bréhéret, 2006).

D'après Bésairie & Collignon (1972), l'Albien de la presqu'île Radama présente une épaisseur beaucoup plus importante, de l'ordre de 280 mètres. La lithostratigraphie y est caractérisée par des grès verts glauconieux contenant des ammonites du genre *Douvilleiceras*, surmontés par des marnes très fossilifères, puis terminée par une épaisse série d'argiles grises à lits grésiferrugineux. Cette succession témoigne d'un environnement marin évoluant vers des conditions plus calmes, avec une sédimentation argileuse plus importante à la fin de la période.

Dans le bassin d'Ambilobe (Bésairie & Collignon, 1972), l'Albien (moyen et supérieur) est également bien représenté au Mont Raynaud, où l'on observe des grès

continentaux

de Saharena. Ces grès sont surmontés par des argiles riches en microfaune, suivies, au sommet, de marnes sableuses contenant des cristaux de gypse, glauconieuses par endroits sur une épaisseur de 70m. Cette stratigraphie indique une diversité d'environnements et un enregistrement paléontologique riche, reflétant une dynamique géologique complexe durant l'Albien.

L'étude de l'Albien dans la région nord du Betsiboka (Randrianasolo, 1986) met en évidence un Albien inférieur marin très peu profond, soumis à des régressions marines successives qui favorisent la formation de niveaux silteux intercalés dans une série gypseuse. Ce faciès se prolonge vers la région de Tsaramandroso, où l'on observe également des intercalations gréseuses. Pour l'Albien moyen, une nette variation de faciès est perceptible du nord vers le sud : au nord, l'Albien moyen est franchement marin, caractérisé par la présence de glauconie et d'ammonites, tandis qu'au sud, il devient continental. La prédominance

de sédiments silteux et la présence significative de micas témoignent d'un apport important en matériaux détritiques terrigènes, probablement issus de sources proches, ce qui explique également la rareté de la microfaune dans ces niveaux.

Randrianasolo (1986) décrit un Albien inférieur marin peu profond au nord de Betsiboka, soumis à des régressions marines successives, avec des niveaux silteux intercalés dans une série gypseuse. Cette dynamique sédimentaire diffère de celle observée à Ambatolafia, où la stabilité du niveau marin est plus prononcée.

Enfin, au cours de l'Albien supérieur, cette tendance vers la continentalisation s'accroît vers le sud, avec un environnement de plus en plus régressif. La présence de micas calcaires à mollusques dans la région de Tsaramandroso indique cependant que la mer était encore proche durant cette phase régressive, suggérant un milieu lagunaire ou de faible profondeur soumis à des fluctuations du niveau marin.

L'étude des faciès dans la région montre une nette variation du nord au sud. Au nord, l'Albien moyen est marin et riche en glauconie, tandis qu'au sud, il devient continental avec une prédominance de sédiments silteux. A Ambatolafia, la continuité des dépôts argilo-calcaires suggère un environnement marin stable, contrairement à la continentalisation observée ailleurs.

Quant à la lithostratigraphie du stratotype de l'Aube, elle évolue au cours de l'Albien. La partie basale, datée de l'Albien inférieur, est constituée de sables et d'argilo-sableux, qui témoignent d'un environnement marin peu profond. Cette unité est surmontée par des argiles de l'Albien moyen, indiquant un changement vers des conditions plus profondes et plus calmes. Enfin, la partie sommitale est représentée par des calcaires fins de l'Albien supérieur, souvent associés à des dépôts marins plus riches en biodiversité, reflétant une période de conditions marines favorables (Magnez-Jannin, 1975).

La lithostratigraphie du stratotype de l'Aube, qui évolue également au cours de l'Albien, présente une partie basale constituée de sables et d'argilo-sableux, suivie d'argiles de l'Albien moyen et de calcaires fins de l'Albien supérieur. Cette séquence indique un changement vers des conditions plus profondes et plus calmes, ce qui contraste avec la dynamique transgressive d'Ambatolafia.

Ainsi, la lithostratigraphie de l'Albien dans le bassin de Mahajanga illustre une évolution sédimentaire contrôlée par des variations du niveau marin et par des apports détritiques variables. Les phases de transgression marine se traduisent par des dépôts marins riches en ammonites et glauconie, tandis que les phases de régression favorisent la sédimentation silteuse à continentale avec un apport accru de matériaux terrigènes.

En somme, la lithostratigraphie de l'Albien à Ambatolafia se distingue par sa stabilité marine et son enrichissement en fossiles, tandis que d'autres régions, comme la presqu'île Radama et le nord du Betsiboka, montrent des variations plus marquées en termes de profondeur et de conditions sédimentaires. Ces différences soulignent l'importance de l'étude régionale pour comprendre les dynamiques marines et sédimentaires de l'Albien.

III.2. Paléontologie

L'Albien, intervalle du Crétacé moyen daté entre environ 113 et 100 millions d'années, constitue une période marquée par une richesse exceptionnelle en fossiles marins. Cette abondance permet d'offrir un aperçu précieux des écosystèmes de l'époque. Le site paléontologique d'Ambatolafia, situé dans le bassin de Mahajanga à Madagascar, se distingue comme un gisement majeur pour l'étude de cette période, tant par la diversité que par la qualité de conservation de ses fossiles. Cette étude présente la diversité faunique d'Ambatolafia,

en se concentrant sur les macro et microfossiles. Les nombreuses découvertes réalisées à Ambatolafia contribuent significativement à la compréhension de la diversité, de la répartition géographique et de l'évolution des espèces marines de l'Albien. La présence

d'ammonites spécifiques à cet étage géologique permet de faire des corrélations avec d'autres sites fossilifères à travers le monde.

Le gisement d'Ambatolafia a livré une faune marine variée, principalement constituée de macrofossiles. Les ammonites y dominent largement, avec une prédominance de formes planispiralées (enroulées) remarquablement bien conservées. Parmi les espèces les plus représentatives, on note : *Douvilleiceras mammillatum*, *Douvilleiceras albense*, *Cleoniceras besairiei*, *Cleoniceras madagascarensis*, *Phylloceras velleidae*, *Eotetragonites umbilicostratus*, *Puzosia nov. sp.*, *Puzosia malandiandroensis nov. sp.*, *Neosilesites ambatolafiensis* et *Neosilesites maximus*. Des ammonites à coquille déroulée sont également présentes, bien que moins fréquentes, comme *Pictetia asteriana*, *Hemiptychoceras*, *Metahamites sp. aff. sablieri*, et *Ephamulina cf. arcuta*. Ces ammonites hétéromorphes sont considérées comme évolution spécifique au cours des temps géologiques. Les ammonoidées planispiralées ont un mode de vie nectonique mais la présence des pressions environnementales et écologiques variées a permis aux certaines ammonoidées à adapter une nouvelle niche écologique. Les formes déroulées ont pu représenter une stratégie adaptative pour exploiter des modes de vie différents (flottement passif, vie pélagique, proximité du fond marin), peut-être dans des environnements pauvres en oxygène ou peu profonds, où les formes spirales classiques auraient été moins performantes. Certaines formes hétéromorphes étaient probablement moins hydrodynamiques, suggérant une mobilité réduite et un mode de vie plus passif, possiblement planctonique ou necto-benthique. Le Crétacé est marqué par une expansion des formes expérimentales, souvent à la périphérie des grands groupes classiques. Ces morphologies non standards pourraient témoigner de stratégies évolutives marginales qui ont prospéré transitoirement dans des environnements spécifiques, mais qui se sont avérées moins résistantes aux crises écologiques (Wiedmann, 1969)

Outre les ammonites, le macrofaune comprend : des bivalves (*Venelicardia lineolata*, *Arca chavani*) des gastéropodes (*Gyrodès aff. tenellis*, *Perrisoptera besairiei*) et des nautilus (*Cymatoceras sakalavus*). Cette diversité témoigne d'un écosystème marin riche et structuré, probablement composé d'une mosaïque d'environnements allant de la zone littorale à des zones plus profondes.

La composante microfossile, bien que moins abondante, est représentée par une seule espèce de foraminifère benthique (*Lenticulina gibba*) et plusieurs espèces de microgastéropodes (*Hydrobia dubuissoni*, *Solen sloanni*, *Leptoptygma carrizoensis*, *Rissoa membranacea*, *Cyclozyga sp.*, *Rissoacea sp.*, *Cepatia cepacea* et *Dictyothyris coarctata*).

Cette microfaune permet d'affiner les interprétations environnementales et stratigraphiques du site.

Les travaux de Norovelo *et al.* (2020) confirment l'importance stratigraphique des ammonites hétéromorphes d'Ambatolafia. Ces auteurs ont mis en évidence leur concentration dans une couche spécifique de grès argilo-calcaire. Leur abondance et leur bon état de conservation sont attribués à des conditions paléoenvironnementales favorables, à une adaptation morphologique particulière, ainsi qu'à leur rôle en tant que marqueurs biochronologiques de grande précision. Leur présence s'explique par leur adaptation biologique particulière, les conditions paléoenvironnementales favorables à leur développement et préservation, ainsi que par leur utilité en tant que fossiles stratigraphiques. Elles témoignent d'un contexte géologique et écologique spécifique, souvent riche en informations sur le passé marin de la région étudiée. Il est important de distinguer la faune du Secteur d'Ambatolafia de celles d'autres gisements, notamment celui d'Ambilobe, également à Madagascar. Les ammonites telles que *Manuaniceras manuanense*, *Oxydropidoceras*, *Hysterocheras*, *Pervinquieria* et *Neophlycticeras*, mentionnées dans les travaux de Bésairie & Collignon (1972) sur l'Albien d'Ambilobe, ne doivent pas être confondues avec la faune d'Ambatolafia. Ces formes enrichissent les connaissances sur la biodiversité du Crétacé moyen et contribuent à l'établissement d'une stratigraphie régionale cohérente. De même, les foraminifères planctoniques (*Globigerina washitensis*, *Ticinella roberti*, *Thalmanitella ticinensis*, *Biticinella breggiensis*). Ces observations ont été confirmées par Randrianasolo (1986), dans le cadre de son étude stratigraphique et micropaléontologique des bassins sédimentaires au nord de la Betsiboka. Il y a notamment analysé les assemblages de foraminifères planctoniques du milieu de l'Albien jusqu'à la limite Crétacé-Tertiaire.

Des recherches menées par Courville & Lebrun (2011) sur l'Albien de la région de Troyes (département de l'Aube, France) révèlent la présence d'ammonites enroulées telles que *Douvilleiceras*, *Cleoniceras*, *Sonneratia*, *Pseudosonneratia*, *Neosaynella* et *Protohoplites*.

Des formes déroulées comme *Protanisoceras* y sont également recensées. À ces macrofossiles s'ajoutent des gastéropodes pyriteux (*Bellerophina minuta*) et une abondance notable de foraminifères benthiques, comme déjà souligné par Magniez-Janin (1975). Ces données mettent en évidence des similarités faunistiques et stratigraphiques entre les bassins européens et malgaches durant l'Albien.

Le Secteur d'Ambatolafia, par la richesse et la diversité de sa faune fossile, s'impose comme une référence majeure pour l'étude de l'Albien à Madagascar. L'analyse conjointe des macro- et microfossiles, ainsi que les comparaisons régionales et internationales, permettent une reconstitution précise des paléoenvironnements et renforcent la valeur stratigraphique de ce gisement exceptionnel.

Le gisement d'Ambatolafia représente un potentiel important pour la compréhension des écosystèmes marins de l'Albien. Par la diversité et la bonne conservation des fossiles, notamment les ammonites, la spécificité de certains taxons, ainsi que le potentiel de corrélation avec d'autres régions du monde, ce site joue un rôle fondamental dans la reconstitution des paléocosystèmes et de la stratigraphie albienne. Il illustre aussi l'importance de Madagascar comme une zone explosive de la paléobiodiversité du Mésozoïque marin. La faune d'Ambatolafia témoigne d'un milieu marin confiné, de profondeur moyenne, calme et relativement proche de la côte, sous un climat chaud.

