



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

**ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO (E.S.P.A.)**

DEPARTEMENT GEOLOGIE



**Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention de diplôme
d'Ingénieur de l'E. S. P. A.
Spécialité : Géologie**

**ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNEES
GEOLOGIQUES EN VUE D'ELABORATION DES
CARTES DES INDICES ET STRUCTURALES : CAS
DE LA REGION DE FORT DAUPHIN**

Soutenu publiquement le 31 Mars 2015

Par : RAHARO Pierre Albert

Promotion 2013



UNIVERSITE D'ANTANANARIVO

ECOLE SUPERIEURE POLYTECHNIQUE
D'ANTANANARIVO (E.S.P.A.)

DEPARTEMENT GEOLOGIE



Mémoire de fin d'études en vue de l'obtention de diplôme
d'Ingénieur de l'E. S. P. A.
Spécialité : Géologie

**ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNEES
GEOLOGIQUES EN VUE D'ELABORATION DES
CARTES DES INDICES ET STRUCTURALES: CAS
DE LA REGION DE FORT DAUPHIN**

Soutenu publiquement le 31 Mars 2015

Par : RAHARO Pierre Albert

Devant les membres du jury :

- Président : M. MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques,
- Rapporteurs : M. ZOKIMILA Niainarivony Pierre,
M. RANDRIAMANANJARA Louis Hervé,
- Examineurs : Mme. RAHARIJAONA RAHARISON Léa Jacqueline,
M. RABARIMANANA Mamy.

Promotion 2013

REMERCIEMENTS

Malgré les différents types de difficultés qu'on a rencontré, l'élaboration de ce présent mémoire n'aurait été réalisée sans la bienveillance de notre Seigneur, l'autorisation de l'Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo et grâce à l'aide du Ministère auprès de la Présidence chargé des Mines et du Pétrole (MPMP) et de la société RIO TINTO QMM SA; c'est pourquoi nous tenons à présenter ici notre profonde et sincère gratitude et remerciement à:

Notre SEIGNEUR tout puissant qui nous a aidé beaucoup, en nous donnant la connaissance et la santé ;

Il n'aurait pu aussi voir le jour, sans le soutien infaillible de plusieurs personnes à qui j'exprime ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements. En particulier:

- ❖ Monsieur le Professeur **ANDRIANARY Philipe Antoine**, Directeur de l'ESPA, qui a contribué à notre formation durant les années que nous avons passée à l'école;
- ❖ Monsieur **RAKOTOMALALA Ny Fanja**, Président Directeur Général de la société Rio Tinto QMM, qui a bien voulu m'autoriser à effectuer des stages dans sa société ;
- ❖ Monsieur **RASOLONDRAZAO Lantsoa**, Hydrogéologue et Chef de Service Gestion Eaux et des Déchets au sein de la société Rio Tinto QMM, qui a accepté de m'avoir intégré en tant que stagiaire dans son Département;
- ❖ Monsieur **MANDIMBIHARISON Aurélien Jacques**, Enseignant Chercheur et Maître de conférences, Chef de Département de la filière Géologie à l'ESPA, qui m'a connu sur les bancs de l'école et qui, en dépit de ses multiples fonctions, a bien voulu présider ce jury de soutenance de mémoire;
- ❖ Madame **RAHARIJAONA RAHARISON Léa Jacqueline**, Enseignant Chercheur et Maître de conférences à l'ESPA, d'avoir consacré son temps et ses expériences pour me conseiller et qui a bien voulu juger ce travail;
- ❖ Monsieur **RABARIMANANA Mamy**, Enseignant Chercheur et Maître de conférences, Chef de Département de la filière Information Géographique et Foncière à l'ESPA, pour l'honneur que vous nous avez fait d'avoir bien voulu juger ce travail;
- ❖ Monsieur **RANDRIAMANANJARA Louis Hervé**, Enseignant à l'ESPA et chargé d'Etude au sein de la Direction d'Administration Minière au MPMP , pour les directives et conseils inestimables que vous nous avez donné pour mener à bien ce travail, et pour avoir répondu spontanément à notre sollicitude de faire partie des rapporteurs.

❖ Monsieur **ZOKIMILA Niainarivony Pierre**, Enseignant Chercheur à l'ESPA, pour l'honneur que vous m'avez accordé en acceptant de m'encadrer durant la réalisation de ce mémoire ;

❖ Mesdames et Messieurs les enseignants de l'ESPA et plus particulièrement aux enseignants du Département Géologie qui nous ont enseigné et partagé leurs connaissances. Ainsi que tout le personnel de la société Rio Tinto QMM, qui nous a bien reçu et nous a toujours aidé, soutenu, et conseillé durant notre stage ;

❖ Ma famille qui a veillé sur moi, m'a encouragé et m'a soutenu spirituellement et matériellement dans mon parcours d'études;

❖ Mes amis qui m'ont encouragé et participé à l'élaboration de ce travail.

SOMMAIRE

REMERCIEMENTS

SOMMAIRE

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

LISTE DES FIGURES

INTRODUCTION

PARTIE I: GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE I. MONOGRAPHIE DE LA REGION D'ETUDE

I.1. LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.2. GEOMORPHOLOGIE ET TOPOGRAPHIE

I.3. CLIMATOLOGIE

I.4. CADRE GEOLOGIQUE DE LA REGION

I.5. CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

CHAPITRE II. APERCU DU CADRE GEOLOGIQUE

II.1. GEOLOGIE DE MADAGASCAR

II.2. GEOLOGIE DU SUD DE MADAGASCAR

II.3. GEOLOGIE DE LA ZONE NO62

PARTIE II: MATERIELS ET METHODOLOGIES

CHAPITRE III. MATERIELS

III.1 LES LOGICIELS

III.2 LES DONNEES UTILISEES

CHAPITRE IV. METHODOLOGIE

IV.1. TRAITEMENT DES DONNEES GEOCHIMIQUES :

IV.2. METHODOLOGIE POUR LES TRAITEMENTS ET EXPLOITATION DES
DONNÉES DE LA TELEDETECTION

PARTIE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DU TRAITEMENT DES
DONNEES GEOCHIMIQUES

V.1. ANALYSE UNIVARIABLE

V.2. ANALYSE A VARIABLE MULTIPLE

V.3. LA CARTOGRAPHIE GEOCHIMIQUE (COURBE D'ISOTENEUR)

V.4. CARTE GEOLOGIQUE ET ELABORATION DES CARTES DES INDICES

VI.1. RESULTATS DU TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITALES DE « FORT
DAUPHIN » ET INTERPRETATIONS

VI.2. RESULTATS D'ANALYSE DE DONNEES AEROMAGNETIQUES

CONCLUSION GENERALE

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

ANNEXES

TABLE DES MATIERES

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

%: Pourcent

$\bar{X}$: Moyenne arithmétique

°: Degré

°C: Degré Celsius

μm : Micromètre

ADEMA: Aéroport De Madagascar

APFT: Association Professionnelle des Taxis de Fort-Dauphin

APMF: Agence Portuaire Marine et Fluvial

B: Bilan hydrique

BD: Base de Données

BPGRM: Bureau du Programme de Gouvernance des Ressources Minérales

C: Nombre de classe

Ce: Cérium

CHAPENAT: CHASSE PÊCHE NATURE

CHD: Centre Hospitalier de District

cm : Centimètre

CMT : Champ Magnétique Total

Cov(x,y): covariance

CSB: Centre de Santé de Base

Cu : Cuivre

E: East ou Est

ETM: Enhanced Thematic Mapper

FTM: Foibe Taosarin 'i Madagasikara

g/t: gramme par tonne

hab: habitant

Hg: Mercure

I: Intervalle

JICA: Japan International Cooperation Agency

JIRAMA: Jiro sy Rano MALAGASY

Km²: Kilomètre carré

La: Lanthane

LBR: Ligne -Bongolava- Ranotsara

m: mètre

Max : Maximum
M_G : Moyenne géométrique
Min: Minimum
mm: Millimètre
Mn: Manganèse
MPMP : Ministère auprès de la Présidence chargé des Mines et du Pétrole
Mo: Molybdène
N: North ou Nord
n°: Numéro
Nb: Niobium
Ni: Nickel
nT: nano Tesla
OIF: Optimum Index Factor
P : Précipitation
Pb: Plomb
PGRM : Projet pour la Gouvernance des Ressources Minérales
PH : Potentiel Hydrogène
PIR: Proche InfraRouge
ppm : Partie Par Million
QMM : Qit Madagascar Minéraux
S: South ou Sud
SA : Société Anonyme
Sb : Antimoine
SGED : Service Gestion Eaux et des Déchets
SIFOR: Société Industriel de Fort Dauphin
SPSM: Société des Plantations de Sisal du Mandrandré
SQC : Schiste Quartz Cipolin
SQD : Schiste Quartz Dolomitique
St: Saint
T°: Température
Te: Tellurium
TM: Thematic Mapper
U: Uranium
UTUFOR : Union des Transporteurs Urbains de Fort-Dauphin

V: Vanadium

W: West ou Ouest

W: Tungstène

Y: Yttrium

Zn: Zinc

σ : Ecart Type

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Répartition de la population dans la zone d'étude.	3
Tableau 2: Variation des températures moyennes et absolues pour une période de 10 ans.....	7
Tableau 3: Variation de la pluviométrie (P) et de l'évaporation (E).....	8
Tableau 4: Bilan hydrique (B).....	8
Tableau 5: Les principaux bassins hydrographiques de la sous-région.	10
Tableau 6: Résultats d'analyse des eaux de surface.	13
Tableau 7: Résultats d'analyse des eaux souterraines.	14
Tableau 8: Répartition spécifique de la faune régional.....	17
Tableau 9: Répartition spécifique et zonale de la faune.....	17
Tableau 10: Caractéristiques des bandes spectrales (Coulibaly, 1996)	46
Tableau 11: Classification des éléments selon Goldschmidt.	52
Tableau 12: Tableau Mn.	56
Tableau 13: Tableau Mo	57
Tableau 14: Tableau Pb.....	58
Tableau 15: Tableau Te.....	59
Tableau 16: Tableau W	60
Tableau 17: Tableau U	61
Tableau 18: Tableau Y	62
Tableau 19: Tableau Zn.....	63
Tableau 20: Variation des corrélations.....	65
Tableau 21: Caractéristiques des bandes spectrales.	67
Tableau 22: Classification des occupations du sol.....	72
Tableau 23: Tableau des paramètres statistiques des éléments.....	74
Tableau 24: Tableau des distributions des éléments.	74
Tableau 25: Tableau de corrélation des éléments.	75
Tableau 26: Tableau des couples en corrélation.	76
Tableau 27: facteur d'indice optimum à partir de toutes les combinaisons possibles des six bandes dans la région d'étude.	98
Tableau 28: Synthèse des résultats du calcul sous Matlab R2013a, montrant la distribution de l'orientation des linéaments de la carte linéamentaire (filtre 00°) obtenue par ArcGIS.	106
Tableau 29: direction des linéaments.	107

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Localisation de la zone d'étude (Source : BD 100, FTM)	4
Figure 2: Localisation Administrative de la zone d'étude (source : BD 100, FTM)	5
Figure 3: Réseaux hydrographiques de la zone d'étude (source : BD 100 et 500, FTM)	12
Figure 4: Carte d'occupation de sol de la Région d'étude.	15
Figure 5: Socle cristallin de Madagascar par H. Bésairie en 1948, (Source : H. Bésairie 2002- BD 500 FTM).	27
Figure 6: Socle cristallin de Madagascar par G. Hottin en 1973, (Source : Hottin 1793-BD 500 FTM).	30
Figure 7: socle cristallin de Madagascar par Collins 2006, (Source : Collins 2006- BD 500 FTM).	33
Figure 8: Socle cristallin de Madagascar par le PGRM 2008, (Source : BPGRM).	35
Figure 9: Carte de l'évolution des grands domaines de Madagascar.	36
Figure 10: Carte Géologique de la feuille NO62 (Source : Service Géologique).	44
Figure 11: Plan de masse des prélèvements géochimiques.	49
Figure 12: Organigramme résumant la méthodologie de l'étude.	51
Figure 13: Courbe d'anomalie en Mn.	56
Figure 14: Courbe d'anomalie en Mo.	57
Figure 15: Courbe d'anomalie en Pb.	58
Figure 16: Courbe d'anomalie en Te.	59
Figure 17: Courbe d'anomalie en W.	60
Figure 18: Courbe d'anomalie en U.	61
Figure 19: Courbe d'anomalie en Y.	62
Figure 20: Courbe d'anomalie en Zn.	63
Figure 21: Organigramme de traitement des données satellitaires.	66
Figure 22: corrélations entre les matrices des six bandes 1, 2, 3, 4,5 et 6 (correspondant respectivement aux méta-bandes ETM 7, 5, 4, 3,2 et ETM 1) et des écarts types standards absolus (Stdev), de la zone d'étude.	68
Figure 23: Organigramme de traitement des données aéromagnétiques.	71
Figure 24: Diagrammes binaires représentant couples d'éléments à corrélations très fortes. .	77
Figure 25: Diagrammes binaires représentant couples d'éléments à corrélations fortes.	78
Figure 26: Carte d'isoteneur en Manganèse.	80
Figure 27: Carte d'isoteneur Molybdène.	81
Figure 28: Carte d'isoteneur en Plomb.	82

Figure 29: Carte d'isoteneur en Tungstène.	83
Figure 30: Carte d'isoteneur en Uranium.	84
Figure 31: Carte d'isoteneur en Vanadium.	85
Figure 32: Carte d'isoteneur en Yttrium.	86
Figure 33: Carte d'isoteneur en Zinc.	87
Figure 34: Catre des indices en très forte corrélation.	91
Figure 35: Catre des indices en forte corrélation.	92
Figure 36: Carte des indices en Mn, Mo, Pb, W, U, V, Y et Zn.	93
Figure 37: Scène en couleurs naturelles (432RGB).	97
Figure 38: Discrimination lithologique en composition colorée 752 et 753 RGB.	99
Figure 39: Discrimination lithologique en composition colorée 754 RGB.	100
Figure 40: Image RGB obtenue avec les néobandes issues des rapports 5/2, 7/3 et 4/7.	102
Figure 41: Image RGB obtenue avec les néobandes issues des rapports 5/7, 5/1 et 5/4.	102
Figure 42: Différents filtres appliquées à la première composante principale CP1.	104
Figure 43: Carte linéamentaire au 1/100 000 de la région de Fort Dauphin (filtre directionnel 00°).	105
Figure 44: Rosace des directions des linéaments de la zone de Fort Dauphin.	108
Figure 45: Carte des anomalies du CMT ainsi que la carte du CMT après réduction au pôle, application du gradient vertical et du signal analytique.	112
Figure 46: Carte de signal Analytique.	112
Figure 47: Etude comparative de la CMT, carte géologique et l'indices en U, Pb, Y.	114
Figure 48: Nouvelle carte lithologique et carte linéamentaire.	116
Figure 49: Carte de synthèse des résultats géologiques, géochimiques, géophysiques et structurales.	118

INTRODUCTION

Madagascar est une île à forte potentialité minière selon la documentation et la carte géologique comportant des indices miniers.