III.3. Paléoécologie

La présence de domaines paléogéographiques différents et la multiplicité des biotopes contribuent fortement à une analyse fine de la distribution des diverses associations des fossiles. Aussi est-il important d'étudier et de caractériser les associations faunistiques fossiles contenues dans les sédiments du Secteur d'Ambatolafia afin de déterminer leurs milieux de dépôts et affiner ainsi l'étude paléoécologique du milieu.

L'étude paléoécologique du site albien d'Ambatolafia, situé dans le bassin sédimentaire nord-ouest de Madagascar, repose sur l'analyse d'un assemblage fossile particulièrement diversifié et bien conservé. La faune identifiée comprend majoritairement des ammonites, mais également un macrofaune varié (bivalves, gastéropodes, nautilus) ainsi qu'une microfaune constituée de foraminifères et de microgastéropodes. Les ammonites constituent le groupe fossile le plus représentatif de l'assemblage.

Les espèces de ces ammonites illustrent une faune classique de l'Albien marin. Ces ammonites à coquille enroulée, appartenant à différents sous-ordres (Ammonitina, Phylloceratina, Lytoceratina), sont typiques de milieux marins ouverts, bien oxygénés, et

relativement profonds, permettant un fort développement de formes nectoniques et pélagiques.

A ces formes s'ajoutent plusieurs ammonites hétéromorphes à coquille déroulée. Bien que moins abondantes, ces espèces témoignent de niches écologiques spécifiques souvent associées à des environnements plus calmes, voire semi-pélagiques. Leur relative abondance à Ambatolafia, comparée à d'autres gisements albiens mondiaux, confère au site un intérêt paléobiogéographique particulier. La faune benthique est bien représentée par plusieurs espèces de bivalves. Ces taxons sont généralement associés à des environnements littoraux ou sublittoraux peu profonds, où les substrats meubles ou sableux favorisent leur installation. Leur présence indique des conditions marines peu profondes à modérément profondes, bien oxygénées et productives.

Les gastéropodes reflètent également un environnement marin côtier à plateforme interne, riche en niches écologiques benthiques. Enfin, les nautilus, formes nectoniques proches des ammonites, renforcent l'idée d'un milieu marin ouvert, probablement de type infralittoral à circalittoral. Le composant microfossile, bien que moins abondante, joue un rôle clé dans la reconstitution des paléoenvironnements. Une espèce de foraminifère benthique, *Lenticulina gibba*, a été identifiée. Ce taxon est caractéristique des milieux marins relativement calmes, à faible énergie, souvent associés à des substrats fins riches en matière organique. Il indique également une profondeur modérée et une bonne stabilité des conditions environnementales.

Les microgastéropodes présents sont typiques des milieux peu profonds, voire lagunaires, et tolèrent souvent des variations modérées de salinité. Leur présence suggère des environnements proches de la côte, interconnectés avec des zones plus ouvertes.

L'ensemble de la faune recueillie à Ambatolafia permet de proposer un modèle paléoécologique basé sur une mosaïque d'environnements marins au sein d'une plateforme carbonatée ou mixte, allant :

- de zones littorales peu profondes, où se développent bivalves, gastéropodes et microgastéropodes ;
- à des zones plus ouvertes et plus profondes, habitées par les ammonites enroulées et les nautilus ;
- avec des milieux calmes et protégés, propices à la prolifération des ammonites hétéromorphes et des foraminifères benthiques.

Cette diversité d'habitats suggère un écosystème marin richement structuré, avec une productivité biologique importante, une stratification écologique bien marquée et des conditions physico-chimiques stables (bonne oxygénation, salinité marine normale). La diversité de milieu de vie pendant l'Albien dans notre travail est confirmée par l'étude effectuée par (Rakotonimanana, 2023). Les ammonites albiennes étaient des organismes marins écologiquement importants, occupant une grande diversité d'habitats et de niches écologiques dans les océans de cette époque

Quant à la paléoécologie de la région de Troyes au stratotype de l'Albien (dans le département de l'Aube, France), telle qu'elle ressort des études menées par Courville & Lebrun (2011) et Magniez-Janin (1975), permet de reconstituer un environnement marin riche et diversifié durant l'Albien. L'ensemble des fossiles identifiés indique un milieu marin ouvert, peu profond à moyennement profond, avec une bonne circulation des eaux et probablement

une oxygénation suffisante du fond (Hallam, 1992). La présence des ammonites enroulées est typique d'un environnement marin de plateforme continentale, tandis que les formes déroulées suggèrent des niches écologiques spécifiques, avec des comportements nageurs différents, probablement moins actifs (Westermann, 1996). L'existence des gastéropodes pyriteux indique des conditions localement anoxiques ou réduites, riches en matières organiques (Wignall & Myers, 1988). L'abondance et la diversité des foraminifères benthiques, indicateurs de la nature du substrat et de la qualité des eaux, suggèrent un environnement de fond marin stable et favorable à la vie (Murray, 2006). La région de Troyes à l'Albien correspondait donc à un environnement marin tropical à subtropical, avec une biodiversité notable. La faune ammonitique variée et les foraminifères benthiques montrent une écologie complexe, avec des conditions favorables à la vie marine, et une intégration dans un réseau paléobiogéographique plus large, reliant l'Europe à d'autres régions comme Madagascar (Wiedmann & Kullmann, 1981 ; Collignon, 1963

Le site albien d'Ambatolafia constitue un excellent exemple de paléoécosystème marin du Crétacé moyen. La richesse et la variété des associations fauniques, associées à des données microfossiles précises, permettent d'y reconstituer un environnement complexe, caractérisé par une grande diversité écologique et une forte connectivité entre zones côtières et offshore. Ce site présente donc un intérêt majeur pour les études paléontologiques, stratigraphiques et paléogéographiques de l'Albien en région gondwanienne.

III.4. Paléoenvironnement

La reconstitution des environnements anciens ou paléoenvironnements repose sur l'analyse croisée des données sédimentaires (nature des sédiments, taille des grains, géométrie des dépôts, structures sédimentaires, etc.) et paléontologiques (diversité et nature des fossiles retrouvés (Nichols, 2009 ; Reading, 1996 ; Tucker, 2003). Dans le cas de l'Albien du secteur d'Ambatolafia, l'interprétation est fondée sur des données lithologiques, géochimiques, morphoscopiques et paléontologiques.

La lithologie de cette formation est dominée par des dépôts gréseux, argileux et calcaires riches en fossiles, traduisant un environnement de dépôt mixte, marqué à la fois par des influences fluviales et marines. Ces sédiments indiquent une sédimentation en contexte de plateforme peu profonde, à proximité d'un littoral actif (Hallam, 1985 ; Selley, 2000).

La composition géochimique, notamment la forte teneur en oxydes de fer (Fe_2O_3) et en alumine (Al_2O_3), suggère des apports détritiques importants en provenance des zones continentales voisines, probablement liés à l'érosion de formations terrestres anciennes. La faible teneur en magnésium (MgO) est compatible avec un climat chaud, de type tropical à subtropical, typique du Crétacé moyen (Wedepohl, 1995).

Les grès argilo-calcaires observés témoignent de variations des conditions de dépôt, reflétant des oscillations du niveau marin (transgressions et régressions) et des fluctuations dans les apports sédimentaires (Reading, 1996 ; Tucker, 2003). La morphoscopie des grains, majoritairement subanguleux à anguleux, indique un transport sur une distance relativement courte, ce qui renforce l'idée d'une proximité des zones de provenance (Nichols, 2009 ; Tucker, 2003).

Sur le plan paléontologique, les fossiles identifiés, principalement marins, sont caractéristiques d'un milieu peu profond, bien oxygéné et relativement stable. On y retrouve notamment des ammonites, des bivalves et d'autres invertébrés typiques des mers épicontinentales du Crétacé (Flügel, 2010).

Ainsi, le paléoenvironnement de l'Albien d'Ambatolafia correspond à une plateforme marine peu profonde, de type mer épicontinentale, soumise à des influences continentales marquées, notamment par des apports détritiques fluviaux. La sédimentation s'est déroulée sous un climat chaud, dans un contexte dynamique à la fois marin et continental, ce qui explique la diversité lithologique et paléontologique observée.

L'étude de l'Albien du Secteur d'Ambatolafia, dans le bassin sédimentaire de Mahajanga, permet de mieux comprendre l'évolution géologique et les processus sédimentaires qui ont façonné cette région au cours du Crétacé moyen. Les données collectées révèlent une série de dépôts sédimentaires caractéristiques, associés à des environnements marins et fluviaux. L'Albien, période importante du Crétacé, marque une phase de transition importante dans l'histoire géologique de Madagascar, avec des variations de faunes et des changements dans les conditions paléoclimatiques.

Les dépôts clastiques, tels que les grès et les argiles observés dans les formations d'Ambatolafia, suggèrent l'existence d'environnements fluviaux. Ces milieux étaient probablement dominés par des réseaux de rivières qui se déversaient dans un environnement marin, où les sédiments étaient continuellement transportés et déposés par les cours d'eau. Ces environnements étaient propices à l'accumulation de sédiments fins, riches en matières organiques, ce qui a favorisé la préservation de fossiles marins.

Les analyses lithologiques et paléontologiques effectuées à Ambatolafia témoignent d'une dynamique géologique complexe, des changements de niveau marin. Les fossiles marins, notamment les ammonites permettent de dater les couches sédimentaires et d'identifier des périodes de stabilité ou de perturbation dans l'évolution de l'environnement local.

L'étude de l'association faunistique de l'Albien d'Ambatolafia a permis de mettre en évidence une grande diversité d'espèces animales, indiquant un écosystème complexe et varié durant la période de l'Albien, à Madagascar. L'analyse des fossiles retrouvés dans cette formation nous a révélé des caractéristiques significatives qui peuvent être mises en relation avec les conditions climatiques et géographiques de l'époque.

III.5. Variations des variables morphométriques

Les résultats obtenus sur la relation entre les paramètres morphologiques des ammonites au cours de leur croissance confirment l'hypothèse d'une croissance allométrique relativement stable, marquée par des proportions constantes entre les différentes parties de la coquille. Plusieurs études ont montré que les rapports morphométriques (comme le diamètre de la coquille, la hauteur du tour, et l'épaisseur de la section du tour) restent globalement proportionnels tout au long de l'ontogenèse, ce qui suggère un contrôle génétique fort du développement chez les ammonites (Checa, 1994 ; Guex, 1987).

Cependant, des variations ponctuelles peuvent survenir dans ces rapports morphologiques, souvent interprétées comme des réponses phénotypiques à des facteurs environnementaux. Par exemple, des conditions telles que la disponibilité de la nourriture, la température ou la salinité de l'eau peuvent influencer la vitesse de croissance ou le taux de dépôt du carbonate de calcium, entraînant ainsi de légères déviations morphologiques (Landman *et al.*, 1996 ; Wilmsen & Mosavinia, 2011).

Ces variations environnementales pourraient expliquer certaines différences interindividuelles observées au sein d'une même espèce, sans pour autant remettre en cause la tendance générale à la stabilité morphologique au cours de la croissance. En ce sens, les caractères phénotypiques des ammonites pourraient leur avoir permis de s'adapter rapidement à des changements de leur milieu, tout en conservant une architecture de coquille globalement constante (Westermann, 1996).

CONCLUSION ET PERSPECTIVE

Les faunes retrouvées, principalement des fossiles d'invertébrés, montrent des affinités avec d'autres régions du Gondwana, suggérant des échanges fauniques entre les continents avant leur séparation définitive. En outre, la diversité des espèces et l'abondance de certains groupes fauniques nous renseignent sur un environnement stable et diversifié, probablement dominé par des écosystèmes de type tropical, avec une forte biodiversité et des interactions écologiques variées.

Le climat de l'Albien à Madagascar semble avoir été chaud et humide (tropical et subtropical), avec des périodes de chaleur intense typiques du Crétacé. Cette période est marquée par un réchauffement climatique global, entraînant des élévations du niveau de la mer et la formation d'étendues maritimes peu profondes. Ce climat chaud, combiné à l'augmentation du niveau de la mer, a créé des conditions favorables à la sédimentation marine et à la biodiversité dans la région.

Le bassin sédimentaire de Mahajanga, incluant le Secteur d'Ambatolafia, est situé à une zone de transition tectonique active. Les mouvements tectoniques au cours de l'Albien ont pu influencer les conditions paléoenvironnementales en modifiant les configurations des bassins et en provoquant des changements dans la topographie, le niveau de la mer et les systèmes fluviaux. Ces phénomènes tectoniques ont probablement contribué à l'alternance d'environnements marins et continentaux dans la région, comme en témoignent les variations lithologiques et les successions stratigraphiques observées.

Les fossiles des ammonites vivaient dans des zones marines tropicales et subtropicales, où les températures étaient plus élevées. Ces caractéristiques ont eu des répercussions durables sur le développement des écosystèmes et des espèces qui ont évolué durant cette époque.

Cette association faunistique a également permis de préciser les caractéristiques stratigraphiques de l'Albien d'Ambatolafia, contribuant ainsi à une meilleure compréhension des processus géologiques tels que la subsidence du bassin de Mahajanga qui a permis l'accumulation de dépôts marins, une période de transgression marine générale qui a permis l'envahissement progressif du bassin par des eaux marines peu profondes favorisant les dépôts des sédiments marins qui ont façonné la région au cours de cette époque. Ces résultats apportent un éclairage précieux sur l'évolution des faunes (ammonites enroulées qui évoluent en forme déroulée au cours du Crétacé) de Madagascar et sur les conditions environnementales (climat subtropical, disponibilité en nutriments) qui ont favorisé leur développement.

Le Secteur d'Ambatolafia dans le bassin de Mahajanga est un site important pour l'étude de l'Albien (période géologique il y a environ 113-100 millions d'années). Les principales conclusions concernant l'Albien d'Ambatolafia incluent :

Les résultats obtenus ouvrent la voie à de futures recherches, notamment pour mieux appréhender les interactions entre les événements tectoniques et climatiques, et leurs impacts sur les paléoenvironnements marins et continentaux de Madagascar.

En résumé, l'étude de l'Albien d'Ambatolafia a non seulement enrichi notre compréhension de la diversité et de l'évolution des ammonites à Madagascar, mais elle a également établi des bases solides pour des recherches futures dans ce domaine.

Pour la perspective, cette étude ouvre la voie à de nouvelles recherches, notamment sur les relations biogéographiques entre Madagascar et d'autres territoires du Gondwana au cours de l'Albien. Les fossiles découverts à Ambatolafia constituent un précieux témoignage de la faune passée et enrichissent notre compréhension de l'histoire naturelle de l'île et de la dynamique des écosystèmes à cette époque.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

1. **Barrabe L., 1929.** Contribution à l'étude stratigraphique et pétrographique de la partie médiane du pays sakalava. Mém.Soc.Géol.Fr., n°12, fasc. 3-4.
2. **Barron E.J., Harrison C.G.A., Sloan J.L. & Hay W.W., 1981.** Paléogéography, 180 million years ago to the present. *Ecologiae Geol.Helv.*, pp 443-470.
3. **Bésairie, H., & Collignon, M. 1972.** Géologie de Madagascar. I. Les terrains sédimentaires.
4. **Checa, A. G., 1994.** Taphonomy and palaeoecology of ammonite assemblages in the Upper Jurassic of the Prebetic Zone (Southern Spain). *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 113, pp. 255–278.
5. **Colcanap J., 1910.** Notice géologique sur le cercle d'Analalava. *Bull.Econ.Mad.* n°1, pp.86-97.
6. **Collignon M. 1949.** Recherches sur Les Faunes Albiennes de Madagascar. I. L'Albien d'Ambarimaninga. Gouvernement Général de Madagascar et Dépendances, *Annales Géologiques du Service des Mines* 16, pp.1–128.
7. **Collignon M., 1950.** Recherches sur Les Faunes Albiennes de Madagascar. IV. L'Albien de Mokaraha. Gouvernement Général de Madagascar et Dépendances, *Annales Géologiques du Service des Mines* 17, pp.55–85.
8. **Collignon M., 1951.** Recherches sur Les Faunes Albiennes de Madagascar. V. L'Albien Supérieur d'Andranofotsy (Cercle de Manja) avec une Notice Stratigraphique par P. Hirtz. Gouvernement Général de Madagascar et Dépendances, *Annales des Géologiques du Service des Mines* 19, pp.7–40.
9. **Collignon M., 1953.** Travaux paléontologiques et stratigraphiques. *Rapp.ann.Serv. Mad.*, 101p.
10. **Collignon M., 1963.** Atlas des Fossiles Caractéristiques de Madagascar (Ammonites), X (Albien). Tananarive : Service Géologique, pp.1–184 (plates 241–317).
11. **Collignon M., 1965.** L'Albien de Madagascar, Colloque sur le Crétacé inférieur. Lyon 1963. *Mém. BRGM*, n°34, pp. 303-310.
12. **Collignon M., 1968.** Une Remarque Fauna à *Stoliczkaia* de la Région d'Analalava (Madagascar). *C. R. Sem. Geol. Madag.*, pp.27–32
13. **Courville P. & Bréhéret J.-G., 2006.** L'Albien de la région de Mahajanga (Madagascar) : micropaléontologie et paléoenvironnements.

14. **Courville, P., & Lebrun, P., 2011.** L'Albien (Crétacé) de la région de Troyes (Aube) et ses ammonites : Hoplitidae, Douvilleiceratidae. In : Stratigraphie, Paléontologie et Paléoenvironnements. Bulletin de la Société Géologique de Normandie et des Amis du Muséum du Havre, 96(1), pp.5–65.
15. **De Saint-Ours J., 1952.** Etude géologique des feuilles Mitsinjo-Namakia. Trav.Bur. Géol.Mada, N°34
16. **Douville H., 1904.** Sur quelques fossiles de Madagascar. Bull.Soc, Géol.Fr., 4ème série, tome 4, pp. 207-218.
17. **Flügel, E., 2010.** Microfacies of Carbonate Rocks: Analysis, Interpretation and Application (second Ed.). Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
18. **Gradstein F., Ogg, J. G., Schmitz M. D. & Ogg, G. M., 2012.** The geologic time scale 2012.
19. **Guex, J., 1987.** Analyse morphométrique de l'ontogenèse des ammonites : applications paléocéologiques et phylogénétiques. Geobios, 20(4), pp. 471–481.
20. **Hallam A., 1985.** A review of Mesozoic climates. Journal of the Geological Society, 142(3), pp.433–445.
21. **Hallam A., 1992.** Phanerozoic sea-level changes. Columbia University Press.
22. **Landman, N. H., Cochran, J. K., & Rye, D. M., 1996.** Growth and longevity of Nautilus. Paleobiology, 22(3), pp.273–286.
23. **Lehmann U., 1981.** The Ammonites: Their Life and Their World. Cambridge
24. **Loeblich A.R. & Tappan H., 1964.** Protista 2 in Moore R.C. Treatise on invertebrate Paleontology. Univ. Kansas Press, Part, vol.1et2, 900p.
25. **Loeblich A.R. & Tappan H., 1984.** Suprageneric classification of the foraminiferida (Protozoa). Micropaleontology 30(1), pp.1-70.
26. **Loeblich A.R. & Tappan H., 1988.** Foraminiferal genera and their classification. Van Nostrand Reinhold Co.Inc., New Work, 847 pls, 970P.
27. **Lyon, A. G. (1963).** *Cryptospore-bearing land plants from the Lower Devonian of Scotland.* Transactions of the Royal Society of Edinburgh, 65(6), 233–244.
28. **Magniez-Jannin F., 1975.** Les foraminifères de l'Albien de l'Aube : Paléontologie, Stratigraphie, Ecologie. Cahier paléont. 21 pls, 139 figs, 358p.
29. **Maisey, J. G., 1991.** Fossils: The Key to the Past. McGraw-Hill.
30. **Monnet C., Bucher H. & Guex, J., 2010.** Ammonoid morphological diversification and recovery after the end-Permian mass extinction. Palaeogeography

31. **Mouneyre P.I. & Baron R, 1904.** Rapport sur une tournée géologique effectuée effectuée en 1903 dans l'Ouest et le Nord -Ouest de Madagascar. Bull. econom. Mada., n°1.
32. **Murray, J. W., 2006.** Ecology and applications of benthic foraminifera. Cambridge University Press.
33. **Mutterlose, J., 1984.** Biostratigraphy and ammonite faunas of the Lower Cretaceous in NW Germany. Cretaceous Research, 5(2), pp. 143–165.
34. **Nichols, G., 2009.** Sedimentology and stratigraphy (2nd Ed.). Wiley-Blackwell.
35. **Norovelo C., Rasoloharijaona S., Jaonina M., Rasoafara D. & Randrianantenaina H.G., 2020.** Inventaire des ammonites d'Ambatolafia, Région Boeny, Madagascar : facteurs de répartition des échantillons rencontrés. Rév. Sciences, Technologie, Environnement, Vol.3, 7p.
36. **Péron, M., & Teisseire, A., 1990.** Les fossiles : reconnaissance, classification, détermination. Éditions Bordas.
37. **Perrodon, A., 1980.** Géodynamique pétrolière. Genèse et répartition des gisements d'hydrocarbures.
38. **Powers M.C., 1953.** A new roundness scale for sedimentary particles. Journ.Sedimentary Petrology, Vol.23, n°2, pp .117-119.
39. **Prins C, 2005.** Quelques ammonites albiennes de Madagascar, Bulletin Annuel de l'AGA, n°26, Avec 2 figs et 78 clichés, pp. 23-47.
40. **Rakotonimanana R. M., 2006.** Biostratigraphie des macrofossiles d'invertébrés de l'Albien d'Ambatolafia, Bassin de Mahajanga. Mém. DEA, Dept. DPAB, Fac.Sciences, Univ.Antananarivo, 78p.
41. **Rakotonimanana R. M., 2016.** Ontogénie et phylogénie du genre Cleoniceras de l'Albien. Sud du bassin de Mahajanga. Thèse de Doctorat, AED : Géoressources sédimentaires et changements globaux, ED : STE, Univ. Antananarivo, 64figs, 12Tabs, 115p.
42. **Rakotonimanana R. M., 2023.** Paléoécologie et taphonomie du Crétacé moyen d'Ambatolafia bassin de Mahajanga (Paleoecology and taphonomy of the middle Cretaceous of Ambatolafia Mahajanga basin. IPJSAT, Vol.39, N°1, pp.116-126.
43. **Randrianarisoa A., Rasolonjatovo H. & Randrianasolo J., 2020.** Évolution climatique et variabilité pluviométrique à Madagascar entre 1986 et 2016. Revue scientifique du climat, 15(3), 45-58.

44. **Randrianasolo, A. J., 1986.** Étude stratigraphique et micropaléontologique des bassins sédimentaires malgaches situés au nord de la Betsiboka, de l'Albien moyen à la limite Crétacé-Tertiaire [PhD Thesis, ANRT].
45. **Razafimbelo E., 1963.** Etudes régionales dans la province de Majunga. Coupures au 1/100 000ème d'Andrafiamajera et Sitampiky. Archives SPM.
46. **Razafimbelo M.R., 2015.** Synthèse de l'analyse tectono-sédimentaire des dépôts crétacés de Berivotra (Bassin de Mahajanga). HDR, Ecole Doct. STE, Fac. Sciences, Univ. Antananarivo, 51 figs, 2 tabs 46p.
47. **Razafinindrina L.M.R., 2022.** Paléoenvironnement de l'Albien du secteur Sitampiky, Bassin de Mahajanga. Mém. Master II, Mention STE, Fac. Sciences, Univ. Université, 66p.
48. **Reading, H. G., 1996.** Sedimentary environments: Processes, facies and stratigraphy (3rd Ed.). Blackwell Science.
49. **Roig J.Y., Tucker R.D., Delor C., Peters S.G. & Theveniaut H., 2012.** Carte géologique de la République de Madagascar à 1/1 000 000. Ministère des Mines, PGRM, Antananarivo, République de Madagascar.
50. **Selley, R. C., 2000.** Applied sedimentology (2nd Ed.).
51. **Service météorologique ,2018.** Rapport climatique national annuel. Antananarivo : Direction Générale de la Météorologie.
52. **Tucker, M. E., 2003.** Sedimentary rocks in the field: A practical guide (3rd ed.). Wiley-Blackwell.
53. **Van Der Pluijm M., 2004.** An Introduction to Structural Geology and Tectonics.
54. **Wedepohl, K. H., 1995.** The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 59(7), pp ; 1217–1232.
55. **Westermann G. E. G., 1996.** Ammonoid Life and Habitat. In *Ammonoid Paleobiology*, pp. 607-707.
56. **Wiedmann J., 1966.** The Albian ammonites of Colombia and northern South America and their biogeographical significance." *Geologische Rundschau*, 55(3), pp. 962-984.
57. **Wiedmann, J., & Kullmann, J. ,1981.** Paläobiogeographie der Ammonoideen im Mesozoikum. *Paläontologische Zeitschrift*, 55(1/2), 89–102.
58. **Wignall, P. B., & Myers, K. J., 1988.** Interpreting benthic oxygen levels in mudrocks: A new approach. *Geology*, 16(5), 452–455.