Plusieurs auteurs ont effectués des recherches en vue de trouver de nouveaux indices surtout dans la partie Sud de Madagascar.

La cartographie lithologique et linéamentaire au 1/100 000^{ème}, réalisée à partir de la superposition des différentes images issues des traitements ont été confrontées à la carte géologique de BAZOT et al. (1972) et nous ont permis même d'apporter de nouvelles informations et différentes de celles déjà connues et de suggérer quelques rectifications à la carte géologique préexistante. [02]

A l'époque actuelle, disposons d'outil performant par des observations avec des détails, sous valeurs exploiter dans une approche plus conséquente en vue d'un champ d'investigation plus large, plus précis et pourquoi pas plus nourris en résultat. D'où le choix du thème : **« ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNEES GEOLOGIQUES EN VUE D'ELABORATION DES CARTES DES INDICES ET STRUCTURALES : CAS DE LA REGION DE FORT DAUPHIN ».**

Cette étude a aussi pour objectif de chercher des nouveaux indices à partir de données géologiques, géophysiques et géochimiques existantes.

Pour y parvenir, la cartographie associée à la télédétection et le SIG constitue un outil permettant de regrouper et informatiser les données géologiques et minières. Mais cet effort nécessite une actualisation régulière pour améliorer les informations et obtenir ainsi des données fiables et à jour, utilisant la technologie moderne.

Pour mieux cerner ce thème, on va développer dans trois principales parties : la première partie présentera les généralités de la zone d'étude et la connaissance sur la région de Fort Dauphin, le second donne les matériels et les méthodologies et enfin, la dernière partie se consacre sur les résultats des travaux effectués ainsi que leurs interprétations.

PARTIE I: GENERALITES

SUR LA ZONE D'ETUDE

CHAPITRE I. MONOGRAPHIE DE LA REGION D'ETUDE

I.1. LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE

I.1.1. LA REGION ANOSY

La Région Anosy (figure 1A) se situe sur l'extrême Sud-Est de Madagascar. Faisant éventuellement partie de la province de Toliara, elle est délimitée au Nord par les régions d'Atsimo-Atsinanana et d'Ihorombe, au Sud et à l'Est par l'Océan Indien et à l'Ouest par les régions d'Androy et d'Atsimo Andrefana. [9]

Elle s'étend géographiquement entre les longitudes 45°18' et 47°40' Est, les latitudes 22°67' et 25°20' Sud, sur une longueur maximale d'environ de 200 km (194 km de littoral), une largeur maximale d'environ 150 km et une superficie de 29 731 km². [9]

La Région Anosy (figure 1B) est constituée de trois districts : Amboasary-Atsimo, Betroka et Tolagnaro, de superficies respectives : 5 498 km², 10 173 km² et 14 060 km², 64 communes et 682 fokontany. Son chef-lieu est la ville de Tolagnaro, connue aussi sous son nom malgache Taolagnaro, située à l'extrémité Sud-Est de l'Île à environ 1 120 km de la Capitale d'Antananarivo.

I.1.2. LE DISTRICT DE TOLAGNARO

Le District de Tolagnaro (figure 1C), se situe entre 15 et 45m d'altitude par 49° de longitude Est et entre 24° et 25° de latitude Sud, est délimité au Nord par le district de Vangaindrano (ex-province de Fianarantsoa), à l'Est et au Sud par l'Océan Indien, au Nord-Ouest par le district de Betroka, et à l'Ouest par le district d'Amboasary-Atsimo. Sa superficie est de 5 498km², c'est-à-dire à peu près le cinquième de la superficie de la Région Anosy.

Elle est reliée à la capitale par la RN 7 et la RN 13 (Antananarivo - Ihosy - Betroka - Ambovombe - Fort Dauphin). Il est possible d'y parvenir en empruntant la RN 13 et la RN 10 partant de Toliara (Toliara - Betioky - Ampanihy - Beloha - Ambovombe - Fort Dauphin). Par ailleurs, grâce à la RN 12a, Tolagnaro entretient une liaison avec Vangaindrano qui se trouve dans la partie orientale de l'île. Cette route est malheureusement impraticable pendant les saisons pluvieuses. [9]

I.1.3. LA ZONE D'ETUDE (feuille NO62)

La feuille NO62 (figure 4) se trouve dans le District de Tolagnaro. Elle est constituée de sept communes : Tolagnaro (Fort Dauphin), Soanierana, Manambaro, Ifarantsa, Ampasy-Nahampoana, Mandromodromotra et Mandiso.

La zone d'étude est entourée au Nord par les Communes de Mahatalaky et Isakaivondro, à l'Est et au Sud par l'Océan Indien, au Sud-Ouest par la Commune de

Sarisambo, au Nord-Ouest par la Commune d'Ambatoabo et à l'Ouest par celle d'Ankaramena. Elle est composée de quarante-quatre (44) Fokontany (Tableau 1).

DISTRICT	COMMUNES	Nombre de Fokontany	Nombre d'habitants
Tolagnaro (Fort Dauphin)	Ampasy-Nahampoana	3	8 948
	Ifarantsa	4	13 057
	Manambaro	11	21 358
	Mandiso	6	4 994
	Mandromondromotra	3	5 983
	Soanierana	6	661
	Taolagnaro	11	63 784

Tableau 1: Répartition de la population dans la zone d'étude.

Source : Région Anosy, 2013

La répartition spatiale de la population est forte inégale, car il y a des localités très peuplées et d'autres sous peuplées. La densité moyenne de la population est de 2,11 hab / km². [9]

Les coordonnées géographiques de la zone d'étude (Figure 2) sont :

A : $x_1 = 24^{\circ}57'$ latitude Sud

$y_1 = 46^{\circ} 59'$ longitude Est

B : $x_2 = 24^{\circ}47'$ latitude Sud

$y_2 = 47^{\circ}11'$ longitude Est.

C : $x_3 = 25^{\circ}04'$ latitude Sud

$y_3 = 46^{\circ}51'$ longitude

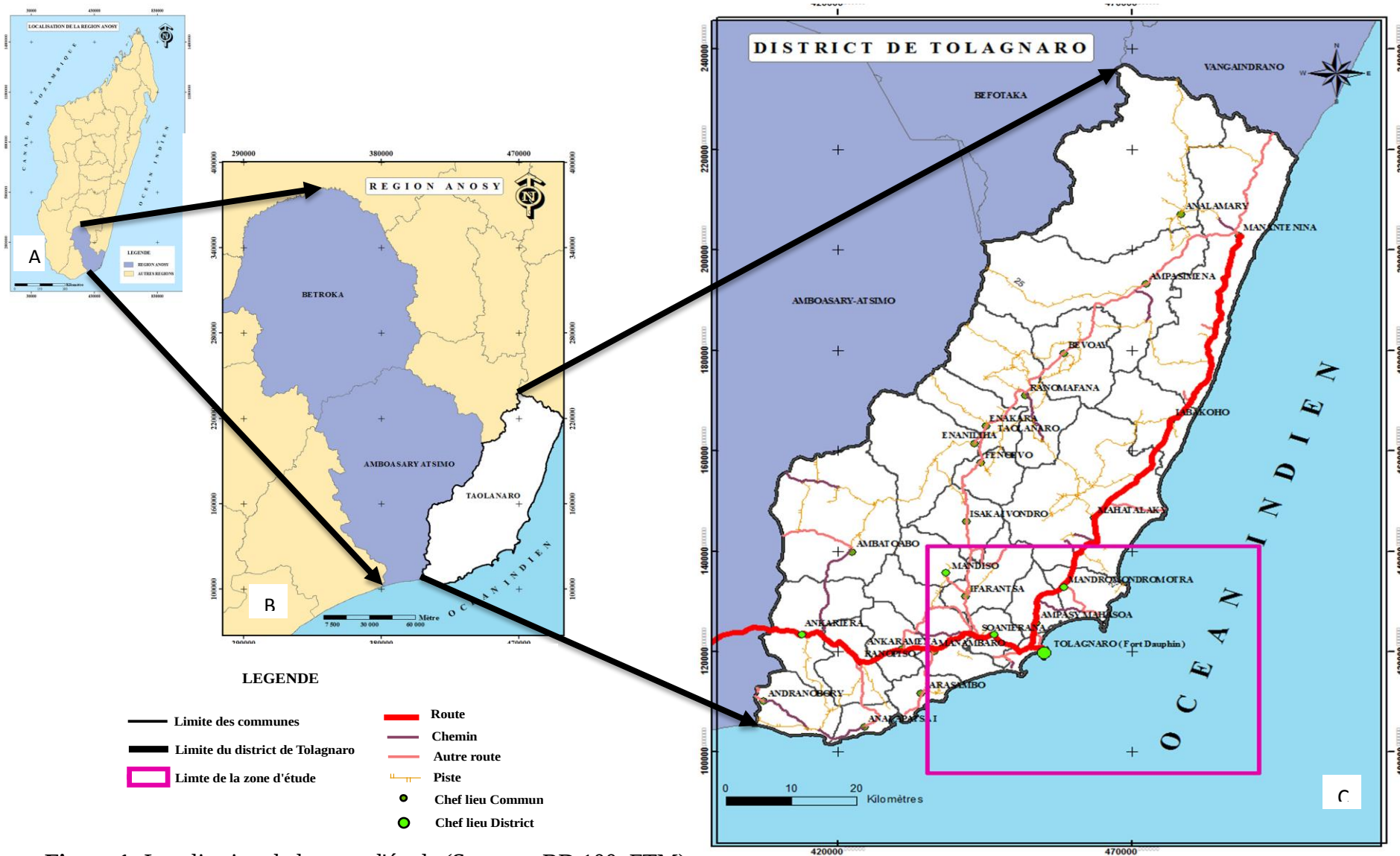


Figure 1: Localisation de la zone d'étude (Source : BD 100, FTM)



Figure 2: Localisation Administrative de la zone d'étude (source : BD 100, FTM)

I.2. GEOMORPHOLOGIE ET TOPOGRAPHIE

Etant située dans une littorale, cette zone d'étude épouse une géomorphologie pénéplanaire. [02]

A relief collinaire multiconvexe (pic de Saint-Louis) qui se trouve plus à l'intérieur de cette structure paysagique. [10]

Entre les dunes littorales essentiellement en forme de barkane et des massifs, la forme du relief est généralement plane. Ainsi, on peut affirmer qu'il s'agit d'un petit bassin littoral demi-fermé et ouvert vers l'Océan Indien. Il est à noter que des ressources limnologiques abondent dans cette zone. [06]

Il voudrait mieux procéder par unité géomorphologique :

- ✓ Le pic de Saint Louis culmine à 529m. C'est une localité charnière entre littoral et l'intérieur de cette contrée. Plus précisément, ce relief se trouve dans une plus ou moins grande échelle, dans une région dissymétrique.

- ✓ Littoral Est, l'altitude environ de 176m à 200m. Il s'agit notamment des sites de mandena et de Sainte-Luce.

- ✓ Littoral Sud, l'altitude 159m (Andraveza) à 3m au niveau des ressources limnologiques, cas du site de Petriky.

I.3. CLIMATOLOGIE

I.3.1. TEMPERATURE (T)

Dans une échelle décennale, la température moyenne annuelle est de l'ordre de 23°C où les extrêmes absolus sont 37,2°C pour le maximum et le minimum est de 9,0°C (Tableau 2).

Dans ce tableau, on a remarqué que l'écart absolu et la température moyenne annuelle sont sensiblement égaux sauf en 2007. L'écart absolu a été excédentaire à cause de la recrudescence des feux de brousse, l'accentuation de l'activité du courant marin froid sub-antarctique, et la sécheresse du vent polaire sud. [23]

I.3.2. PRECIPITATION (P)

Dans une échelle décennale, la précipitation moyenne annuelle est égale à 1 469,8mm. Cette précipitation est relativement variable, allant de 1 150mm à 1 950mm (Tableau 3).

I.3.3. EVAPORATION (E)

Dans une échelle décennale (2003-2012), en général, l'évaporation annuelle est supérieure à la précipitation annuelle. Ce qui implique que la région est hautement chaude (Tableau 4).

I.3.4. BILAN HYDRIQUE (B)

Ce bilan s'énonce par la différence entre la précipitation et l'évaporation. Il s'explique par la relation :

$$B=P-E$$

Le tableau 3 nous résume les différents paramètres y afférents.

Année T [°C]	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
T⁰. Max. Moyenne Mensuelle	31,2	30,2	29,4	32,4	31,6	30,6	29,7	30,8	31,3	31,3
T⁰. Min. Moyenne Mensuelle	16,0	16,9	15,7	16,1	14,1	15,5	17,4	16,5	15,4	16,0
Ecart Moyenne De T⁰	15,2	13,3	13,7	16,3	17,5	15,1	12,3	14,3	15,9	15,3
P. moyenne Annuelle	23,6	23,5	22,5	24,2	22,8	23,0	23,5	23,6	23,3	23,6
P. absolue Mensuelle	34,7	32,8	34,2	34,5	37,2	34,0	33,1	34,2	35,0	34,6
T⁰ Min. Absolue Mensuelle	11,6	11,8	9,3	11,4	9,0	10,8	12,5	11,8	10,7	10,8
Ecart Absolu De la T°	23,1	21,0	24,9	23,1	28,2	23,2	20,6	22,4	24,3	23,8

Tableau 2: Variation des températures moyennes et absolues pour une période de 10 ans.