59. **Wilmsen, M. & Mosavinia, M.,2011.** Ontogeny and palaeoecology of the Cenomanian ammonite *Graysonites* from NE Iran. *Acta Palaeontologica Polonica*, 56(3), pp. 593–606

WEBOGRAPHIE

- <http://madarevues.recherches.gov.mg/?INVENTAIRE-DES-AMMONITES-D-AMBATOLAFIA-REGION-BOENY-MADAGASCAR-FACTEURS>. Consulté le 30 mars 2022
- <https://ijpsat.org/index.php/ijpsat/article/view/4976>. Consulté le 15 février 2020
- <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.universalis.fr/dictionnaire/albien/&ved=2ahUKEwjZk7TJ5p6OAxXYV0EAHbybBd0QFnoECDwQAQ&usg=AOvVaw0A6Zk7qdPUhtNVAEKsubiv>. Consulté le 18 juin 2023
- <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://www.universalis.fr/dictionnaire/albien/&ved=2ahUKEwjZk7TJ5p6OAxXYV0EAHbybBd0QFnoECDwQAQ&usg=AOvVaw0A6Zk7qdPUhtNVAEKsubiv>. Consulté le 21 août 2022
- <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://leclub-biotope.com/fr/librairienaturaliste/135stratotype.albien&ved=2ahUKEwjZk7TJ5p6OAxXYV0EAHbybBd0QFnoECEwQAQ&usg=AOvVaw1xf6nbCS--ReejiD6vj4k0>. Consulté le 27 avril 2024
- <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://vitrinelinguistique.oqlf.gouv.qc.ca/fiche-gdt/fiche/8416839/albien&ved=2ahUKEwjZk7TJ5p6OAxXYV0EAHbybBd0QFnoECDwQAQ&usg=AOvVaw1ImPip6bKVLdzk4lWoLD13>. Consulté le 18 mars 2024
- <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=http://paleopolis.rediris.es/cg/14/05/&ved=2ahUKEwj7-tyV6J6OAxUkT0EAHRBME4cQFnoECCQQAQ&usg=AOvVaw2jDdhzjcbw3u6ifTCHzObc>. Consulté le 18 septembre 2024
- <https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://leclub-biotope.com/fr/librairie-naturaliste/135-stratotype-albien&ved=2ahUKEwj7-tyV6J6OAxUkT0EAHRBME4cQFnoECCYQAQ&usg=AOvVaw1xf6nbCS--ReejiD6vj4k0>. Consulté le 24 avril 2024
- https://www.google.com/url?sa=t&source=web&rct=j&opi=89978449&url=https://gryphea.org/fr/ammonite-douveilleicerias-mamillatum-albien-madagascar/&ved=2ahUKEwinu-m-6Z6OAxViUkEAHdn4FskQFnoECBwQAQ&usg=AOvVaw1fypJoOM_kfHWbDz3mIHq. Consulté le 3 juillet 2024

ANNEXES



**INVENTAIRE DES AMMONITES
D'AMBATOLAFIA, REGION BOENY,
MADAGASCAR : FACTEURS DE
REPARTITION DES ECHANTILLONS
RENCONTRES**

**INVENTORY OF AMBATOLAFIA
AMMONITES, BOENY REGION,
MADAGASCAR: DISTRIBUTION
FACTORS OF THE ENCOUNTERED
SAMPLES**

NOROVELO Claudine^{1,2}, RASOLOHARIJAONA Solofonirina^{1,2}, JAONINA Martel², RASOAFARA Doline², RANDRIANANTENAINA Hervé Gilbert²

1: Ecole Doctorale Ecosystèmes Naturels Université de Mahajanga

2: Faculté des Sciences, de Technologies et de l'Environnement, Université de Mahajanga

Correspondant : noroveloclaudine@yahoo.fr ; Tél. +261324763756, +261349107757, +261332917658

Co-auteur :

rasoloharijaona@gmail.com; Tél. +261320218168, +261320557933

jaonina.martel@gmail.com ; Tél. +261342050715, +261329620008

rasoafaradol1@gmail.com ; Tél. +261326920115

hervegilbert@yahoo.fr ; Tél. +261 034 05 766 93

Résumé

La régression marine du Crétacé provoque des crises biologiques mondiales. De nombreuses espèces animales disparaissent, en particulier les Ammonites. De nos jours, ce groupe présente beaucoup d'intérêts tant sur le domaine stratigraphique qu'économique. Malgré cela, les Ammonites sont actuellement menacés par une exploitation commerciale illicite. Des chercheurs ont effectué des études dans le site fossilifère d'Ambatolafia, mais, leurs études sont limitées sur un affleurement peu profond. En 2019, notre équipe a effectué une recherche beaucoup plus avancée en atteignant la profondeur de 30 m dans ce site. L'objectif principal de cette étude est d'avoir un peu plus de données sur les fossiles d'Ambatolafia qui a connu une abondance en Ammonites auparavant.

Les objectifs spécifiques sont de :

- découvrir, sur une profondeur de 30m, d'autres fossiles s'il y en a,
- identifier les formes rencontrées en insistant sur les Ammonites,
- déterminer les facteurs de répartition des Ammonites rencontrés dans ledit site.

L'échantillonnage s'est fait le long d'un puits déjà installé par les exploitants illicites. Tous les échantillons collectés sont mis en sachets et codés à l'aide d'un marker à encre indélébile.

Une détermination systématique par le biais d'un regroupement des formes qui se ressemblent, puis, un classement des échantillons selon leur morphologie et enfin une comparaison avec des catalogues préétablis ont été effectués. Des groupes d'Invertébrés, y compris les Céphalopodes, ont été trouvés. La découverte des Ammonites déroulés ou Hétéromorphes constitue un point fort de la présente étude. L'absence de ces derniers dans le puits de 8m de profondeur constitue-t-elle sa perte à la suite de l'exploitation illicite ou de l'existence des conditions paléo-écologiques non favorables? La préservation de ce site doit être envisagée afin de valoriser leurs intérêts économiques et scientifiques.

Mots clés : Ammonites, Inventaire, Ambatolafia, Madagascar

Abstract

The marine regression of the Cretaceous causes worldwide biological crises. Many animal species disappear, in particular the Ammonites. Nowadays, this group has a lot of interests either in the field of stratigraphic or in the economic one. Despite this, the Ammonites are currently under threat from illegal commercial exploitation. Researchers have carried out studies at Ambatolafia fossil site, but their studies have been limited to a shallow outcrop. In 2019, our team carried out a much more advanced research by reaching the depth of 30 m in this site. The main objective of this study is to have more data on the fossils of Ambatolafia,

this site has been known because of the abundance of Ammonites there before.

The specific objectives are:

- to discover, in the depth of 30m, other fossils if there are any,
- to identify the encountered shapes by focusing on the Ammonites,
- to determine the distribution factors of the encountered Ammonites in the site.

The sampling collection was done along a well already installed by illicit operators. All collected samples were bagged and coded by using an indelible ink marker. A determination of the systematics by means of grouping the similar shapes, then a classification of the samples according to their morphology and finally a comparison with pre-established catalogues were carried out. Groups of invertebrates, including Cephalopods, have been found. The discovery of unrolled Ammonites or heteromorphic (Cephalopods) constitutes a strong point of this study. Does their absence in the 8 m deep well constitute its loss as a result of illegal exploitation or of the existence of unfavourable paleo-ecological conditions? The preservation of this site should be considered in order to enhance their economic and scientific interests.

Keywords: Ammonites, Inventory, Ambatolafia, Madagascar

Introduction

Ambatolafia forme l'un des sites les plus riches en fossiles dans le bassin sédimentaire de Madagascar, notamment des macrofossiles d'Invertébrés (Rakotonimanana, 2006). Dans le cercle de Sitampiky, ce site est caractérisé par l'abondance des Ammonites (Collignon, 1950) et attire de nombreux chercheurs. En effet, des géologues et des paléontologues ont réalisé différents travaux scientifiques dans la présente zone d'étude, à savoir :

- Rakotonimanana, 2006. Biostratigraphie des macrofossiles d'Invertébrés de l'Albien d'Ambatolafia. Bassin de Mahajanga.

- Ravololoniaina, 2019. Biostratigraphie-Variabilité-Evolution de l'espèce *Douvilleiceras mammilatum*, Ammonite de l'Albien du Bassin de Mahajanga.

- Santatriniaina, 2019. Etude Biostratigraphique du Cretacé de Sitampiky- Bassin de Mahajanga.

A noter que leurs recherches étaient réalisées à une profondeur d'environ de 8m au maximum. C'est la raison de la présente étude intitulée « Inventaire des Ammonites d'Ambatolafia, Région Boeny, Madagascar : facteurs de répartition des échantillons rencontrés ».

L'objectif principal de cette étude est d'avoir un peu plus de données sur les fossiles d'Ambatolafia. . Les objectifs spécifiques sont de :

- découvrir, sur une profondeur de 30m, d'autres fossiles s'il y en a,
- identifier les formes rencontrées en insistant sur les Ammonites,
- déterminer les facteurs de répartition des Ammonites rencontrés dans ledit site.

Ce travail comporte successivement comme plan les généralités, la méthodologie, ensuite les résultats qui sont suivis de la discussion, et enfin la conclusion.

Méthodologie

Zone d'étude

La zone d'étude se situe dans la partie Nord-Ouest de Madagascar. Elle fait partie du bassin sédimentaire de Mahajanga. Elle se trouve dans la Région Boeny, District d'Ambato-Boeni, Commune Rurale de Sitampiky, Fokontany d'Ambatolafia, et à 100 Km de la ville de Mahajanga. Elle a comme

coordonnées GPS : une latitude 16°56' Sud, une Longitude 46°23' Est et une altitude 193 m. (Fig. 1).

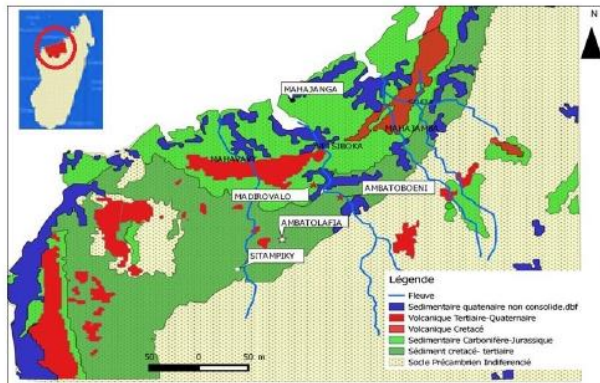


Figure 1. Carte géologique simplifiée du bassin de Mahajanga (Source : Persits et al., 2002)

Aperçu général sur les ammonites

Morphologie de la coquille des ammonites hétéromorphes

Les ammonites hétéromorphes sont des ammonites à coquille déroulée. Ce sont des mollusques à symétrie bilatérale caractérisés par une coquille univalve cloisonnée, appelées Céphalopodes. Elles comportent une partie régulièrement divisée en loges par des cloisons ; l'ensemble constitue le **phragmocône**, et une dernière loge, la **loge d'habitation**, occupée par l'animal de son vivant. Le bord de son ouverture sur l'extérieur s'appelle le **péristome**. Les cloisons de la coquille peuvent être concaves vers l'avant (**cloisons procoeles**), concaves vers l'arrière (**cloisons opisthocoeles**), ou bien une forme très complexe.

Mode d'enroulement

La majorité de la coquille de Céphalopode est enroulée dans un même plan : coquille planispiralée. Chez les ammonites déroulées ou hétéromorphes, l'enroulement de la coquille peut être

planispiralée évolutive, spiralée, recourbée, arquée, droite, irrégulière et complexe ou d'une manière plus ou moins hélicoïdale.

Formes de la section du tour

La forme de la section du tour peut être ronde, circulaire, ovale, ogivale, lancéolée, lancéolée tronquée, tabulaire, quadratique, en croissant, ou rectangulaire.

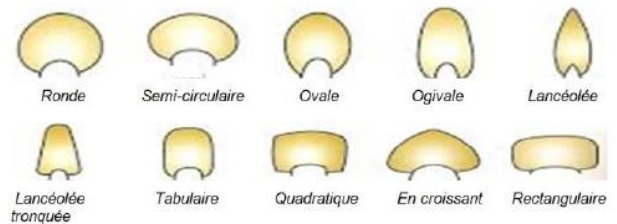


Figure 2. Différentes formes de la section du tour des Ammonites (Source : www.google, juin 2020)

Ornementation

Elle comprend :

- des côtes en relief soit simples, bifurquées ou trifurquées, falciformes, etc.
- des **tubercules**, des **épines**, **dessillons** ou de la **carène**.

Ligne de suture

La ligne d'insertion des septes ou cloisons sur la paroi de la coquille s'appelle **ligne de suture**. Elle n'est visible que si cette paroi est détruite.

On appelle **selles** les ondulations convexes vers l'avant et **lobes** les ondulations convexes vers l'arrière. La morphologie de la ligne de suture est très importante en systématique. Citons :

- type nautile**: ligne de suture de Nautile
- type goniatite**: selles et lobes anguleuses et non divisées.
- type cératite**: selles arrondies et lobes dentés.
- type ammonite**: selles et lobes complexes, évoquant souvent des feuilles de persil.

Travaux sur terrain

A la suite d'une prospection, une carrière située au Nord du village d'Ambatolafia a été choisie comme cible. Il s'agit d'un affleurement en puits de 1m de diamètre et de 30m de profondeur. L'échantillonnage est fait sous l'accord du propriétaire de la carrière. Une corde est utilisée comme moyen de transfert aller-retour le long du puits. Un couteau, une spatule, un chiffon, des sachets en plastique et un sac à échantillons sont nécessaires pour l'échantillonnage. La méthode comprend successivement la mesure de l'épaisseur de la couche fossilifère, le raclage de la dite couche, l'extraction des fossiles et le prélèvement des sédiments. Chaque échantillon est codé et mis dans un sachet plastique, puis dans un sac à échantillon.

Travaux au laboratoire

- Les étapes successives de traitements des échantillons au laboratoire consistent à :
 - dégager les fossiles de leur gangue à l'aide d'un marteau, des burins et des pointes pour les sédiments très indurés ;
 - laisser dans une bassine contenant de l'eau pendant 2 à 4 heures pour rendre meuble les gangues ;
 - brosser et laver soigneusement les fossiles jusqu'à ce que les caractères morphologiques soient bien visibles ;
 - sécher les fossiles à l'air libre ;
 - grouper les formes qui se ressemblent ;
 - classer les échantillons selon leurs caractères morphologiques ;
 - comparer les formes obtenues avec celles figurées sur des catalogues préétablis ;
 - et enfin, procéder à la classification de chaque échantillon dans la hiérarchie taxonomique.

Résultats

Formes rencontrées

Durant les travaux sur terrain, deux types d'Ammonites ont été rencontrés, à savoir :

- les formes enroulées (*Phylloceras velledae*, *Douvilleiceras mammilatum*, *Cleoniceras madagascariensis*, *Cleoniceras besairiei*, *Cleoniceras inaequale*, *Neosilesites ambatolafiensis*)
- les formes déroulées (*Pictetia asteriana*, *Metahamites* sp. aff. *sablieri*, *Plesiohamites* et *Hemiptychoceras*)

Tableau : Répartition des formes rencontrées

Espèces à coquille enroulée	Espèces à coquille déroulée
<i>Phylloceras velledae</i>	<i>Pictetia asteriana</i>
<i>Douvilleiceras mammilatum</i>	<i>Metahamites</i> sp.aff. <i>sablieri</i>
<i>Cleoniceras madagascariensis</i>	<i>Plesiohamites</i>
<i>Cleoniceras besairiei</i>	<i>Hemiptychoceras</i>
<i>Cleoniceras inaequale</i>	
<i>Neosilesites ambatolafiensis</i>	

A noter que le présent article s'intéresse tout simplement sur les espèces déroulées (Figure 2).



Figure 2 : Ammonites déroulées rencontrées (vue latérale)

Description morphologique

Pictetia asteriana présente un enroulement de type Criocône, c'est-à-dire enroulement très lâche, avec section du tour circulaire, ornementation faible et ligne de suture très découpée.

Plesiohamites présente une coquille droite (forme déroulée), un tour initial spiralé en crosse, une section du tour ovale, une ornementation avec des côtes fines obliques, une ligne de suture très découpée.

Metahamites sp.aff. *astieri* d'Orb., présente une coquille à deux segments, une section du tour circulaire, une ornementation à des côtes obliques invariables. La ligne de suture est de type ammonitique.

Hemiptychoceras montre deux segments rectilignes parallèles accolés dont sur la deuxième segment, les côtes sont intercalés par deux bandes plus ou moins grandes périodiquement. La section du tour est arrondie.

Systématique

Règne : ANIMAL

Embranchement : MOLLUSQUES

Classe : CEPHALOPODA, Cuvier 1797

Sous-classe : AMMONOIDEA, Zittel, 1884

Ordre : AMMONITIDA, Hyatt, 1884

Sous-Ordre : LYTOCERATINA Hyatt, 1889

Super-Famille 1: LYTOCERATACEAE Buckman, 1894

Famille : LYTOCERATIDAE Neumayr, 1875

Sous-Famille : LYTOCERATINAE Neumayr, 1927

Genre et espèce : *Pictetia asteriana* Uhlig, 1883

Répartition stratigraphique : Crétacé inférieur (Albien inférieur) (Echantillon Codé : 12-AMBL)

Super-Famille 2: HAMITACEAE Hyatt, 1900

Famille : HAMITIDAE Hyatt, 1900

Genre : *Plesiohamites* Beistroffer, 1947 (Echantillon Codé : 11-AMBL)

Répartition stratigraphique : Crétacé inférieur (Albien inférieur)

Super-Famille 3: TURRILITACEAE, Meek, 1876

Famille: ANISOCERATIDAE, Hyatt, 1900

Genre et espèce : *Metahamites* sp. aff. *sablieri* d'Orb. Collignon, 1953

(*Hamites sablieri*, Orbigny, 1842) (Echantillon Codé : 17-AMBL)

Répartition stratigraphique : Crétacé inférieur (Albien inférieur)

Super-Famille 4: TURRILITACEAE, Meek, 1876

Famille : HAMITIDAE, Hyatt, 1900

Genre : *Hemiptychoceras* Spath, 1925 Echantillon Codé : 16-AMBL

Répartition stratigraphique : Crétacé inférieur (Albien inférieur)

Discussion

L'investigation paléontologique, particulièrement sur l'inventaire des Ammonites dans le site fossilifère d'Ambatolafia confirme la présence d'individu à coquilles enroulées comme prévu dans la documentation et annonce l'existence d'autres formes dites déroulées. Du point de vue effectif, les formes enroulées sont légèrement plus nombreux (six) par rapport à celles déroulées (quatre).

Tous les Ammonites trouvés dans le site sont en bon état de conservation et dans un dépôt marin: ce sont donc des fossiles autochtones. Il s'agit de bons fossiles stratigraphiques, la couche marneuse où ils se trouvent, est datée du Crétacé inférieur, plus précisément de l'Albien inférieur. Rappelons que le Crétacé marque aussi bien l'évènement des Ammonites par des formes multiples et complexes que leur extinction par fatigue génétique et sur-

adaptation. Selon Renata (2007-2008), au début de leur apparition, les Ammonoïdés étaient droites. Peu à peu, ils sont devenus enroulés, et soudain, des formes de plus en plus déroulées apparaissent vers le Crétacé. Le déroulement de la coquille est expliqué par l'adaptation aux changements paléo-écologiques. A signaler que l'apparition des formes déroulées ne veut pas dire l'extinction des formes enroulées car ces dernières sont disparues vers le Crétacé supérieur.

A noter qu'à Madagascar, le Crétacé est marqué par le phénomène de la transgression - régression. A la suite du test avec l'Acide chlorhydrique faible, la base du puits est caractérisée par une formation continentale. Ensuite, puisque la couche où se rencontraient les formes enroulées (0 à 8m) se trouve au-dessus de celle qui renfermait les formes déroulées (vers 30m de profondeur) et les deux couches sont intercalées par des formations continentales, il est logique de dire que le phénomène de transgression-régression se répète deux fois dont le premier, qui dépose la formation marine renfermant les Ammonites déroulées, qui est datée du Crétacé inférieur ou de l'Albien inférieur. Ensuite, le second dépose les dépôts marins de 8m de profondeur dont leur âge est plus récent que le premier. Comme la répartition stratigraphique des Ammonites déroulées est le Crétacé inférieur (Albien inférieur), c'est l'une des raisons pour expliquer leur absence dans les formations récentes du Crétacé (8m de profondeur), c'est-à-dire de l'Albien moyen et supérieur.

Conclusion

L'inventaire des Ammonites dans le site paléontologique d'Ambatolafia a permis de trouver

les formes enroulées, à savoir, *Phylloceras velleidae*, *Douvilleiceras mammilatum*, *Cleoniceras madagascariensis*, *Cleoniceras besairiei*, *Cleoniceras inaequale*, *Neosilesites ambatolafiensis*, et déroulées telles que *Pictetia asteriana*, *Metahamites* sp.aff. *sablieri* d'Orb., *Plesiohamites* et *Hemiptychoceras*.

Toutes les espèces rencontrées sont datées du Crétacé inférieur (Albien inférieur) et autochtones.

La manifestation en deux étapes du phénomène de transgression-régression dépose deux formations d'âges différents, c'est-à-dire que le premier est daté du Crétacé inférieur (Albien inférieur) et correspond à l'âge des Ammonites déroulés et le second est d'âge plus récent que le premier (Albien moyen ou supérieur) dont les formes enroulées sont encore vivants. Ce fait explique l'absence des formes déroulées dans les formations récentes du Crétacé.

References bibliographiques

- Collignon, M., (1950). Recherches sur Les Faunes Albiennes de Madagascar. II. Les Echinides d'Ambarimanga. *Annales Géologiques du Service des Mines*, 17.
- Collignon, M. (1950). Recherches sur Les Faunes Albiennes de Madagascar. III. L'Albien de Komihavitra. *Annales Géologiques du Service des Mines*, 17, 19-54.
- Collignon, M., (1950). Recherches sur Les Faunes Albiennes de Madagascar. IV. L'Albien de Mokaraha. *Annales Géologiques du Service des Mines*, 17, 55-85.
- Persits, F., T. Ahlbrandt, M. Tuttle, R. Charpentier, M. Brownfield, and K. Takahashi, (2002). Map showing geology, oil and gas fields and geological provinces of Africa, Version 2.0, USGS Open File. Report 97-470A. 28 pages.