Source : Météo, 2013.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012
P. Annuelle [mm]	1.532,7	1.930,2	1.370,4	1.157,2	1.503,4	1.328,3	1.842,0	1.426,6	1.302,4	1.304,6
E. Annuelle [mm]	1.732,9	1.593,9	1.615,9	1.899,4	1.820,4	1.853,2	1.599,3	1.409,5	1.806,0	1.648,9
P. max E.min	289,9 111,5	241,6 100,7	276,2 97,8	2306,5 94,3	372,3 31,8	298,5 104,4	332,0 80,5	293,9 46,0	242,81 116,61	375,4 115,2
P. min E.max	24,9 184,3	6,5 211,4	29,9 194,2	12,8 277,3	13,9 216,1	11,9 183,2	27,1 224,0	2,0 210,0	18,0 164,3	0,6 184,3

Tableau 3: Variation de la pluviométrie (**P**) et de l'évaporation (**E**).

Source : Météo, 2013.

	Précipitation (mm)	Evaporation (mm)	Bilan hydrique (mm)
Moyennes	1.489,8	1.897,9	- 228,1
P. max totale E. min totale	3.029,1	898,8	+ 2.130,3
P. min totale E. max totale	147,6	2.055,1	- 1.907,5

Tableau 4: Bilan hydrique (**B**)

Dans le tableau 4, on constate que le bilan hydrique moyen est négatif. L'évaporation est plus intense que la précipitation. Il s'agit donc d'une région chaude. Cependant, la précipitation maximale est supérieure à l'évaporation minimale.

Dans cette torsion thermique et isobarique, l'on assiste à une surélévation de l'évaporation par rapport à la précipitation dont la soustraction est négative.

D'une manière plus précise, le tableau suivant est conféré à apporter les différentes saisons dans cette zone. Elle a deux saisons bien distinctes :

- ✓ une longue saison sèche s'étend chaque année de Juin à Décembre;
- ✓ une saison d'été entre Janvier jusqu'à Mai (Précipitations supérieures à l'évaporation). Alors, il n'y a que 5 mois seulement qui sont destinées pour la saison culturale. (Tableau 4) (Voir en annexe 3 les détails des calculs).

I.3.5 - LE VENT

En général, l'ensemble de la côte Est de Madagascar est influencé en permanence par un vent dominant : l'alizé.

La région de Fort Dauphin est une zone très venteuse. La vitesse annuelle moyenne du vent à Tolagnaro se compris entre 18,6 et 23,8 km/h, avec une valeur moyenne de 20,7 km/h. Les mois d'Octobre et Novembre sont les mois les plus venteux de l'année, avec des vents soufflant à 24 km/h.

I.3.6. FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

Le bassin hydrographique est un ensemble des pentes inclinées vers un même cours d'eau et y déversent leurs eaux de ruissellement. Les bassins composites sont séparés par des lignes de partage des eaux ou des crêtes. Ces eaux s'écoulent vers l'exutoire.

Ainsi, les bassins hydrographiques de la sous-région et leurs principales caractéristiques (dépôts de sable, zones cultivées, lacs, cours d'eau) ont été inventoriés à l'aide des photographies aériennes et des images satellites.

Bassin	Cours d'eau	Superficie du bassin (km ²)	Secteur
Vatomena	Vatomena	177	Sainte Luce
Vatomiriny	Vatomirindry	185	
Bakika	Bakika	300	
	Ankarepobe		
Antorendrika	Antorendrika	111	
Mandromodromotra	Mandromodromotra	66	Mandena
Lanirano	Lanirano	94	
	Anondrano	94	
Andriambe	Andriambe	795	Petriky
	Maninibaro		

Tableau 5: Les principaux bassins hydrographiques de la sous-région.

Source: Service Gestion Eaux et des Déchets (SGED) Rio Tinto Q.M.M.SA, 2012.

Dans le cas du secteur de Mandena, le réseau hydrographique est inclus dans les deux bassins composites jointes par une nappe aquifère sableuse dans la partie sous-jacente. Les deux rivières : Lanirano et Mandromodromotra coulent respectivement dans les secteurs Ouest et Est. Ce sont des cours d'eau semi-pérenne dont la crue a lieu pendant la saison pluvieuse (Janvier-Mai). L'étiage se passe au cours de la saison sèche (Juin-Décembre) où le tarissement gagne du terrain. Ces rivières coulent en traversant l'aquifère et se jettent dans le lac Ambavarano.

Il est à préciser que le réseau hydrographique et l'aquifère sous-jacente dépendent de la nature de l'écoulement (endoréique et exoréique). La nappe phréatique se trouve sub-superficiellement près de la surface du sol. Cela est causé par la percolation verticale constante des débits de tarissement de rivières qui se jettent dans les lacs et mer bordière.

I.3.6.1. Bassin hydrographique de la rivière Lanirano

Ce bassin est composé par les trois rivières suivantes : Antsinoronoro, Anondrano et Lanirano qui se déversent dans le lac Lanirano par l'entrelacement complexe de chenaux interconnectés entre eux. Ce lac se communique avec celui d'Ambavarano par de chenaux ambigus.

I.3.6.2. Bassin hydrographique de la rivière Mandromodromotra

Cette rivière forme une lisière au Nord-Est de la concession de Mandena et de l'interface sable/roche mère. Ce cours se déverse dans le lac Ambavarano et ce dernier se débouche dans la mer bordière par le biais du ruisseau Anony au niveau de la pointe d'Evatra.

Selon la hauteur saisonnière de la rivière conjuguée par rapport au niveau piézométrique de la nappe phréatique de Mandena, la percolation peut s'effectuer dans un sens bien déterminé.

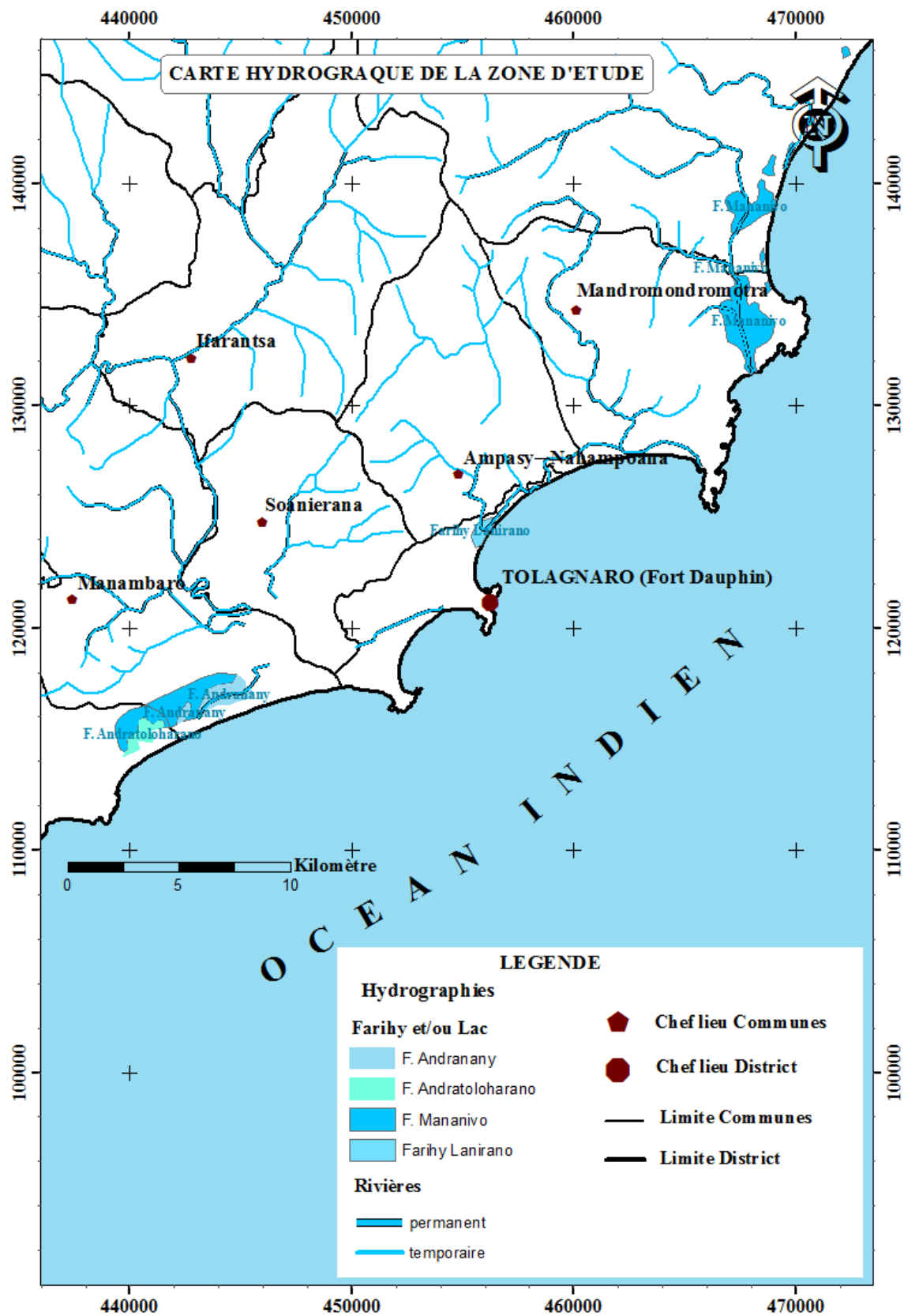


Figure 3: Réseaux hydrographiques de la zone d'étude (source : BD 100 et 500, FTM)

I.3.6.3. Qualité des eaux de surface

Les eaux de surface faisant l'objet d'un échantillonnage prélevé depuis les principaux cours d'eau et de ressource limnologiques ont été analysées sur place pour déterminer la proportion en nitrates et en phosphates, le pH, la conductivité et la turbidité.

Le tableau 6 résume les résultats d'analyse des eaux de surface. On constate que tous les échantillons d'eau de surface présentent une faible conductivité. La cause majeure de cette faiblesse est la moindre distance parcourue par la ressource hydrique située entre ses origines et son point d'émergence. A cette distance s'ajoute le caractère plus ou moins inerte de la roche et celui de sable rencontré durant l'écoulement.

Pour les chéneaux d'alimentation du Lac Ambavarano et la rivière Mandromodromotra, le paramètre profondeur influe sur la salinité et la turbidité. Ce dernier est assez faible conduisant ainsi à la teinte claire à brune foncée de la majorité des cours d'eau due à l'abondance des débris humiques charriés.

I.3.6.4. Qualité des eaux souterraines

Dans la zone de Mandena, les concentrations en nitrates sont inférieures à 0,5mg/l ce qui implique un équilibre entre production et la dégradation de l'azote. La conductivité est directement proportionnelle à la profondeur. Ce phénomène renforce l'existence d'un prisme d'eau salée dans la partie sous-jacente des dunes côtières.

Proportion				
Nitrates	Phosphates	PH	Conductivité uS/cm	Turbidité
Extrêmement faible	Extrêmement faible	4à7	Faible	Faible

Tableau 6: Résultats d'analyse des eaux de surface.

Source : Service Gestion Eau et des Déchets (SGED) Rio Tinto Q.M.M.SA, 2013.

Proportion				
Nitrates	Phosphates	PH	Conductivité uS/cm	Turbidité
>0,5mg /l	(0,18 à 3,7) mg/l	3,5 à 7	55 à 250	Très faible

Tableau 7: Résultats d'analyse des eaux souterraines.

Source : Service Gestion Eau et des Déchets (SGED) Rio Tinto Q.M.M. SA, 2013.

I.3.7. FLORES EXISTANTES

Comme ils se situent dans une contrée littorale, sur le plan biologique végétal, les 3 sites miniers énumérés auparavant sont dotés naturellement des espèces ligneuses étagées allant des herbacées jusqu'au gros arbre atteignant une vingtaine de mètre d'hauteur en passant par les arbustes. [17]

De par notre compilation bibliographique, il existe 542 espèces végétales cohabitant dans cette zone où 29 d'entre elles sont potentiellement endémiques dont 16 localisées dans les sites miniers et 13 inclues dans la zone de prospection. [23]

Les forêts littorales ne représentent qu'une petite partie de l'ensemble du couvert forestier de la région.

En outre, 5 espèces végétales natives de cette zone ont été répertoriées, à savoir: [17]

- ✓ Mahampy, utilisées dans la fabrication des paniers, nattes et des chapeaux;
- ✓ Ravinala madagascariensis se développant dans les zones arrosées, elles constituent une forêt secondaire et que leurs feuilles, troncs, sont utilisés à des fins de construction des cases en matières végétales;
- ✓ Vakaka et Vakabe (*Dypsis saint lucis*), une espèce de palmiers dans les forêts tropophile et ombrophile (qui aiment les chaleurs et l'humidité), leurs troncs sont nécessaires dans la construction du sous-bassement des maisons en pilotis ;
- ✓ Vahimpika (*Fiagellaria indica*), une sorte de liane dans les environnements forestiers utilisés dans la fabrication des cages à langoustes;
- ✓ Herbacées utilisées dans le pâturage des zébus.

I.3.8. CARTE D'OCCUPATION DU SOL DE LA REGION D'ETUDE:



Figure 4: Carte d'occupation de sol de la Région d'étude.

Sources: Carte topographique au 1/100 000 NO62 –BD 100 FTM – Données Satellite LandSat7 TM+ n°158/077 de 14 Décembre 2013.

LEGENDE

 Chef lieu Fokontany	 Rivière et Lac
 Chef lieu Commune	 Rizière
 Chef lieu District	 Forêt littorale
HYDROGRAPHIE	 Forêt dense
 Permanent	 Mosaïque de culture
 Temporaire	 Savane herbeuse
ROUTES	 Savane arborée
 Route Nationale	 Zone reboisée
 Route secondaire	
 Piste	

On note que la superficie de la savane arborée occupe la grande partie du terroir de la région d'étude. De plus, la mosaïque de culture occupe également une part assez importante dans l'occupation du sol. La forêt dense occupe la troisième place de l'occupation de sol de la région. La rizière prend aussi une grande partie de l'occupation du sol. En effet, plus de la moitié de la région est occupée par des cultures et qui contribue et favorise au développement socio – économique de la région. Les réseaux hydrographiques passent à travers la région et occupent une superficie de 8405,6 Ha, leurs rôles sont d'irriguer les zones cultivables au sein de la Région.

Enfin, la savane arborée et le mosaïque de culture occupent la plus part de la totalité de l'occupation du sol dans la région, ainsi que la forêt dense n'occupe que dans la partie centrale et un peu au Nord-Ouest. On se référant au différent résultats de la carte d'occupation du sol de chaque commune, on constate que la surface de la culture se trouve à la commune de : Mandiso, Ifarantsa, Soanierana, Manambaro et au Nord de Mandromondromotra sauf dans la commune Urbaine de Taolagnaro et dans la commune Rurale d'Ampasy-Nahampoana.

I.3.9. ESPECES ET HABITATS FAUNIQUES

On a répertorié dans la région Anosyenne quatre (04) catégories d'espèces sylvestriques dont la forêt littorale, la forêt des chaînes Vohimena et Anosyenne et la forêt sèche constituant au total 747 espèces réparties dans les quatre biotopes sous-citées (Tableau.8). [23]

	LITTORALE	VOHIMENA	ANOSYENNE	FORT SECHE
Reptiles	61	35	41	491
Amphibiens	22	29	49	5
Mammifères	23	23	25	13
Oiseaux	99	62	108	103
Totaux	205	149	223	170
Endémicité	2	6	10	1

Tableau 8: Répartition spécifique de la faune régional.

Source : Région Anosy, 2013

En particulier, dans la zone d'exploitation subdivisée en 3 sites, on a enregistré 391 espèces fauniques. La répartition des espèces qui y vivent est donnée dans le tableau ci-après :

	PETRIKY	MANDENA	STE LUCE
Oiseaux	59	60	100
Reptiles	33	32	28
Amphibiens	5	15	17
Mammifères	11	14	17

Tableau 9: Répartition spécifique et zonale de la faune.

Source : Service biodiversité Rio Tinto Q.M.M. SA, 2013

I.3.10. ECOSYSTEME AQUATIQUE

Le secteur de Mandena est composé de 3 types d'environnements aquatiques :

✓ l'environnement lacustre-fluvial tel que le lac Lanirano, les cours d'eau alimentant le bassin et la rivière Mandromodromotra. C'est une biocénose aquatique contenant une importante population de crevettes d'eau douce, des poissons arc en ciel de Madagascar (Vily bemaso). La végétation est constituée par une association symbiotique des typhonordorum et pandanus formant un palétuvier pour les pontes de ces espèces ichtyologiques. [23]

✓ L'environnement estuaire comme le bassin et le lac Ambavarano, la rivière Anony qui se débouchent dans la mer. Ces estuaires présentent une plus forte abondance de benthos zoo et phytoplanctons nécessaires à l'alimentation des poissons.

✓ L'environnement marin : la mer bordière près de la pointe d'Evatra présente une abondance intermédiaire pour les phytoplanctons, zooplanctons et la faune benthique.

Ils'agit d'une biodiversité terrestre, lacustre, fluviale et marine nécessitant une protection biologique par excellence.

I.4. CADRE GEOLOGIQUE DE LA REGION

L'histoire géologique de cette zone remonte à l'ère précambrienne. Cette ossature est constituée essentiellement par des métasédiments, gneiss à cordiérite et granite anosyen.

Au cours de l'ère tertiaire, on a assisté à la mise en place des sédiments terrigènes notamment les dépôts néogènes. Au pléistocène, différentes couches aréniques se sont déposées sur cette structure géologiques qui, de bas en haut peuvent être citées comme suit :

- ✓ Dunes Tantsimiennes
- ✓ Dunes karimboliennes
- ✓ Dunes flandriennes
- ✓ Sables blancs

Dû récemment aux phénomènes érosifs de l'ère quaternaire, aussi des alluvions se sont déposées sur ces strates en tant que substratum alluvionnaire et éluvionnaire.

Ces différentes couches sont aptes de générer de l'ilménite par processus transportuel des débris minéraux par la corrosion de la structure géologique sous-jacente avec leur constituants respectifs par des agents atmosphériques : éolien, hydrique, isobarique et la durée d'insolation. Il se crée paléoclimatiquement des phénomènes de dilatation et de contraction. Par percolation des eaux météoriques dans les fissurations, ces phénomènes conduisent au départ gravitaire des éléments chimiques surtout les cations bivalents : Mg^{2+} , Mn^{2+} , Fe^{2+} , Ca^{2+} , qui sont hydrolysables contre la persistance des cations bivalents et tétravalents (Fe^{3+} , Ni^{2+} ) qui sont

piégées dans les silicates et ainsi ils sont non hydrolysables. Ils sont oxydés par l'eau météorique et l'oxygène atmosphérique par hydrolyses. L'ajout de dioxyde de carbone (CO_2) donne naissance à l'acide carbonique (H_2CO_3) qui est un attaquant et engendrant ainsi une dégradation des particules entre elles.

L'ilménite, Zircon, le rutil et la monazite sont des minéraux présentant un intérêt économique. Ils représentent environ 85 % de la concentration totale en minéraux lourds. Le reste est constitué d'hercynite, de sillimanite, de spinelle magnésium-aluminium et des traces de grenat. [02]

Ces minéraux lourds sont perçus dans les alluvions. Ce sont des produits détritiques dérivant des roches mères (granites et charnockites issues de la chaîne Anosyenne). Les processus érosifs se manifestent par la transgression et par la régression de la mer du moyen Pléistocène. Ils se sont produits pendant l'ère interglaciaire de Riss- Wuin (150.000 à 80.000 ans avant notre ère). La transgression s'est faite en 2 étapes : [24]

- ✓ dépôt de l'argile dont la puissance est environ de 8m au-dessous du niveau actuel de la mer.

- ✓ Dépôt des sables fluvio-deltaïques.

A un stade ultérieur, le cordon littoral apparaît ; cette apparition a créé un ensemble avant dune et plage en progression vers la mer.

I.5. CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE

I.5.1. CONSTATATION DU MILIEU HUMAIN

I.5.1.1. Population et constat démographique

Dans un contexte global, la Région Anosy avec sa superficie de 29 731km² et le nombre communal de 64, abrite une population totale de 1.986.000. Pour le cas de District de Taolagnaro (Fort Dauphin), l'effectif total de la population est d'environ 217.492 habitants dont 78.700 habitants résident dans la ville. Le taux d'accroissement démographique est de 3.5% avec une densité comprise entre 42,9 et 47,2 habitants/km². (MONOGRAPHIE RÉGION ANOSY: CREAM, février 2013. Édition Août 2014).

I.5.1.2. Groupe ethnique de la population

La population dans la région de Tolagnaro est constituée par les groupes ethniques suivant : Antanosy, Antandroy, et Antaisaka. Simplement les groupes

éthiques prédominant est l'Antanosy: ces groupes se répartissent géographiquement comme suit:[09]

✓ Axe routier Mananatenina -Ranomafana -Ste Luce: la plupart de la population est l'Antaisaka ;

✓ Région centrale -Antanosy Sud et Sud-Ouest (c'est à dire Petriky et Ranompiso) occupées par les Antatsimo qui sont en majorités des Antanosy et Antandroy.

I.5.1.3. Activité culturelle

Comme nous avons énuméré plus haut la population est en grande partie formée d'Antanosy dans cette zone d'étude. Ce groupe pratique les traditions suivantes:

I.5.1.3.1. Culte des ancêtres

Le culte rituel funéraire tient une grande importance chez les Antanosy. Les tombeaux et leurs alentours font l'objet d'un respect sacro-saint. La culture Antanosy lie beaucoup sa croyance à son environnement.

I.5.1.3.2. Circoncision

La cérémonie pendant la circoncision est une grande festivité localement où le régime de patriarcat s'avère une règle de jeu.

I.5.1.4. Religions

Le district de Taolagnaro, plus peuplé (avec près de la moitié de la population de la Région), rassemble un peu plus de la moitié des édifices religieux de la Région ; on y retrouve notamment toutes les confessions pratiquées localement, à l'exception de l'église Anglicane (Source : Monographique de la Région Anosy, 2013).

I.5.1.5. Education et santé

Dans notre zone d'étude, le total des écoles publiques est de 43 parmi les 161 en niveau I, 4 parmi 8 en niveau II et une seule en niveau III. Tandis que le total des écoles privées est de 22 parmi les 39 dont 17 enseignent en niveau I, 3 en niveau II et 2 en niveau III.

Dans tout le District de Tolagnaro, il n'y a qu'un Lycée public d'enseignement général et deux lycées privés qui se situent dans la Commune urbaine de Fort Dauphin. Ce manque d'établissement scolaire pousse les futurs étudiants à migrer vers le chef-lieu de la Commune.

Le taux de scolarisation a été de 73% en 2010 dans lequel celui de la scolarisation féminine a atteint 30% à cette même année. Actuellement, ce taux diminue à cause de manque d'enseignants et le délabrement des bâtiments scolaires.

Concernant la santé, la région d'étude bénéficie d'une bonne couverture en formations sanitaires de base dans la mesure où toutes les 7 communes du district sont dotées

de CSB 2 et de maternités publiques et privés (dispensant des soins obstétricaux essentiels) et la commune urbaine de Fort Dauphin dispose de trois CHD (un publique et deux privés) et de trois unités de soins dentaires (un publique et deux privés). [09]

Les problèmes actuels sur la santé sont :

- ✓ prix des médicaments inaccessible pour toute la population
- ✓ bâtiments sanitaires insuffisants et délabrés
- ✓ manque de poste sanitaire, de personnels médicaux,

paramédicaux dans les zones rurales.

I.5.1.6 Approvisionnement en eau potable et en électricité

I.5.1.6.1. Eau potable

Le problème de l'eau potable se pose avec acuité, surtout en saison sèche. L'approvisionnement en eau est assuré essentiellement par le cours d'eau, le lac et les puits. Mais, ce mode de ménage d'adduction d'eau existant en ville de Tolagnaro est très faible, environ 3% des ménages de la JIRAMA. La Société Anonyme Rio Tinto QMM a également traité sa propre eau potable nécessaire à l'usine de production et les personnels. [20]

I.5.1.6.1. Electricité

La JIRAMA est le principal fournisseur d'électricité au sein du District de Tolagnaro et les trois (3) communes dont la commune de Mandromondromondra, la commune de Soanierana et la commune urbaine de Fort Dauphin. Mais à côté de la JIRAMA, la Société Anonyme Rio Tinto QMM a également installé sa propre centrale thermique pour produire l'électricité nécessaire à ses opérations, tout en distribuant une partie, la société Ambinintsoa Energie exploite une centrale thermique à Manambaro dans le district de Taolagnaro. Des communes rurales, telles qu'Ampasy-Nahampoana, Ifarantsa et Mandiso utilisent des groupes électrogènes pour la fourniture en électricité de leurs habitants. (Source : Région Anosy)

I.5.2. ACTIVITE DE LA POPULATION ET TYPE D'OCCUPATION DU SOL

I.5.2.1. L'agriculture

La commune urbaine de Fort-Dauphin est approvisionnée en produits agricoles par les communes environnantes : le riz provient de la vallée de Ranomafana située au Nord-Ouest de la commune ; les tubercules (manioc, patates douces,...) sont d'Ambovombe ; les produits maraîchers (brèdes) sont cultivés à Soanierana et Manatantely située respectivement à 12 et à 30 km à l'Ouest de la ville sur la Route Nationale 13. Quant aux fruits, c'est surtout Mandromodromotra située à environ 15km au Nord qui l'approvisionne la ville. On peut citer à titre d'exemples : banane, mangue, papaye et orange. [23]

I.5.2.2. L'élevage

Selon la législation urbaine, l'élevage en ville est interdit. Mais quelques foyers ne respectent pas cette règle et pratiquent un petit élevage contemplatif d'aviaire ou de chèvres.

Ceci permet d'ailleurs à certains d'avoir une occupation et de diminuer ainsi le taux de chômage. Depuis l'apparition de la peste porcine africaine, les porcs sont parqués et ne présentent plus une source de discorde entre les voisins. En matière de la viande de bœuf et de porc, la ville de Fort-Dauphin est approvisionnée par le marché des bœufs d'Ankaramena situé à 30 km à l'Ouest de la ville. Dans les années 60 et 70, la région de Fort-Dauphin exportait environ 12 000 zébus et 3 500 caprins par mois alors qu'actuellement le cheptel n'atteint même pas les 200 000 têtes. (**Source** : Commune Urbaine de Tolagnaro)

I.5.2.3. La Pêches

La pêche est la deuxième source alimentaire de revenu des habitants de la région de Fort-Dauphin. Elle est la capitale nationale de la langouste.

Pour ce qui est des espèces ichtyologiques, la région de l'Anosy en recèle plusieurs espèces dont le Thon blanc rayé (*Scomberomorus commersoni*), connu en anglais sous le nom de King Fish (Roi des poissons littéralement).

Les requins sont pêchés surtout pour leurs ailerons très prisés sur le marché international, sa chair en générale coûte bon marché. Quand la pêche à la langouste est fermée en période de fraie, le nombre de pêcheurs de requins augmente.

Diverses espèces de poissons exportables. Selon les données officielles pour la région de Fort-Dauphin, cela représente 2 à 3 % seulement de la production nationale. Cependant, les poissons dans la région de Fort-Dauphin sont d'une qualité exceptionnelle. En effet, 80 % de la collecte est exportable.

I.5.2.4. Le tourisme

Dans la région de Fort Dauphin, il existe de nombreux sites touristiques (Fort du Portugais, Pic St-Louis, Ste Luce, ...) L'activité touristique dans cette région est très importante car elle a valorisé et organisé rationnellement la génération d'emplois, de revenu et de l'entrée de devises. Mais il y a des problèmes au niveau des infrastructures (routières difficilement praticable, aéroportuaire délabré).

I.5.2.5. L'industrie de transformation et artisanat

Le secteur de l'industrie est encore peu développé à Tolagnaro même si on peut trouver quelques sociétés.

Autre que la société Rio Tinto QMM SA, cinq compagnies se partagent la production du sisal. Elles regroupent plus de 6000 employés, travaillant sur une superficie totale de 27 000

ha de plantation pour une production annuelle de 12 225 t. 90% de la production sont destinés à l'exportation et 10% à la vente locale. Deux sociétés transforment le sisal brut en ficelles et cordages, la Société Industrielle de Fort Dauphin (SIFOR) et la Société des Plantations de Sisal du Mandraré (SPSM), dont le siège est à Antananarivo. Par ailleurs, on peut localiser une huilerie et une industrie textile : SOMAHUILE et PRONATEX

A propos de l'artisanat, il s'agit surtout de la vannerie, tissage de chapeau, tissage du mahampy et du Vahimpiky (fabrication de case de langouste)

I.5.2.6. Bois, charbon de bois et la Tavy

Dans la région de Tolagnaro, l'accroissement de la population et la pauvreté favorisent le défrichement. L'augmentation de la consommation en bois de feu et de construction conduit à un appauvrissement des sols et par conséquent à une baisse de rendement.