- Rakotonimanana, R.H., (2006). Biostratigraphie des macrofossiles d'Invertébrés de l'Albien d'Ambatolafia, Bassin de Mahajanga. 85 pgs, 8pls
- Ravoloniaina, M.M., (2019). Biostratigraphie-Variabilité-Evolution de l'espèce *Douvilleiceras mammilatum*, Ammonite de l'Albien du Bassin de Mahajanga. Mémoire de fin d'étude pour l'obtention du Diplôme de Master. Mention : Bassins sédimentaires, évolution et conservation. Université d'Antananarivo. 49 pages + Annexes.
- Renata, G., (2007-2008). Les ammonites. Etude de leur morphologie.



COMPILATION BIBLIOGRAPHIQUE DE LA FLORE FOSSILE DE MADAGASCAR

Par Mme NOROVELO Claudine¹ ;
Dr RAHANTARISOA Lydia² ;
Pr tit RANARIJAONA Hery Lisy Tiana¹

- (1) Université de Mahajanga
- (2) Université d'Antananarivo

Conférence sur les : « **ETUDES INTEGRATIVES DE LA DIVERSITE ET DE L'HISTOIRE EVOLUTIVE DES PLANTES TROPICALES A MADAGASCAR A TRAVERS DES EXTINCTIONS MASSIVES** »

24 octobre 2022, salle de conférence Immeuble Kakal Mahajangabe, Mahajanga Madagascar

INTRODUCTION

L'espèce *Takhtajania perrieri* (Capuron) Baranova & Leroy, le seul représentant Afrique/Madagascar de la famille des Winteraceae, a été redécouvert au début du Crétacé dans le Nord-Est de Madagascar, 85 ans après sa découverte initiale : un « fossile vivant » à étudier et à placer dans le contexte des angiospermes primitifs disparus et des autres primitifs existants.

La Famille des Winteraceae, avec environ 65 espèces présentant une distribution gondwaniennne reliqueuse, sont considérés parmi les familles de plantes à fleurs (avec Chloranthaceae) d'après le pollen fossiles types attribué aux familles,

Les végétaux ont joué un rôle considérable au cours de l'histoire de notre planète ;

Ils sont moins fréquents dans les sédiments, alors moins utilisés comme fossiles caractéristiques. Mais, ils présentent un intérêt important en stratigraphie au cours du Paléozoïque (Ere Primaire). Les événements chronologiques de la préhistoire récente de Madagascar et plus particulièrement ceux portant sur les actuelles forêts sèches de l'ouest (Burney et al., 2004 ; Goodman et al, 2018).

- 40 000-20 000 BP : Conditions glaciaires complètes, les hautes terres du centre sont dominées par un fourré éricoïde. Températures moyennes $>4^{\circ}\text{C}$ plus froides qu'aujourd'hui. Aridité maximum relevée lors du Dernier Maximum Glaciaire.

-17 000 BP : Déglaciation marquée par un réchauffement.

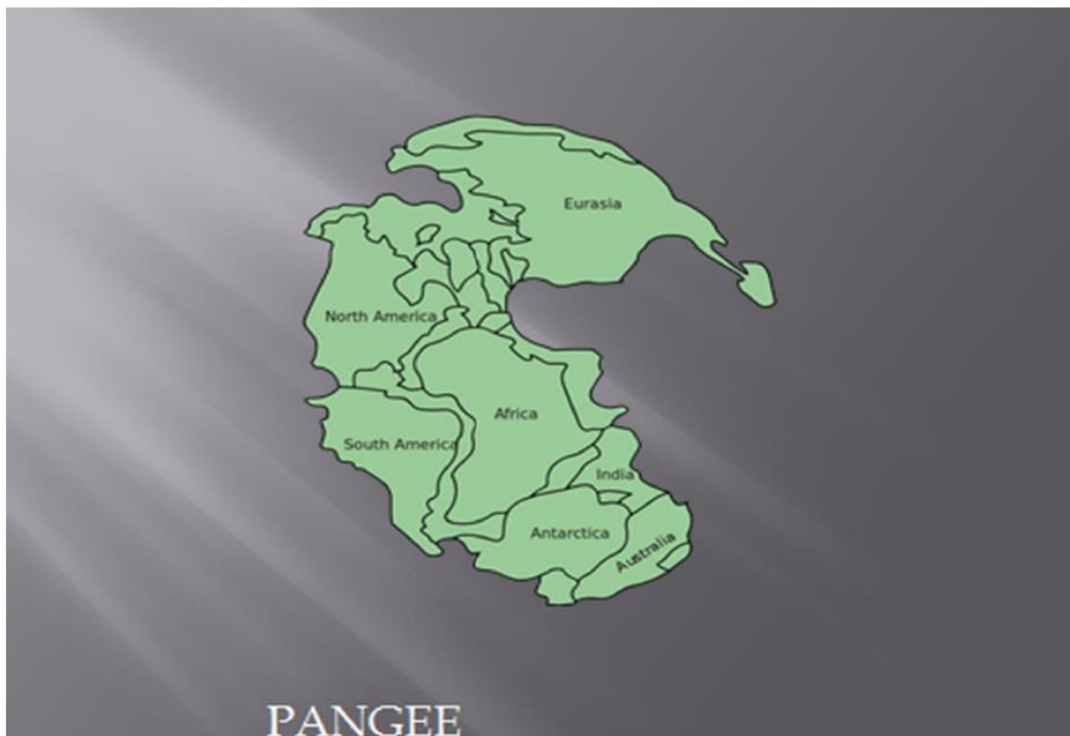
-9800 BP : Une végétation de type Holocène, vraisemblablement une mosaïque de zones arborées plus ou moins ouvertes remplace la végétation du Pléistocène sur les hautes terres.

- 5000 BP : Le niveau de la mer atteint approximativement le niveau actuel.

- 4000 BP : Aridification du climat dans le SW qui se poursuit pendant le reste de l'Holocène.

-2300 BP (350BC) : Première preuve de la présence humaine sous la forme d'un os modifié de la mégafaune éteinte et de pollen de Cannabis/Humulus allogène.

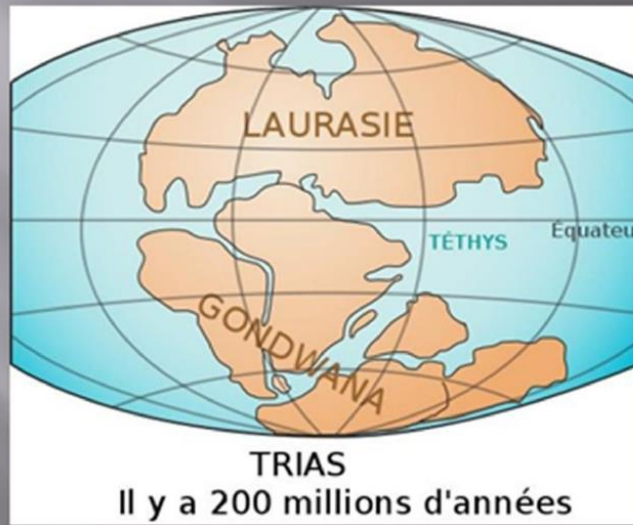
230-410 AD : Déclin important des spores de champignons coprophiles dans les sédiments suite à la réduction des densités de la mégafaune. Brusque augmentation de particules de charbon dans les sites du SW, signalant l'augmentation de l'impact anthropogénique sur les paysages locaux.



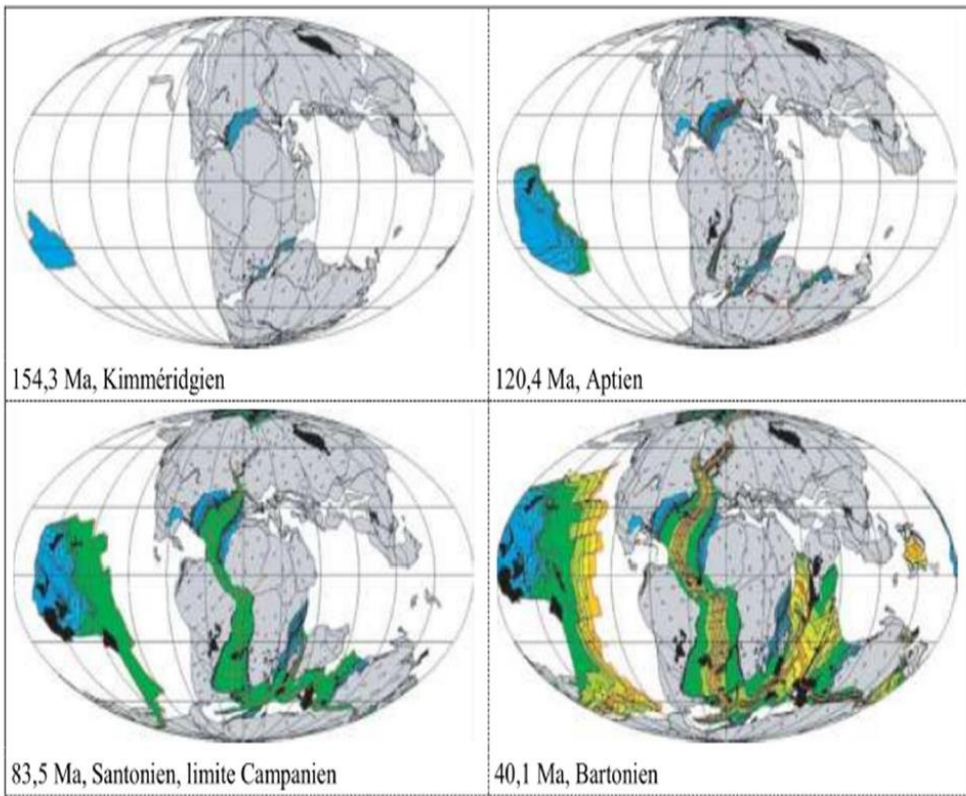
Gondwana

Le Gondwana est un supercontinent formé à la fin du Néoprotérozoïque (– 600 millions d'années)

Les continents du Gondwana sont : Afrique, Arabie, Inde, Amérique du Sud, Antarctique, Australie et Madagascar.



Super continent du Gondwana il y a 600 millions d'années

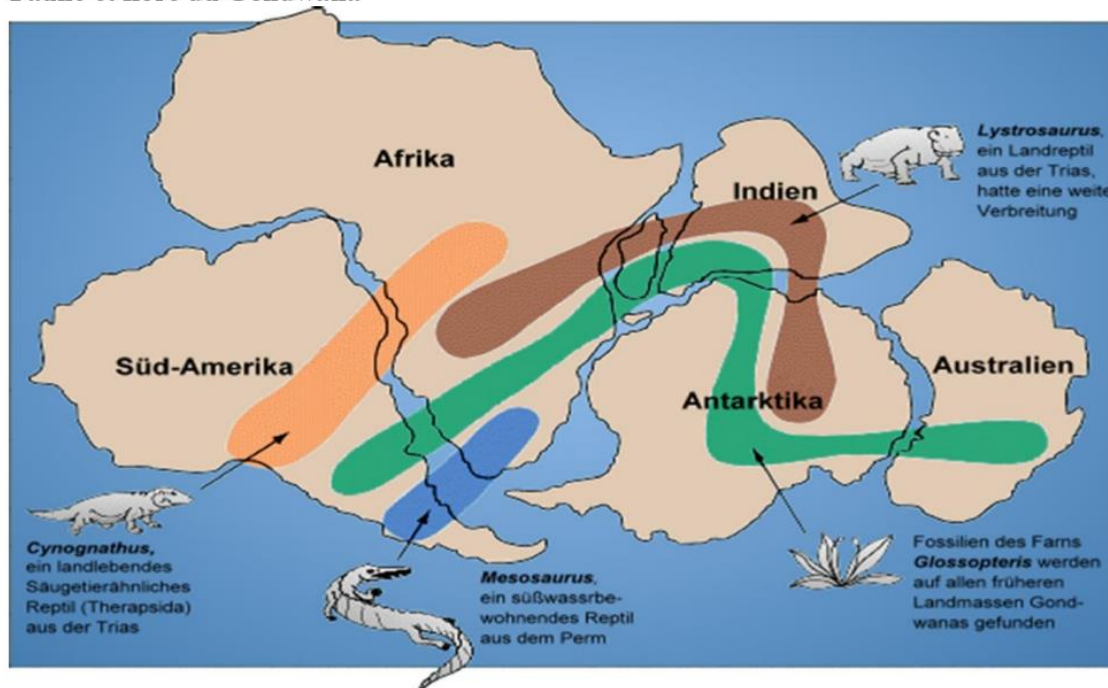


Reconstruction de la dérive des continents proposée par Schettino & Scotese en 2005. (Les zones bleues représentent les vestiges de la croûte océanique qui s'est formée entre ≈ 180 Ma et 154,3 Ma et qui sont toujours conservés dans les océans actuels ; les grandes provinces ignées sont représentées en noir, les centres d'expansion actifs en rouge, les autres zones de couleur dans l'océan représentent la croûte océanique préservée et délimitée par les isochrones successifs) (Wilmé, 2012).