I.5.3. LE TRANSPORT

I.5.3.1. Le transport terrestre

Le transport urbain est assuré par des taxis et des bus effectuant un circuit fermé au centre-ville. Deux coopératives gèrent les taxis pour avoir une meilleure organisation et améliorer le service offert aux clients, à savoir UTUFOR et APFT. Le mode de déplacement à deux roues est très développé. Le trafic national et régional est assuré par les plus importantes coopératives nationales de transports (taxis-brousse).

I.5.3.2 Le transport aérien

L'aéroport principal de Fort-Dauphin, de catégorie I se trouve à environ 5 Km au Sud de la ville. L'aérodrome peut accueillir des Boeing 737. Le trafic aérien avec Antananarivo est journalier tandis que celui avec l'île de la Réunion est hebdomadaire. C'est la compagnie aérienne Air Madagascar qui assure la liaison directe entre l'île de la Réunion et Fort-Dauphin. L'aéroport est géré par la société ADEMA. Il est à signaler que l'emplacement de l'aéroport, relativement proche de la ville, peut être un handicap dans quelques années vu l'extension de la ville vers dans ce sens. En outre, l'aéroport de Fort-Dauphin n'est pas assez équipé par rapport à l'enjeu touristique et la vocation internationale de cette infrastructure.

I.5.3.3. Le transport Maritime.

Outre l'APMF, il n'y a que quatre (04) entreprises qui assurent le transport: SHTM, CHAPENAT, SAFARI LAKA, ANKOBA. En moyenne, 5 bateaux de croisière avec 200 à 250 personnes à bord pour chaque navire, passent sur le port dans la baie Dauphine chaque année. Ce port est le premier port de Fort Dauphin. Et suite à la présence du nouveau port d'Ehoala, construit récemment suite à l'installation de Rio Tinto QMM, ce port de la baie Dauphine serait utilisé uniquement comme port de plaisance.

I.5.4. RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS

Dans la commune urbaine de Tolagnaro, on assiste à l'existence d'un grand progrès dans le domaine des télécommunications. Ceci est prouvé par l'existence des opérateurs téléphoniques comme : Orange mobile, Airtel mobile et Telma fixe et mobile.

I.5.5. INFORMATION ET COMMUNICATION

Les communications : Outre la radio Nationale Malagasy, quatre stations de radio privée émettent à Fort-Dauphin à savoir : Radio JOSVAH, Radio KALETA, radio LAFA et Radio Don Bosco. En matière d'audiovisuel, la télévision malagasy est le seul média audiovisuel existant.

La communication entre les communes rurales en dehors des réseaux mobiles se fait par BLU, malgré l'absence des lignes électriques. Pour l'éclairage de la partie du village minier du côté du jardin botanique, elle utilise un groupe électrogène.

CHAPITRE II. APERCU DU CADRE GEOLOGIQUE

II.1. GEOLOGIE DE MADAGASCAR

Madagascar est géologiquement constitué par un socle Précambrien qui occupe les Hautes Terres centrales et la bordure orientale. La bordure occidentale, représentant le tiers de sa superficie totale, est recouverte par des sédiments d'âge Phanérozoïque. [02]

II.1.1. EVOLUTION DES CONCEPTS GEOLOGIQUES DU SOCLE PRECAMBRIEN DE MADAGASCAR

Le socle est constitué par des formations cristallines d'âge précambrien, ayant subi plusieurs phases de métamorphisme, cependant des formations extrusives d'âge plus récent s'y sont intrudées. Mais la stratigraphie générale a fait, ces dernières années, l'objet de discussions pour les géologues ayant travaillé à Madagascar.

II.1.1.1. D'après Henri BESAIRIE (1948 et 1971)

D'après Henri BESAIRIE (1948 et modifié en 1971), le socle constitue un seul ensemble plissé et métamorphisé lors d'une orogénèse majeure autour de 2600 Ma, est divisé en trois grands systèmes superposés. [02]

✓ Le système Androyen,

C'est le plus ancien et se caractérise par son abondance en leptynites et est subdivisé en trois groupes :

- ❖ le groupe de Fort Dauphin (à la base),
- ❖ le groupe de Tranomaro
- ❖ le groupe d'Ampandradava au sommet.

✓ Le système du graphite

Occupant la plus grande partie du socle, on le rencontre de l'extrême Nord (Daraina – Milanoa) à l'extrême Sud (Ampanihy). Il se distingue par la fréquence du graphite au nord de la Ligne – Bongalava - Ranotsara, et par l'abondance des Leptynites à quartz aplati au sud. Il comprend : [20]

- ❖ le groupe d'Andriba au sommet
- ❖ le groupe d'Ambatolampy
- ❖ les migmatites, migmatites granitoïdes et granite du groupe de Manampotsy
- ❖ les leptynites du groupe d'Ampanihy à la base.
- ✓ Le système du Vohibory,

Il est marqué par l'abondance des formations amphiboliques et par la présence d'anciennes coulées basaltiques, transformées en ortho - amphibolites. Ces formations sont associées à des intrusions basiques et ultrabasiques plus ou moins métamorphisées. Ce système est subdivisé en cinq groupes : [20]

- ❖ le groupe de Vohibory (à leptynite et charnockite, il constitue le faciès type des formations - terminales du vieux Précambrien);
- ❖ le groupe de Beforona (Alaotra et Andriamena, constitué par des amphibolites et migmatites);
- ❖ le groupe de Maevatanana (schistes verts, gneiss, migmatites);
- ❖ le groupe d'Amborompotsy (migmatite, gneiss, micaschiste);
- la série Schisto- Quartzo- Calcaire/ Dolomitique (SQC ou SQD).

II.1.1.2. D'après G.HOTTIN (1976-1978)

De 1976 au 1978, les nouvelles données géochronologiques ont permis à G. HOTTIN d'apporter des modifications.

✓ Au nord de la Ligne- Bongolava- Ranotsara

Il a défini deux systèmes superposés

❖ Le système Antongilien à la base, caractérisé par des formations à dominance calcaïque est rencontré au niveau des sillons internes profonds (Katarchéen);

❖ le système Andriamena – Manampotsy, dans le niveau supérieur, est caractérisé par des formations silico - alumineuses et souvent graphiteuses, constitue les sillons externes et la bordure granitisée (correspondant à l'orogénèse Shamvaïenne autour de 2600 Ma).

Pour la répartition, dans la région centrale, le même auteur affirme que seul le dôme d'Ankazobe est susceptible d'appartenir au système Antongilien. [28]

Les faciès particuliers du groupe de Brickaville à hornblende et grenat, les Leptynites à grenat de l'Andribabe et les Leptynites hololeucocrates ou à grenat dans la région de Mandritsara sont des simples formations intercalaires dans le système supérieur Andriamena – Manampotsy. Enfin, G. HOTTIN a précisé que les deux systèmes s'organisent en rides anticlinoriales et synclinoriales, du moins au niveau des Hautes Terres.

✓ Au niveau de la Ligne- Bongolava- Ranotsara :

C'est un ensemble développé de part et d'autre de la LBR.

❖ la série SQC: épaisse séquence positive (quartz, micaschiste, cipolins dolomitiques) ;

❖ la série Amborompotsy– Ikalamovony : équivalent profond de la série SQC ;

❖ la série de Vohimena : un ensemble lithologique (à micaschistes alumineux souvent dominants avec une importante intercalation de quartz et de cipolins) très différencié mais se superpose à l'Ouest en concordance apparente aux gneiss d'Ikalamavony et au Sud sur le complexe ultra - métamorphique androyen. [28]

D'après G. HOTTIN, cet ensemble est attribué à l'orogénèse Kibarienne (antérieure à 1100 Ma).

✓ Au Sud de la Ligne- Bongolava- Ranotsara:

Sa modification se rapporte seulement sur le système Androyen défini par H. BESAIRIE (1948), en l'attribuant à un âge Protérozoïque inférieur (confirmé par M. VACHETTE dans la Géochronologie du Précambrien Malgache en 1977).

Pour les séries non datées de l'extrême sud-ouest (Ampanihy et Vohibory) comme pour celles de l'extrême Nord (Ambohipato et Daraina), il a conservé la classification de H. Bésairie.

L'histoire géologique de Madagascar montre un intérêt scientifique certain, les datations chronologiques sur les formations de la partie provenant de l'Est de l'île ont indiqué la présence de lambeaux de craton du Darwhar dans la partie orientale. En essayant de replacer Madagascar dans les cycles orogéniques d'âge Archéen et Protérozoïque décrits par de nombreux travaux antérieurs et récents permettrait d'avoir une meilleure de compréhension à partir de la tectonique des plaques. [28]

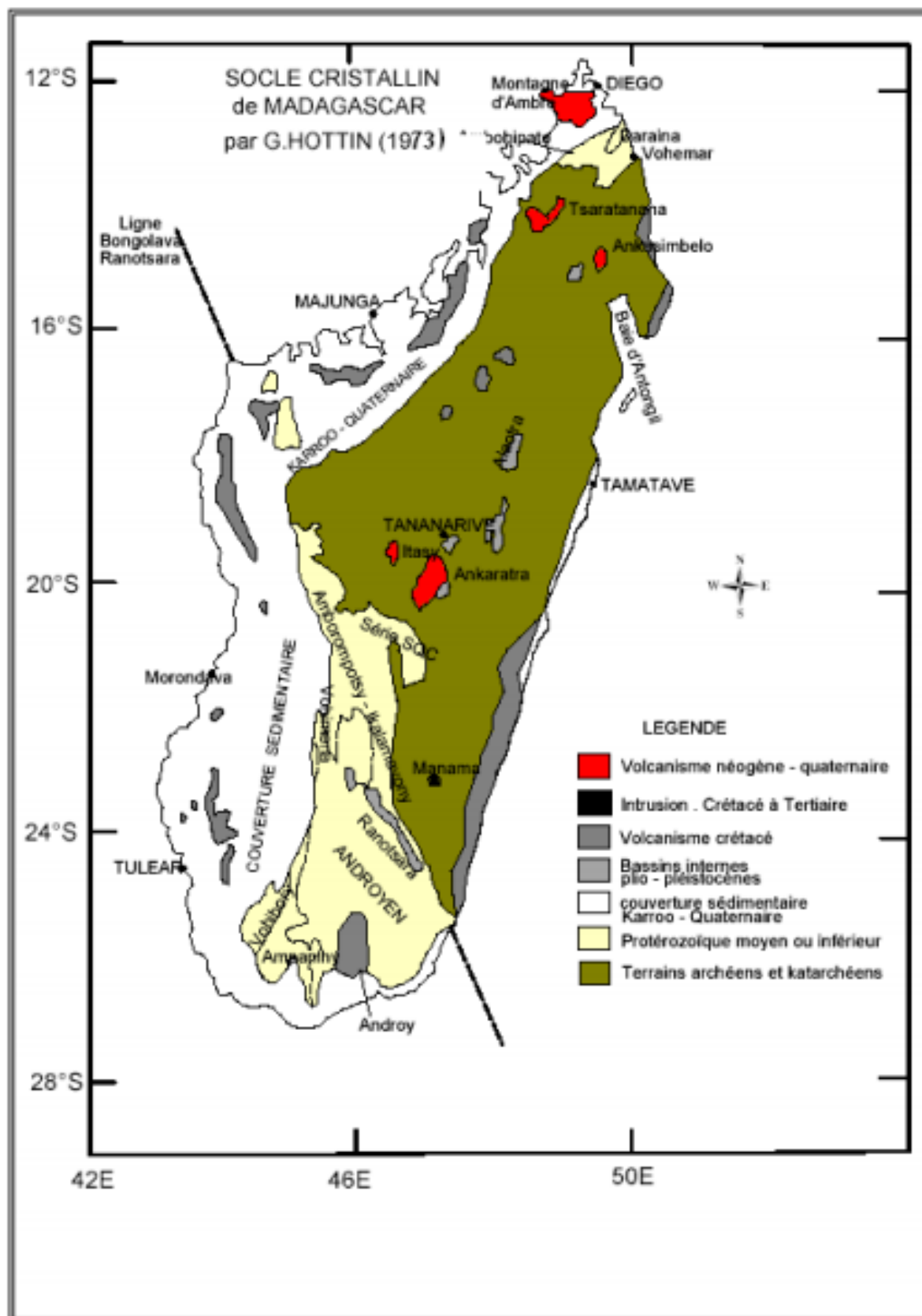


Figure 6: Socle cristallin de Madagascar par G. Hottin en 1973, (Source : Hottin 1793-BD 500 FTM).

II.1.1.3. D'après COLLINS A. et B. WINDLEY, 2000 et 2002

En utilisant comme base cartographique la carte établie par BESAIRIE en 1973 et les interprétations de HOTTIN publiées en 1976, ils ont assemblé les formations du socle en sept groupes tectono- métamorphiques.

✓ Le bloc d'Antongil

Ce sont les formations les plus anciennes de Madagascar, elles sont constituées par des ortho gneiss très déformés et des tonalites mis en place en 3,19 Ga. Elles sont affectées par une intrusion granitique c'est l'expression d'une phase orogénique pendant la période de 2,54 – 2,51 Ga. Ce granite n'est plus repris par le métamorphisme depuis environ 2,5 Ga et on remarque une similarité de ses roches et celles du craton de Dharwar en Inde.

✓ Le bloc d'Antananarivo

Il est composé par des roches ortho gneissiques mises en place vers 2,55 – 2,49 Ga, ceinturées par des roches plutoniques granitiques et gabbroïques de 820 – 720 Ma. Elles sont déformées et intrudées par des plutons et dykes granitiques (Ambatomiranty) d'âges 650 – 630 Ma et 561 – 530 Ma (syn- à tardi- tectonique du Pan Africain). Les déformations marquent la phase finale de la fermeture de l'océan Mozambique et la collision entre les cratons de Dharwar et Congo/Tanzanie/Bangweulu avec un faciès métamorphique amphibolite à granulite.