L'ouverture des continents sont importantes parce que cette ouverture qui dépose les couvertures sédimentaires

Les évènements qui se sont produits au cours des millions d'années sont enregistrés dans les sédiments encaissants sous forme de fossiles.

Faune et flore du Gondwana



MODE DE FOSSILISATION DES PLANTES

Les plantes fossiles sont très fragiles.

Elles se présentent sous forme d'empreintes (feuille, tige ou racine) dans les argiles et les schistes.

Pour les troncs d'arbres, le mode de fossilisation se fait par épigénéisation c'est-à-dire remplacement des matières organiques contenues dans les plantes par des minéraux (ex: silice, calcite)

Cas des bois silicifiés, bois calcaires.

La densité des nervures de diverses plantes était de trois à 10 fois plus importante chez les plantes à fleurs, ou les angiospermes qui ont évolué il y a quelques 100 millions d'années (Boyce et al., 2009). En considérant les fossiles des plantes, ils montrent que l'évolution de ce caractère est responsable d'un impact considérable sur le climat à partir de cette époque grâce à la corrélation bien connue entre évapotranspiration des plantes et précipitations dans les forêts tropicales humides.

Le développement du système veineux des plantes et une plus grande production de feuilles permettent de mieux utiliser les ressources en eau et augmentent la biomasse. Les angiospermes étaient directement responsables de l'humidification du climat sous les tropiques dans une boucle de rétroaction positive dont profitera in fine, le monde animal (Boyce et al., 2010).

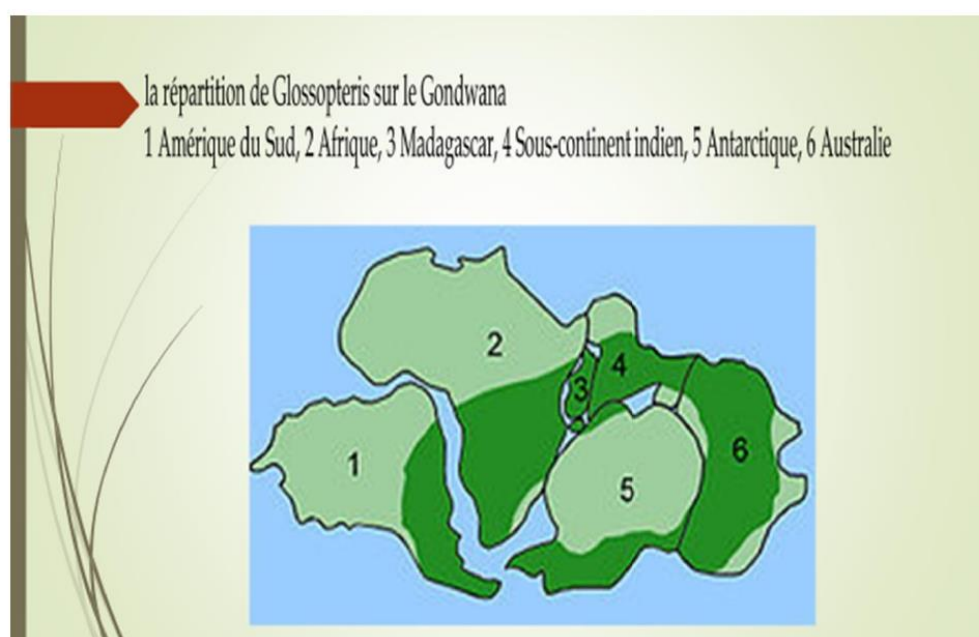
- La flore malgache présente un intérêt scientifique tout particulier en raison de sa diversité et de sa très grande richesse avec de 10.000 à 12.000 espèces recensées (HUMBERT, 1959), dont le niveau d'endémisme spécifique est supérieur à 80% (KOECHLIN et al., 1974) à 14000 espèces actuellement (Rajeriarison, .

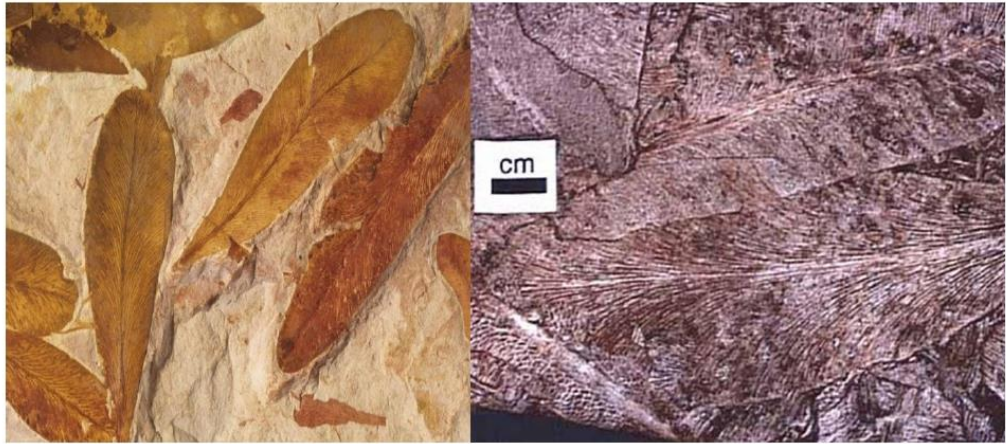
Les espèces actuelles de Madagascar ont une ancienneté de 100 000 ans à 1 Ma (Wilmé, 2012). Au cours de cette période, les variations du climat ont été considérables. Il n'est donc pas possible d'attribuer un changement climatique à une espèce, une espèce n'a pu qu'intégrer les changements biogéographiques.

Evolution de la flore malagasy au cours de l'Ere primaire

A Madagascar , les plantes fossiles existent depuis l'ERE PRIMAIRE dans les couches sédimentaires

Le KARROO malagasy appelé aussi Couche gondwanienne est caractérisée par la présence du Groupe de la SAKOA ou la série houillère est formée par des débris de végétaux dont les plus importants sont les espèces *Gangamopteris madagacariensis* et *Glossopteris madagascariensis*.





Glossopteris madagascariensis



Reconstitution de la flore houillère du Gondwana , constituée par des grands fougères de 30m de haut pendant l'Ere primaire

Evolution de la flore malagasy au cours de l'Ere secondaire

Au cours de l'Ere secondaire les gymnospermes dominent largement jusqu'à la fin du Jurassique, puis les angiospermes (plantes à fleurs) apparues au Trias ou au Jurassique se diversifient et se développent progressivement au cours du Crétacé.



Bois fossile de Madagascar

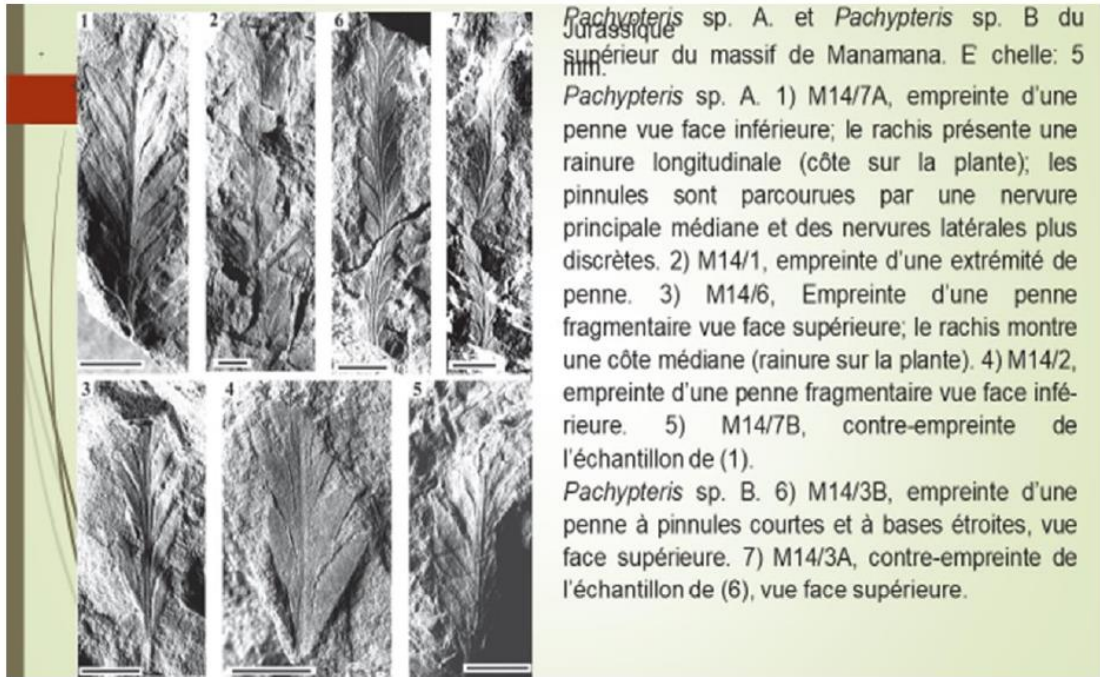
Âge: Permo-Trias

(<https://www.google.com/search?client=firefoxd&q=bois+fossilis%C3%A9+de+madagascar>)

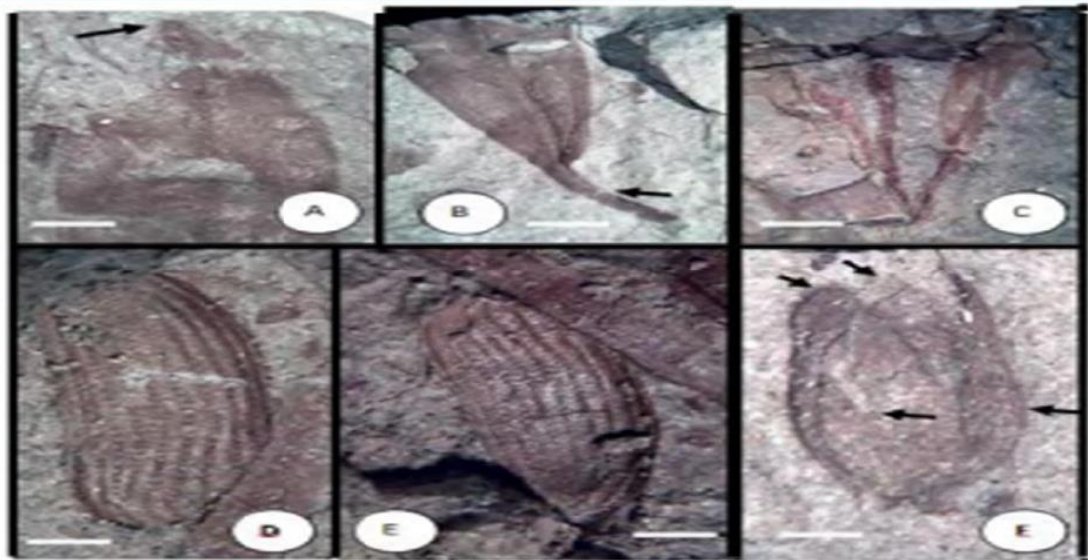


g : *Mariopteris*

Les Ptéridophytes du Jurassique supérieur du massif Manamana au sud-ouest de Madagascar.