Dans cette unité, on remarque deux particularités structurales qui sont d'une part, la virgation de Tananarive (une inflexion générale vers l'Ouest) et d'autre part, le cisaillement de l'Angavo (structure verticale de direction Nord-Sud). Les formations sont caractérisées par la présence plus ou moins abondante du graphite.

✓ La suture de Betsimisaraka

La formation est caractérisée par des gneiss alumineux à graphite associés à des méta - ultrabasites. Elle est prise en sandwich entre les roches de 3,2 Ga à l'Est, et par les roches ayant subi des événements magmatiques de 820 – 720 Ma et 650 – 630 Ma situées à l'Ouest. Cette position lui confère une position orientale par rapport à l'arc magmatique entre l'Antongilien et le bloc d'Antananarivo (fermeture de l'océan Mozambique).

✓ La nappe de Tsaratanana

Elle est constituée par des roches ultramafiques et des roches méta sédimentaires reposant sur le bloc d'Antananarivo. La nappe forme quatre langues allongées Nord-Sud,

représentant chacune un axe synclinal, ce sont d'Ouest en Est: Maevatanana, Andriamena, Beforona- Alaotra, Androna. Elle est affectée par plusieurs phases intrusives :

- ❖ 2520 – 2490 Ma : intrusion granitoïdique et gabbroïque ;
- ❖ 790 – 780 Ma: intrusion gabbroïque et granitoïdique contemporaine avec un métamorphisme de haute température d'Andriamena ;
- ❖ 637 – 627 Ma: intrusion granitoïdique suivie d'une déformation à régime compressif transformant les roches préexistantes en gneiss ;
- ❖ 500 Ma: intrusion gabbroïque correspondant à la phase de pegmatitisation.

✓ La Nappe d'Itremo

Elle est localisée au centre de Madagascar, et formée par des roches méta sédimentaires (SQC) du Paléo Protérozoïque au Protérozoïque inférieur. Les roches sont plusieurs fois déformées, la phase terminale et visible se situant dans le faciès schiste vert, et recoupées par des intrusions d'âges différents qui sont :

- ❖ 800 – 790 Ma : Gabbro, syénite et granitoïde ;
- ❖ 580 – 530 Ma (Orogenèse Panafricaine) : Granite post- tectonique.

✓ La chaîne de Bemarivo

C'est un charriage localisé au Nord de Madagascar surmontant un ensemble déjà constitué du centre de l'île. La chaîne est constituée par des formations méta sédimentaires (granite et gneiss surmontés par des méta- volcaniques). Les événements qui l'ont affecté sont :

- ❖ 754 – 717 Ma : événement magmatique granitique ;
- ❖ 715 Ma : extrusion rhyolitique contemporain avec dépôt de grès et de conglomérats ;
- ❖ 520 – 510 Ma (phase finale de l'orogénèse Panafricaine) : déformation dans le faciès granulite.

✓ Domaine du Sud de Madagascar

C'est une grande zone de cisaillements anastomosés, verticaux et globalement orientés Nord-Sud, délimitée au Nord par la LBR. Le métamorphisme fin Né Protérozoïque au Cambrien (580 – 500 Ma: orogénèse Panafricaine) à faciès granulite a effacé toute trace d'évènement antérieur. Sur le plan lithologique, on a des métapélites, granites, amphibolites, quartzites, anorthosites et cipolins. [20]

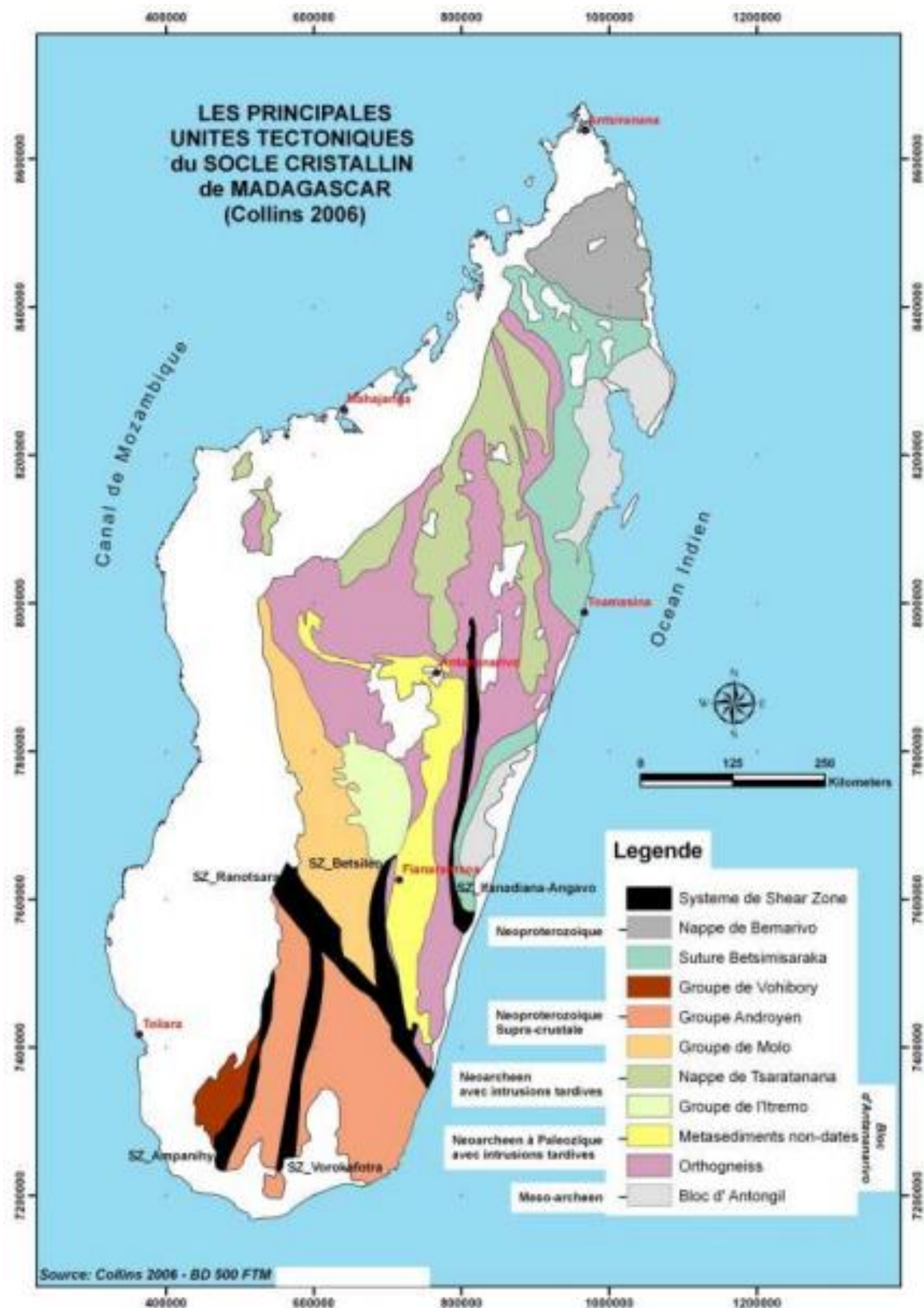


Figure 7: socle cristallin de Madagascar par Collins 2006, (Source : Collins 2006-BD 500 FTM).

Depuis 2003, le PGRM notamment, ROIG J.Y, TUCKER R.D, PETERS S.G. et ses collaborateurs, a réalisé une révision fondamentale de la géologie du précambrien. Ils ont utilisé la cartographie à deux échelles: 1/1000 000 et 1/500 000 ainsi que d'autres techniques modernes comme le SIG, la télédétection, pour compiler et réinterpréter les cartes géologiques existantes produites par le Service Géologique de Madagascar entre 1930 et 1975. [20]

En 2012, Madagascar a été classé en six domaines dont deux sont subdivisés en sous domaines et en trois nappes:

- ✓ Antongil-Masora ;
- ✓ Antananarivo(Tsaratanana) ;
- ✓ Vohibory ;
- ✓ Ikalamavony ;
- ✓ Andryen- Anosyen;
- ✓ Bemarivo ;
- ✓ Nappe de Bemarivo ;
- ✓ Nappe d'Itremo ;
- ✓ Nappe de Tsaratanana.

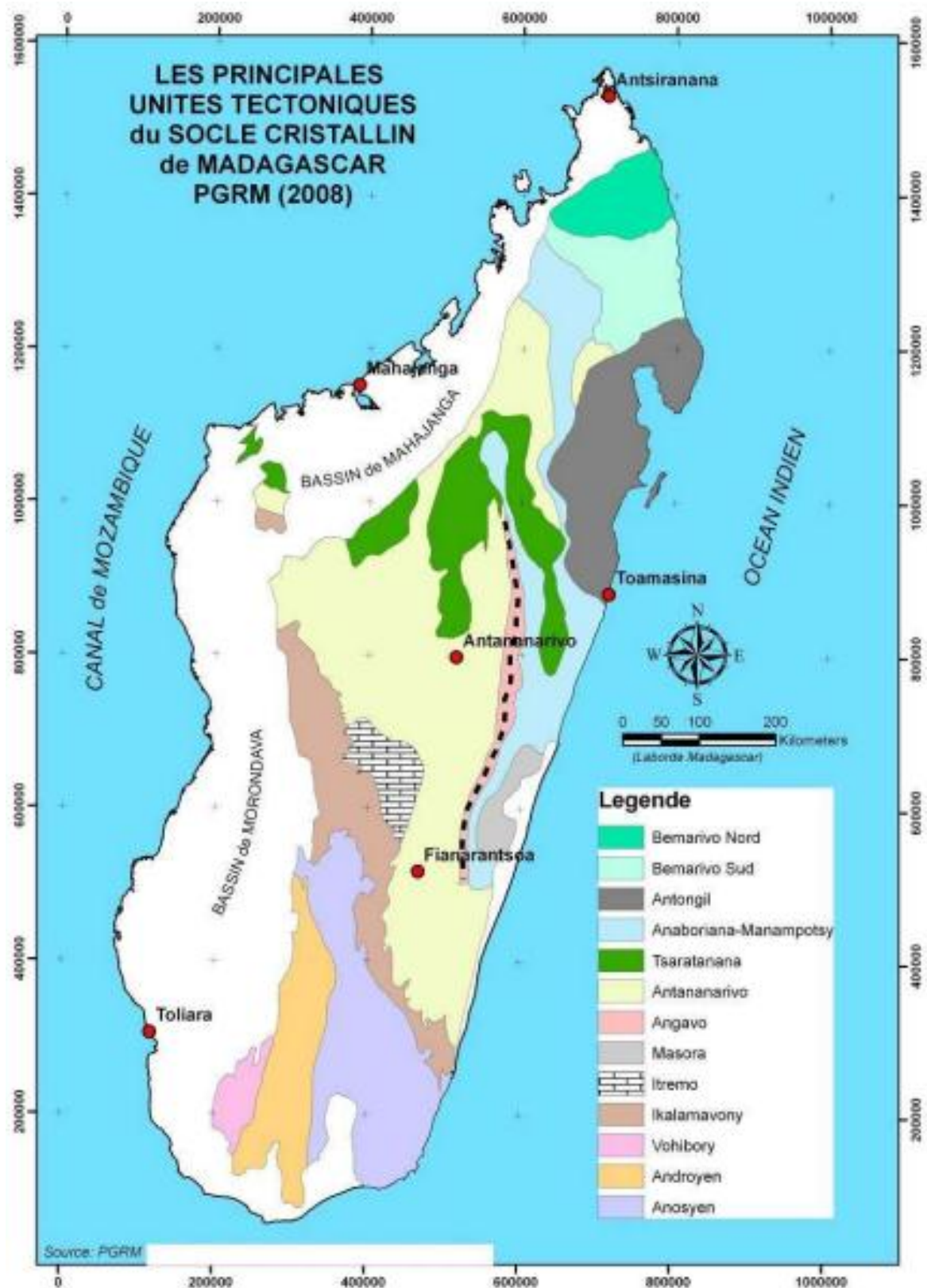


Figure 8: Socle cristallin de Madagascar par le PGRM 2008, (Source : BPGRM).

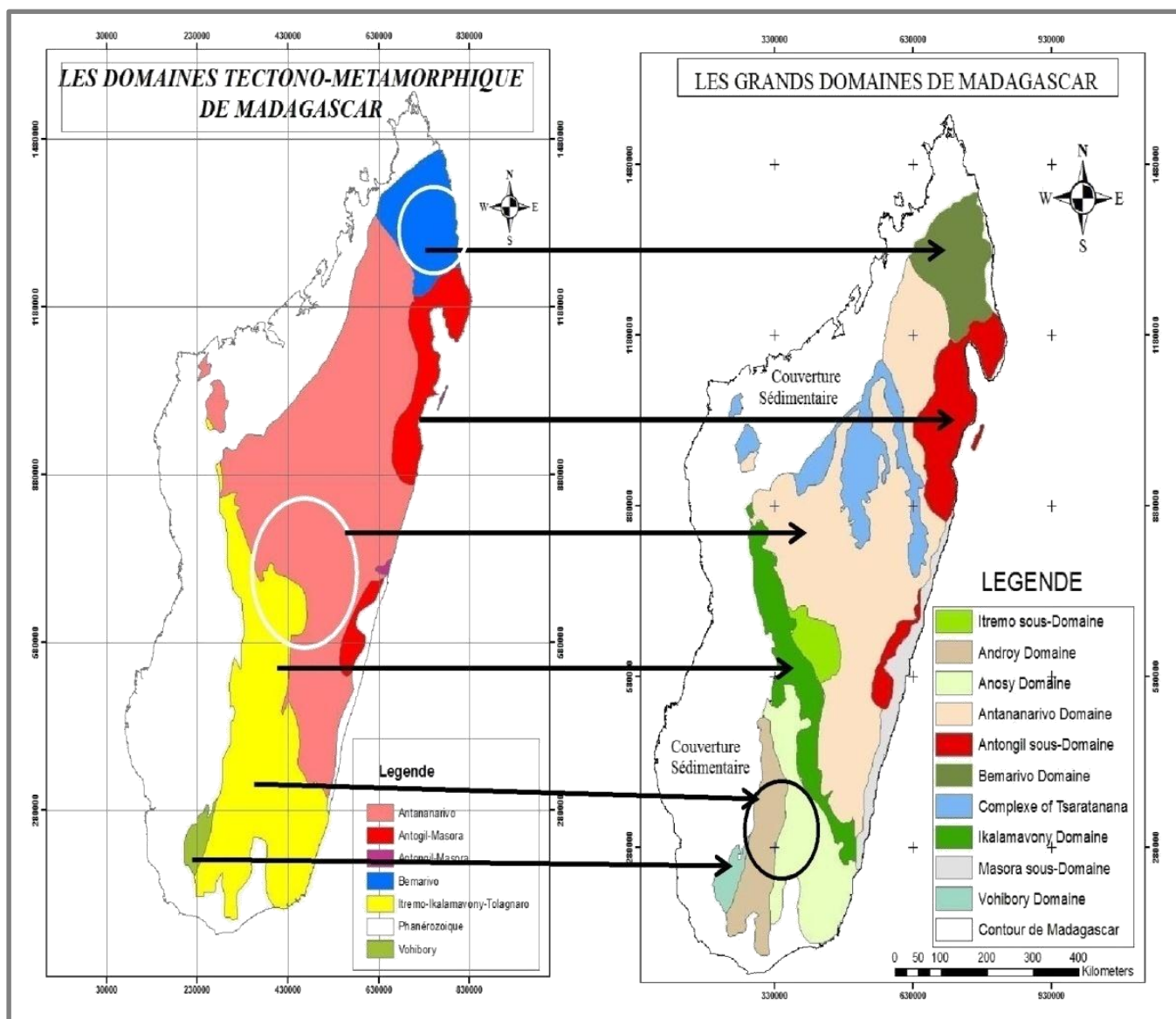


Figure 9: Carte de l'évolution des grands domaines de Madagascar.

Source : Direction de la Géologie, 2014

II.1.2. LA COUVERTURE SEDIMENTAIRE

Les bassins sédimentaires de l'île sont répartis de la manière suivante; Diégo, Majunga et Morondava dans la partie occidentale et la bordure orientale. Les formations sédimentaires sont stratigraphiquement divisées en deux grands groupes: le Karroo et le post-Karroo.

II.1.2.1. Le KARROO

Le Karroo est à prédominance continentale à lagunaire. Les formations sont successivement de bas en haut : Sakoa, Sakamena et Isalo. Leur âge va du Carbonifère supérieur au Jurassique inférieur. Elles reposent en discordance sur le socle

✓ Le Sakoa

Ce groupe d'âge Carbonifère supérieur au Permien moyen, se repose sur le groupe de Vohibory. Il comprend quatre séries superposées :

- ❖ La série glaciaire à la base : tillites et schistes ;
- ❖ La série houillère: grès, houilles, calcaires avec des flores caractéristiques les (Glossopteris et Gangamopteris) ;
- ❖ La série rouge : grès et argiles ;
- ❖ Le calcaire marin de Vohitolia à Productus, Spiriferin et à Stromatolites du Permien moyen dans la partie sommitale, marque la première incursion marine qui annonce la séparation de Madagascar avec l'Afrique.

✓ La Sakamena

Ce sont des dépôts d'âge Permien supérieur à Trias moyen, discordant sur le Sakoa et parfois sur le socle, dont la répartition dans les trois bassins n'est pas uniforme. On rencontre un faciès marin dans le bassin d'Ambilobe. On peut subdiviser la Sakamena comme le suit :

- ❖ Sakamena inférieure: alternance de schistes plus ou moins argileux et des grès micacés avec présence de fossiles de reptiles et de flores (dépôt lacustre);
- ❖ Sakamena moyenne: argile grise verdâtre à algues lacustres et de calcaire "cone-in-cone" (dépôt laguno-lacustre) ;
- ❖ Sakamena supérieure: grès, schistes, grès psammitique et d'argiles rouges (dépôt continental).

✓ L'Isalo (Dépôt Triasique moyen au Lias)

❖ L'Isalo I: (Entre Trias moyen et supérieur) formé de grès clairs, grossiers, souvent conglomératiques, mal cimentés ; c'est une méga structure à stratifications entrecroisées de type torrentiel ;

❖ L'Isalo II : (Rhétien – Pliensbachien), discordant sur l'Isalo I, formé par une alternance des couches puissantes ou de lentilles d'argilites rouges bigarrées et de grès clairs tendres à structure entrecroisée avec une abondance de bois silicifiés.

Remarque :

❖ L'Isalo III de Bésairie (Bajocien - Bathonien) est classé comme un pôle continental du faciès mixte du Jurassique moyen.

❖ Pour RAZAFIMBELO (1987), la Sakamena supérieure et l'Isalo I constituent la Makay I et l'Isalo II correspond à la Makay II.

II.1.2.2. Le POSTKARROO

Il rassemble les dépôts du Toarcien au Quaternaire.

✓ Le JURASSIQUE

Le Jurassique inférieur (Toarcien) affleure localement dans le bassin de Morondava, il est connu sous le nom de Calcaire d'Andafia. Dans les bassins de Majunga et d'Ambilobe, il est composé d'une série argilo-calcaire anoxique associée à des marnes à gypse. Les Ammonites sont les fossiles caractéristiques du Jurassique du bassin de Morondava et de Majunga. Tandis que dans le bassin d'Ambilobe, se sont les Spirifères. Le Jurassique moyen apparaît en discordance sur le terrain.

❖ Aalénien : intercalations de séries détritiques fines et de minces niveaux de calcaires ;

❖ Bajocien- Bathonien: premier dépôt de plateforme, c'est une série terrigène intercalée par des bancs de calcaires oolithiques.

Le Jurassique supérieur: série marneuse à gypse de néoformation enveloppant des éventails gréseux et enrichie en glauconie et en Ammonites.

✓ Le CRETACE

On a trois ensembles délimités par des événements géologiques :

- Le Néocomien (Berriasien à Barrémien) :



marnes et calcaires glauconieux dans la partie inférieure,

- ✚ grès marneux glauconieux à nodules de calcaires
- ✚ série argilo- gréso- marneuse à glauconie intercalée par des niveaux calcaires dans la partie supérieure.
- ✚ Le Crétacé moyen (Aptien à Turonien) :
- ✚ au niveau inférieur, formé par des séries gréseuses qui semblent remplir les fonds des paléo -vallées sous-marines
- ✚ au niveau supérieur constitué par des séries de turbidites et des barres sableuses déposées en milieu sublittoral.

Le Turonien - Coniacien (transition) est généralement formé par des séries de dépôts de décantation dans un milieu très calme, renfermant des lentilles gréseuses correspondant à des cônes de déjection de mer profonde.

- Le Sénonien (Santonien - Maastrichtien) se présente en lithologies variables selon les bassins :

- ❖ Dans le bassin d'Ambilobe :

- Santonien marno- gréseux à Ammonites,
- surmonté par un Campanien marno- crayeux ou marno- argileux à Echinides
- Maastrichtien gréso- sableux azoïque.

- ❖ Dans le bassin de Majunga :

- grès à stratifications entrecroisées à intercalations argileuses renfermant des ossements de dinosaures
- surmonté par des marnes à huîtres ou des calcaires marneux à Crania (dépôt des eaux profondes).

- ❖ Dans le bassin de Morondava : seul le Santonien affleure avec une succession des marnes, des calcaires argileux et des grès fins ou silts marneux à nodules ou concrétions calcaréo- gréseuses.

- ❖ Dans la côte Est : les premiers sédiments enregistrés dans cette partie sont datés au Turonien mais seuls le Campanien et le Maastrichtien affleurent avec une série gréseuse évoluant vers des marnes et marno- calcaires à Ammonites.

Le Crétacé a été le théâtre des principales manifestations magmatiques de Madagascar débutant par la mise en place des filons doléritiques et des roches subvolcaniques de l'Albo-Cénomaniens ainsi que les premières manifestations effusives, ignées de Madagascar : celle du Turonien, le basalte $\beta 1$ dans les bassins sédimentaires ouest, et celle du Campanien, le basalte

ß2 de la côte Est, (Bésairie, 1973). Ce sont des épisodes magmatiques qui correspondent à une tectonique en extension pendant la phase de séparation de Madagascar et de l'Inde. Les principales manifestations magmatiques du Crétacé ont été responsables, dans le cycle sédimentaire de Madagascar, du régime transgressif de l'Aptien au Turonien et du régime régressif du Santonien au Maastrichtien.

✓ Le TERTIARE

Il se subdivise en cinq unités lithostratigraphiques qui sont les suivantes :

- (i) Le Paléocène marin : série marno- calcaire à Globorotalia ;
- (ii) L'Eocène marneux régressif à Nummulites et Alvéolines ;
- (iii) L'Oligocène est marqué surtout par deux manifestations volcaniques.

❖ Reprise des manifestations volcaniques jusqu'au quaternaire dans l'Ankaratra, le massif d'Ambre, l'Ankaizina ;

❖ Intrusion sub-volcanique d'Ampasindava.

- (iv) Le Miocène : transgressif sur l'Oligocène avec un calcaire à Lepidocyclines;

(v) Le Pliocène continental : grès et argiles à bois silicifiés sans fossile animal, ce qui explique une régression.

Le Néogène a été le théâtre de :

❖ La formation du grabben de l'Alaotra, jalonné par quelques intrusions volcaniques et remblayé par les dépôts d'anciens lacs aujourd'hui en voie d'assèchement, répartis sur trois terrasses :

- terrasse supérieure : sables jaunes ;
- terrasse moyenne : grès et sables entrecroisés avec des lentilles d'argiles ;
- basse terrasse : alluvions récentes.

❖ La sédimentation lacustre à lignite et à schistes bitumineux d'Antanifotsy, de Sambaina et d'Antsirabe se déposant dans un fossé d'effondrement.

✓ Le QUATERNAIRE

La régression Pliocène est suivie d'une transgression qui a envahi la basse vallée allant de la Betsiboka jusqu'à Ambato Boeny. Une régression marine se poursuit jusqu'à l'époque actuelle. Dans les dépôts, on peut y trouver des faunes sub-fossiles comme les lémuriens, les

hippopotames nains, les petits carnivores, et les Aepyornis du Sud de l'île. On remarque aussi des dunes de sables qui marquent trois transgressions suivies chacune d'elles par des régressions. Ce sont les transgressions Tatsimienne, l'Karimbolienne et Flandrienne. Enfin, les manifestations volcaniques qui se sont déroulées au Tertiaire se poursuivent jusqu'au début du quaternaire et ont projeté divers matériels dans différentes régions :

❖ Au Nord :

- La montagne d'Ambre : Basaltes ;
- Les massifs de l'Ankaizina et de Tsaratanana : complexe volcanique à basalte, trachyte et phonolite ;

❖ Au centre :

- Le massif d'Itasy : trachytes, phonolites et des basanites ;
- Les massifs volcaniques d'Ankaratra et d'Antsirabe à trachyte, andésite, ankaratrite, phonolite et basanite.

II.2. GEOLOGIE DU SUD DE MADAGASCAR

La région au sud de la ligne Ranotsara correspond au Système Androyen de Besairie avec le groupe de base du système du graphite (groupe d'Ampanihy). Il est essentiellement formé de leucogneiss à quartz (leptynite) essentiellement para-dérivée du protérozoïque inférieur. Une intense migmatisation avec des foyers locaux plus ou moins importants de granitisation a affectée la partie sud de Madagascar au 750·Ma. A cet évènement est attribuée la formation des Chaines Anosyennes de nature migmatitique avec plusieurs individualisations de granite et de charnockite. Un gradient de pression a été établi d'Est (12kbars) en Ouest (4Kbars). Les assemblages minéraux sont anhydres dans la partie Est (les minéraux qui les composent sont cordiérites, ortho pyroxène, corindon et plagioclase basique) et évoluent vers la stabilité amphibole vers l'ouest. A cet évènement sont rapportées les anorthosites en intrusions annulaires. Un second événement de granitisation au 550 Ma a été à l'origine de la genèse de skarn à uranothorianite de Tranomaro.

Sur le plan lithologie, elle est caractérisée par une grande variété d'assemblages pétrographiques de formations archéennes et protérozoïques reprises par l'évènement pan africain (PILI et al. 1997).

L'essentiellement de leucogneiss à quartz avec des intercalations ferro-calco-

magnésiennes et calco-magnésiennes, métamorphisées dans le faciès amphibolite supérieur au faciès granulite (Windley et al. 1994) dans les conditions de basse et de moyenne pression à haute température (750-1000' à 3-11 kbar).

Les lithostratigraphies des six ceintures tectoniques sont données ci-dessous (Windley et al. 1994)

✓ **Vohibory:** constituée d'orthogneiss migmatitique à hornblende et biotite, paragneiss à biotite, grenat, hornblende, granite à diopside à l'intérieur duquel on trouve des couches de marbre et amphibolite avec minéralisation d'or et de cuivre. Beaucoup de lentilles de péridotites. faciès schiste vert à granulite.

✓ **Ampanihy:** gneiss à graphite altérée à biotite et/ou hornemblende, paragneiss, leptynite, amphibolite, granulite metabasique, diopsidite, marbre et quartzite, mylonites, absence de granites et migmatites. Des lentilles d'anorthosite et leuconorite.

✓ **Bekily:** paragneiss à biotite, hornblende, hypersthène, sillimanite, cordiérite et grenat. Quartzite, marbre, granulite basique à diopside et hypersthène, diopsidite avec beaucoup de minéralisation de phlogopite. Les migmatites sont rares. Des kilomètres de large de couches plissées de monzonite et de granite. Des lentilles d'anorthosites.

✓ **Betroka:** paragneiss à biotite, cordiérite, sillimanite et grenat), orthogneiss, des mètres d'épaisseurs de bancs de sillimanite et cordiérite (lazulite), gneiss à hypersthène, des marbres de dizaines de mètres de largeur (humite, phlogopite), une cinquantaine de mètres de diopsidite avec beaucoup de minéralisations de phlogopite. Hypersthénite locales, granulite basique à diopside hypersthène. 7 km de largeur de gneiss fortement plissées -couche de granite, sanidine cordiérite phlogopite et borosilicates, extensive mylonites sur 10m de long et gneiss ortho dérivée porphyroclastique. Subceintures séparée par des bandes de gneiss. Linéation subhorizontale. Plis isoclinaux.