(BARALE G. & APPERT O., 2007)



Examples of the megafossil flora recovered from the Maevarano Formation (Campanian – Maastrichtian) 25 km north of the turn off to Maroavay on the NR 4. A)

The terminal portion of a *Sapindopsis* leaf showing the acut apex (arrow). Note the prominent midrib. Scale Bar = 4 mm. B) A portion of a *Sapindopsis* leaf showing the cuneate basal portion of the leaf and the petiole (arrow). Note that the leaf venation appears to be alternate to sub-opposite. Scale Bar = 4 mm C) Terminal branch of *Sapindopsis* showing the alterate arrangement of the leaves. Scale Bar = 4 mm D-E) Beetle elytron, possibly of the families Curculionidae (e.g. *Hylastinus* sp), Tenebrionidae (e.g. *Tribolium*), Boganiidae, or Oedemeridae. Scale Bar = 1 mm F) Possibly a fourloculate capsule (arrows) Scale Bar = 1 mm.



Vue externe



Vue interne

Bois silicifié du Crétacé supérieur
Gisement: Mangapaika (Mahajanga) (NOROVELO et al., 2022)

Evolution de la flore malagasy au cours de l'Ere tertiaire et quaternaire



Dans le bassin de Mahajanga, le Pliocène est caractérisé par la présence du bois silicifié. Ex: bois silicifié Cirque rouge.

(<https://www.google.com/search?q=cirque+rouge+majunga>)

Fossile vivant

Désigne un organisme dont les traces apparaissent dans les couches fossiles des premières périodes géologiques, et dont on retrouve aujourd'hui des spécimens vivants. Ces êtres vivants n'affichent aucune différence avec homologues d'il y a des millions d'années, et ils représentent des exemples vivants de ces formes fossiles mortes il y a bien longtemps.



Fossile vivant

Ginkgo biloba Eocene fossil leaf from the Tranquille Shale of MacAbee, British Columbia, Canada et Madagascar

(<https://www.google.com/search?q=ginkgo+biloba+FOSSILE>)



Fossile

CONCLUSION

Madagascar s'est séparée de l'Afrique continentale puis du sous-continent indien il y a respectivement environ 150-160 (Trias) et 84-91 millions d'années (Crétacé). La flore fossile malagasy a donc été longtemps considérée comme une relique d'une ancienne végétation gondwanienne, séparée par effet de vicariance du fait de la rupture continentale. Les analyses d'horloges moléculaires suggèrent cependant que la plupart des lignées de plantes et d'autres organismes ont immigré par dispersion transocéanique, étant donné qu'on estime qu'elles se sont écartées des groupes continentaux bien après la dislocation du Gondwana. La seule lignée de plantes endémiques de Madagascar suffisamment ancienne pour être une relique possible de Gondwana semble être l'espèce *Takhtajania perrieri* (Winteraceae). La plupart des groupes de plantes existants ont des affinités avec l'Afrique, ce qui correspond à la distance relativement faible qui les sépare du continent, et il y a également de fortes similitudes avec les flores des îles de l'océan Indien telles que les Comores, les Mascareignes et les Seychelles. Mais il existe aussi des liens avec d'autres flores plus lointaines, comme celles de l'Inde et de la Malaisie. Après leur séparation d'avec l'Afrique, Madagascar et l'Inde ont dérivé vers le pôle Sud jusqu'à une latitude de 30° S. Pendant le Paléocène et l'Éocène, après s'être séparée de l'Inde, Madagascar s'est à nouveau déplacée vers le nord jusqu'à traverser la crête subtropicale. Ce passage a probablement eu pour effet d'amener un climat sec et désertique à travers l'île, dont la zone s'est ensuite contractée pour former les actuels fourrés épineux subarides du Sud-Ouest.

Les forêts humides se sont probablement établies à partir de l'Oligocène, lorsque l'Inde a dégagé la voie maritime orientale, permettant aux alizés d'apporter des précipitations, et que Madagascar s'est déplacée au nord de la crête subtropicale. L'intensification du système de mousson de l'océan Indien il y a environ huit millions d'années aurait favorisé l'expansion des forêts humides et sub-humides durant le Miocène tardif, en particulier dans la région septentrionale du Sambirano. Certaines des prairies datent peut-être aussi du Miocène supérieur, à l'époque de l'expansion des prairies à l'échelle mondiale.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- 1- BARALE G. & APPERT O., 2007. Gymnospermes s.l. du Jurassique supérieur du massif Manamana, Sud-Ouest de Madagascar : une nouvelle paléoflore gondwanienne. pp. 208- 214.
- 2- BESAIRIE, H., 1972. Précis de géologie de Madagascar. Service Géologique de Madagascar. Tananarive, 36, 463 p.
- 3- BOYCE, C. K., BRODRIBB, T. J., FEILD, T. S. & ZWIENIECKI, M. A. ,2009. Angiosperm leaf vein evolution was physiologically and environmentally transformative. *Proceedings of the Royal Society B* 276: 1771–1776. doi: 10.1098/rspb.2008.1919,
- 4- BOYCE, C. K., LEE, J.-E., FEILD, T. S., BRODRIBB, T. J. & ZWIENIECKI, M. A., 2010. Angiosperms helped put the rain in the rainforests: The impact of plant physiological evolution on tropical biodiversity. *Annals of the Missouri Botanical Garden* 97: 527–540. doi:10.3417/2009143.
- 5-LOWRY P., SHATZ G., A., RAMISAMIHANTANIRINA, TAKHTAJANIA PERRIEREDECOUVERT, 1998. *La Nature*, vol. 391.
- 6-RAHANTARISOA L.,2018. Couverture sédimentaire de Madagascar (Géologie de Madagascar). Cours, Mention Sciences de Terre et Environnement, Fac. Sciences, Univ. Antananarivo.
- 7- RAKOTOVAO M., 2015. Carte Paléontologique de Madagascar. Inventaire et Mise En Valeur Du Patrimoine Paléontologique. Université Toulouse 3 Paul Sabatier (UT3 Paul Sabatier) cotutelle internationale avec Université de Mahajanga, Madagascar.
- 8- RANAIVOSOA V, RAKOTONDRAZAFY T, ZAVADA, 2020. Palynostratigraphy of Upper Mesozoic Outcrops near Anjiajia (Mahajanga Basin), and Manamana (Morondava Basin), and It's Bearing on the Development of Cretaceous Angiosperm Floras in Madagascar. *Int J Paleobiol Paleontol* 2020, 3(1): 000118.
- 9- WILME L., 2012. Biogeographic Evolution of Madagascar's Microendemic Biota': analyse et déconstruction. Sciences agricoles. Université de Strasbourg, 2012. Français. NNT: 2012STRAG050.
- 10-WIT M. J. 2003. Madagascar: Heads it's a continent, tail it's an island. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences* 31: 213–248. doi: 10.1146/annurev.earth.31.100901.141337.

WEBOGRAPHIE

- <https://www.google.com/search?q=ginkgo+biloba+FOSSILE>. Consulté le 18 octobre 2022
- <https://collections.erdw.ethz.ch/gliederung-bestaende/geologisch-palaeontologische-sammlung/historische-sammlung/otto-appert.html>. Consulté le 19 octobre 2022
- <https://www.google.com/search?q=cirque+rouge+majunga>. Consulté le 19 octobre 2021
- https://fr.wikipedia.org/wiki/Flore_de_Madagascar ; Consulté le 23 octobre 2022.

Annexe II : Donnée statistique des espèces

	ESP1			ESP2			ESP3			ESP4			ESP5			ESP6			ESP7		
	D	E	H	D	E	H	D	E	H	D	E	H	D	E	H	D	E	H	D	E	H
Moyenne	7,519	3,847	2,684	10,814	2,766	5,566	4,614	2,390	2,800	2,713	0,720	0,920	9,480	3,660	4,600	3,580	1,840	1,680	3,025	1,075	1,700
Variance	16,807	6,183	2,983	50,518	2,066	12,897	5,084	1,485	2,438	0,274	0,032	0,024	0,697	0,153	0,525	2,752	1,333	0,752	0,369	0,049	0,167
Ecart-type	4,100	2,487	1,727	7,108	1,437	3,591	2,255	1,219	1,561	0,524	0,179	0,156	0,835	0,391	0,725	1,659	1,155	0,867	0,608	0,222	0,408
Espèces	ESP1			ESP2			ESP3			ESP4			ESP5			ESP6			ESP7		
cov(E,D)	9,749			9,702			2,569			0,072			-0,065			1,519			0,101		
cov(E,H)	4,081			4,725			1,789			0,024			0,184			0,777			0,063		
cov(H,D)	6,699			23,736			3,253			0,060			-0,178			1,082			0,168		

RESUME

Cette étude explore les formations sédimentaires albiennes du secteur d'Ambatolafia, situé dans le bassin de Mahajanga (Madagascar), dans le but de mieux comprendre leur environnement de dépôt ainsi que leur contenu paléontologique. L'approche méthodologique repose sur une intégration d'analyses sédimentologiques, paléontologiques et paléoécologiques. Les données sédimentologiques mettent en évidence l'origine détritique des matériaux, tandis que les analyses paléontologiques révèlent un milieu de dépôt marin peu profond, riche en faune. L'assemblage faunique albien se distingue par sa diversité et son importance paléontologique, avec une prédominance de trois familles d'ammonites : Phylloceratidae, Cleoniceratidae et Douvilleiceratidae, caractérisées par leur large répartition géographique. La présence d'ammonites déroulées suggère une diversification des niches écologiques des céphalopodes durant le Crétacé moyen. Ces ammonites sont souvent associées à d'autres groupes fossiles marins, notamment des gastéropodes, des lamelibranches et des foraminifères, apportant des informations complémentaires sur la dynamique écologique albienne. Le climat de cette période, chaud et humide, correspond à des conditions tropicales à subtropicales ayant favorisé l'élévation du niveau marin et la formation de plateformes peu profondes propices à une biodiversité élevée. D'un point de vue paléoécologique, la biocénose macro- et microfaunique témoigne d'un environnement marin néritique interne, à salinité normale et d'influence chaude, situé sur la plateforme interne d'une mer épicontinentale. Les similitudes fauniques avec les provinces téthysiennes soulignent la position paléogéographique stratégique du bassin de Mahajanga, marqué par des affinités fauniques avec l'Afrique de l'Est, l'Inde et l'Amérique du Sud.

Mots-clés : Géochimie, Lithologie, Ammonites, Étude quantitative, Association faunistique, Albien, Bassin de Mahajanga.

ABSTRACT

This study explores the Albian sedimentary formations of the Ambatolafia area, located in the Mahajanga Basin (Madagascar), with the aim of better understanding their depositional environment and paleontological content. The methodological approach is based on an integration of sedimentological, paleontological, and paleoecological analyses. Sedimentological data highlight the detrital origin of the materials, while paleontological analyses reveal a shallow marine depositional environment rich in fauna. The Albian faunal assemblage is notable for its diversity and paleontological significance, with a predominance of three ammonite families Phylloceratidae, Cleoniceratidae and Douvilleiceratidae characterized by their wide geographic distribution. The presence of uncoiled ammonites suggests a diversification of ecological niches occupied by cephalopods during the mid-Cretaceous. These ammonites are often associated with other marine fossil groups, including gastropods, bivalves, and foraminifera, providing complementary information on the ecological dynamics of the Albian. The climate of this period was warm and humid, corresponding to tropical to subtropical conditions that favored sea-level rise and the development of shallow marine platforms conducive to high biodiversity. From a paleoecological perspective, the macro- and microfaunal biocenosis indicates an inner neritic marine environment, with normal salinity and warm-water influence, situated on the inner platform of an epicontinental sea. Faunal similarities with Tethyan provinces highlight the strategic paleogeographic position of the Mahajanga Basin, which shows faunal affinities with East Africa, India, and South America.

Keywords : Geochemistry; Lithology; Ammonites ; Quantitative study; Faunal assemblage ; Albian; Mahajanga Basin.

Nombre de page : 121

Nombre de figures : 39

Nombre de tableaux : 7

Nombre des annexes : 2

Nombre des photos : 39

Directeur de Thèse : Professeur Titulaire RASOLOHARIJAONA Solofonirina

Co-Directeur de Thèse : Maître de conférences-HDR RAHANTARISOA Lydia Jeanne