✓ **Tranomaro** paragneis (biotite, grenat, cordiérite, sillimanite, diopside, hypersthène), orthogneiss (noyaux des granites homogènes), 15m de large de marbre (diopside, scapolite, fosterite, clinohumite, spinelle), quartzite, 50m de diamètres de diopsidite (scapolite, pl, wollastonite), scapolitite. Des couches contenant de borosilicates: grandidierite, serendibite et sinhalite. Absence de migmatites. Granite tardives non déformées. Beaucoup de minéralisations d'uranothorianite dans le diopsidite, marbre et orthogneiss (pas dans les granites tardifs).

✓ **Fort-Dauphin/Anosyen** paragneiss homogène (grenat, cordiérite, sillimanite, graphite), de petites quantités de quartzites et de phlogopite diopsidite, peu de plis mineurs, seulement des isoclines, hypersthène et grenats isogrades. De sombres veines à cordiérite et grenat. Zone de cisaillement avec grenat, biotite. Gneiss mylonitique avec structure granulitique. Gneiss à hypersthène (granulite) granite à hypersthène et grenat (charnockite).

Les formations géologiques peuvent être séparées entre eux par des zones de cisaillement et qui sont (i) un groupe de Vohibory (ceinture vohibory) constitué d'orthogneiss tonalitiques associés à des ultra- matites et des roches méta-volcaniques acides (ii) un groupe Androyen (les ceintures Ampanihy, Bekily et Betroka) formée de metapelite, des gneiss et quartzites a graphite, de l'anorthosite et meta-anorthosite exceptionnellement riche en manganèse et (iii) le groupe Anosyen avec des metapelites, calcisilicates, des roches volcano-clastiques acides et des granito-monzonitiques a aspects charnockitiques.

II.3. GEOLOGIE DE LA ZONE NO62.

Dans cette carte (Figure 10), la région étudiée est à la limite des affleurements Sud Est du socle cristallin malgache. On peut y séparer les formations suivantes :

- Formations Supérfitielles : alluvions, sables, latérite.
- Formations volcaniques récentes : plagioclases, Dolérite et roches à faciès diabasiques.
- Roches éruptives anciennes : granite et diorite quartzique
- Le socle métamorphique : les granites et charnockites des chaînes Anosyennes , les gneiss à pyroxène, pyroxénite et wernéritites conservés en septa représentent des relique des séries de Tranomaro ayant échappé à la granitisation).

LEGENDE

-  Chef lieu Communes
-  Chef lieu District
-  Lac et rivière

STRUCTURALES

-  Faille supposée ou marquée
-  Faille
-  Mylonite
-  Schistosité
-  Structure anticlinale
-  Structure synclinale
-  Pendages

LITHOLOGIQUES

-  Alluvions anciennes
-  Alluvions récentes
-  Couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites.
-  Couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite)
-  Couches de Tranomaro: Gneiss à pyroxène et cordiérite, pyroxénite
-  Granite calco- alcalin porphyroïde et charnockyte des chaînes anosyennes à septa de gneiss à biotite et amphibolites
-  Grès olistiques
-  Grès quaternaire à stratifications entrecroisées
-  Néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites
-  Sables dunaires et dépôts d'embouchure

Nous présenterons la carte numérisée à partir du logiciel « ArcGis ».

Dans cette carte, la série stratigraphique apparaît de la manière suivante. Sous les formations superficielles représentées par les alluvions, les sables dunaires et le néogène.

Les granites et Charnockites des chaînes anosyennes limités au Nord de Fort Dauphin, mais qui se développent plus largement sur les cartes limitrophes, Ranomafana et Ranopiso. Ils contiennent en septa de gneiss à amphibole rattachés aux couches de Ranomafana.

Les couches d'Antsokoamiary d'extension réduite sur la feuille de Fort Dauphin mais affleurent sur la bordure orientale de la Sud Est de Sainte Luce. [02]

Les couches de Fort Dauphin qui représentent de la majeure partie du socle qui affleure dans la région.

PARTIE II: MATERIELS ET METHODOLOGIES

CHAPITRE III. MATERIELS

III.1 LES LOGICIELS

✓ Les travaux de télédétection qui regroupent les différentes fonctionnalités relatives au traitement d'images, à la cartographie thématique ainsi que l'extraction de l'information souhaitée, ont été réalisés à l'aide du logiciel ENVI v.4.5 et le logiciel ERDAS 2011.

✓ Le logiciel ARCGIS v.10.1 a été utilisé pour la conception des cartes et le tracé des linéaments.

✓ Le logiciel SURFERv.9.11 a été utilisé pour l'élaboration des différentes cartes d'isoteneurs.

✓ Le logiciel rose net a servi au comptage automatique, la distribution et la production de rosace directionnelle des linéaments.

✓ L'analyse spatiale des données structurales a été effectuée sur OASIS MONTAJ v6.4 de Géosoft et pour le traitement magnétique.

✓ Le logiciel XLSTAT 2014 pour les études des corrélations des éléments.

✓ Le logiciel MATLAB R2013a a été utilisé pour le traçage des courbes d'anomalie des éléments.

III.2 LES DONNEES UTILISEES

III.2.1. DONNEES IMAGES

Les données de télédétection utilisées sont composées d'une scène ETM+ de Landsat-7 n° : 158-077 de 14 Décembre 2013. Cette scène complète de dimensions 185 km sur 185 km, est composée de sept bandes spectrales dont les caractéristiques sont représentées sur le tableau 5 suivant :

Bandes spectrales	Longueur d'ondes	Résolution spatiale (mètre)
TM1	0.45-0.52 μm (Bleu)	30
TM2	0.52-0.60 μm (Vert)	30
TM3	0.63-0.69 μm (Rouge)	30
TM4	0.76-0.90 μm (PIR)	30
TM5	1.55-1.75 μm (MIR)	30
TM6	10.4-12.5 μm (IR thermique)	60
TM7	2.08-2.35 μm (MIR)	30
TM8	0.52-0.90 μm (Panchromatique).	15

Tableau 10: Caractéristiques des bandes spectrales (Coulibaly, 1996)

Résolution au sol : 30 mètres pour TM1, TM2, TM3, TM4, TM5 et TM7, 15 m pour la bande panchromatique TM8 et 60 mètres pour TM6.

III.2.2. DONNEES CARTOGRAPHIQUES

III.2.2.1. Cartes géologiques et Cartes topographiques

La carte géologique N.O.62 a été utilisée dans ce travail. C'est une carte à l'échelle 1/100000^e et a été produite par le Service Géologique de Madagascar (1958).

La carte topographique, feuille N.O .62, à l'échelle de 1/100.000, éditée par la FTM en 1960 est accessible sous format raster avec la BD100. Elle est utilisée pour couvrir toute la zone d'étude.

III.2.2.2. Base de données 100 et 500

Ce sont des données numériques produites par la FTM.

La base de données 100et 500 mettent à la disposition des utilisateurs plusieurs couches telles que l'hydrographie, les aires protégés, les villages, les limites de: la Région, District et la Commune, les réseaux routiers, etc.

Et elles vont servir de supports supplémentaires pour la conception du SIG.

III.2.3 DONNEES GEOCHIMIQUES

L'étude est basée sur les résultats de travaux de terrains d'étude géochimique menée par des consultants: la Sumiko Ressources Exploration & Development Co., Ltd. and Nippon Koei Co., Ltd (SRED) et une équipe malgache composée de techniciens du Ministère des ressources minérales et stratégiques pendant les années 2004 et 2005. Cette étude entre dans le cadre d'une étude multidisciplinaire afin de réactualiser la carte géologique dans plusieurs zones de Madagascar.

✓ **Prélèvement des échantillons :**

Le nombre d'échantillons analysés étaient de 134. Les points de prélèvement d'échantillon de sédiment alluvionnaires seront en règle générale coïncidents avec des confluences de fleuve. A chaque point de prélèvement, deux points du coté ascendant du confluent seront choisis pour le prélèvement.

Dans ce cas-ci, on devrait considérer les points de prélèvement uniformément et avec impartialité répartis sur le secteur d'étude entier autant que possible. Généralement, les échantillons ont été prélevés dans un ruisseau du 2^{ème} ou 3^{ème} ordre selon la méthode de Stralher's (Johnson, C.C, Ridgway. J, 2004) (voir annexe 4).

Les sédiments étaient tamisés à l'aide de tamis manuels avec mailles de 1 mm de diamètres pour recueillir les grains fins de 100g ou plus. Chaque échantillon ainsi prélevé était ensuite séché à l'air et envoyé au laboratoire.

Les taux des éléments ont été déduits par méthode ICP tandis que la plus part des éléments a été déduit par méthode de fusion S.I.E.

Les éléments cibles que nous allons étudier ici sont au nombre de 17 : Sb, Ce, Cu, Hg, La, Mn, Mo, Ni, Nb, Pb, S, Te, U, V, W, Y, Zn.

Cependant, pour éviter d'encombrer la carte d'anomalie, on a décidé de représenter au maximum six anomalies d'éléments sur une carte.

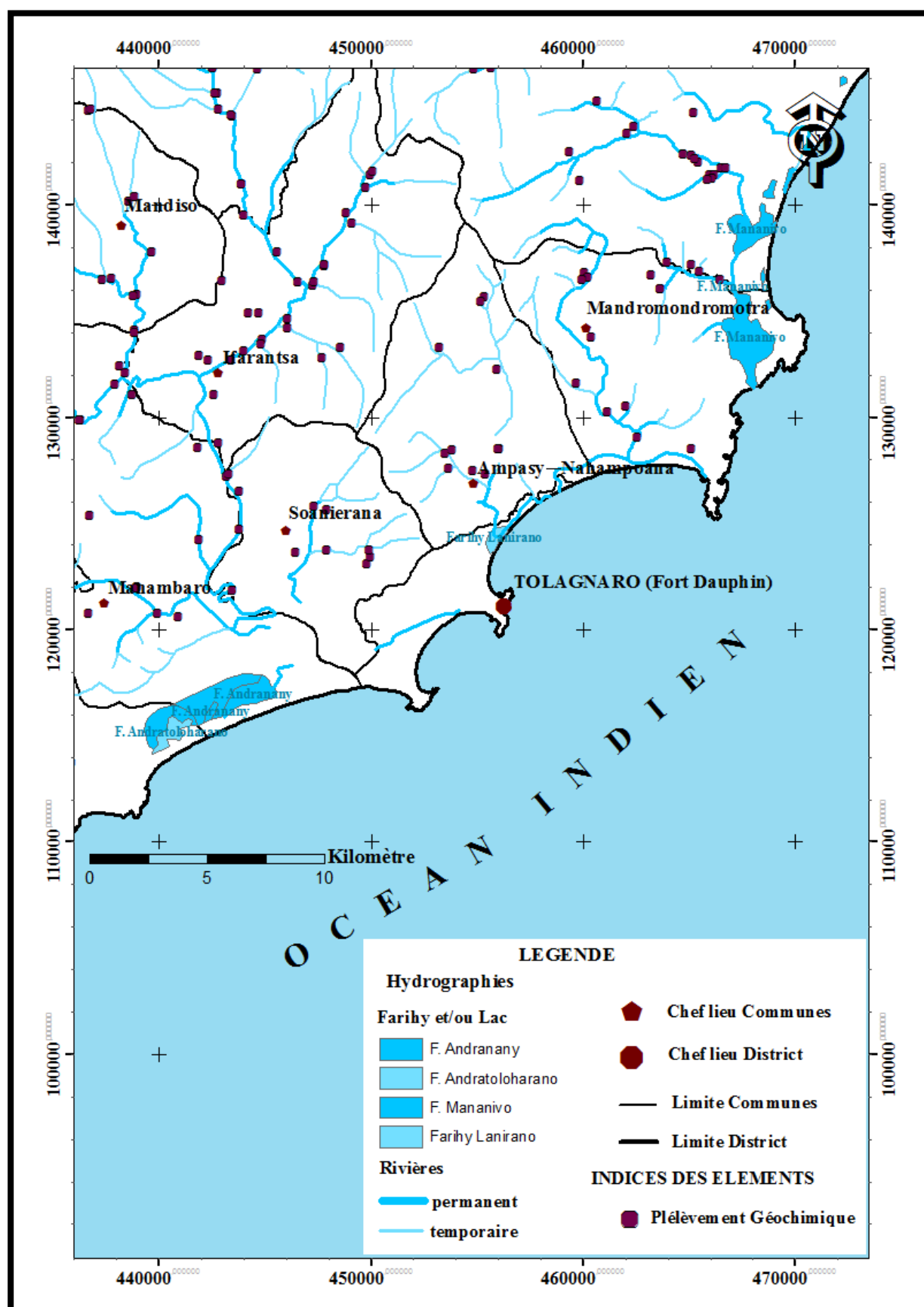


Figure 11: Plan de masse des prélèvements géochimiques.

III.2.4. DONNEES GEOPHYSIQUES

III.2.4.1. Données de télédétection

Ce que nous allons étudier dans l'analyse structurale est principalement l'orientation des linéaments afin de trouver une quelconque corrélation entre les résultats ainsi que les contrôles de minéralisations. Notre méthode consiste essentiellement à :

- ✓ extraire les failles et traits structuraux à partir de l'image satellite
- ✓ dresser une carte structurale
- ✓ Analyse statistique des linéaments à l'aide de rosace directionnelle, puis détermination de direction majeure de linéaments.

III.2.4.2. Données magnétique

Les données utilisées lors de ce travail fait partie d'une campagne de prospection géophysique financée par la Banque mondiale pour le compte du BPGRM en 2005. Les paramètres géophysiques mesurées étaient le champ ferromagnétique et la radiation gamma. Ces paramètres étaient obtenus en survolant la zone à une altitude constante de $\pm 200\text{m}$ avec lignes de vol de direction E-W et avec espacement de 500m et N-S espacées de 10km. Les lignes de vol EW étaient en accordance avec la tendance géologique Nord-Sud de la région. Nous avons utilisé les données brutes aéromagnétiques, donnée par le service des bases de données du Ministère de l'Energie et des Mines.

Le montage des grilles (gridding) et les autres traitements étaient faits à l'aide de logiciel Oasis montaj version 6.4.2 de Geosoft. Les transformations que nous avons appliquées sont : Réduction au pôle, Gradient vertical et signal analytique.

CHAPITRE IV. METHODOLOGIE

La méthode d'approche utilisée donc consiste en premier lieu à collecter des données relatives aux thèmes de ce mémoire ; viennent ensuite l'analyse, la combinaison et la numérisation de certaines données et enfin des applications numériques permettant de définir des nouvelles données.

L'organigramme ci-dessous résume les travaux effectués :

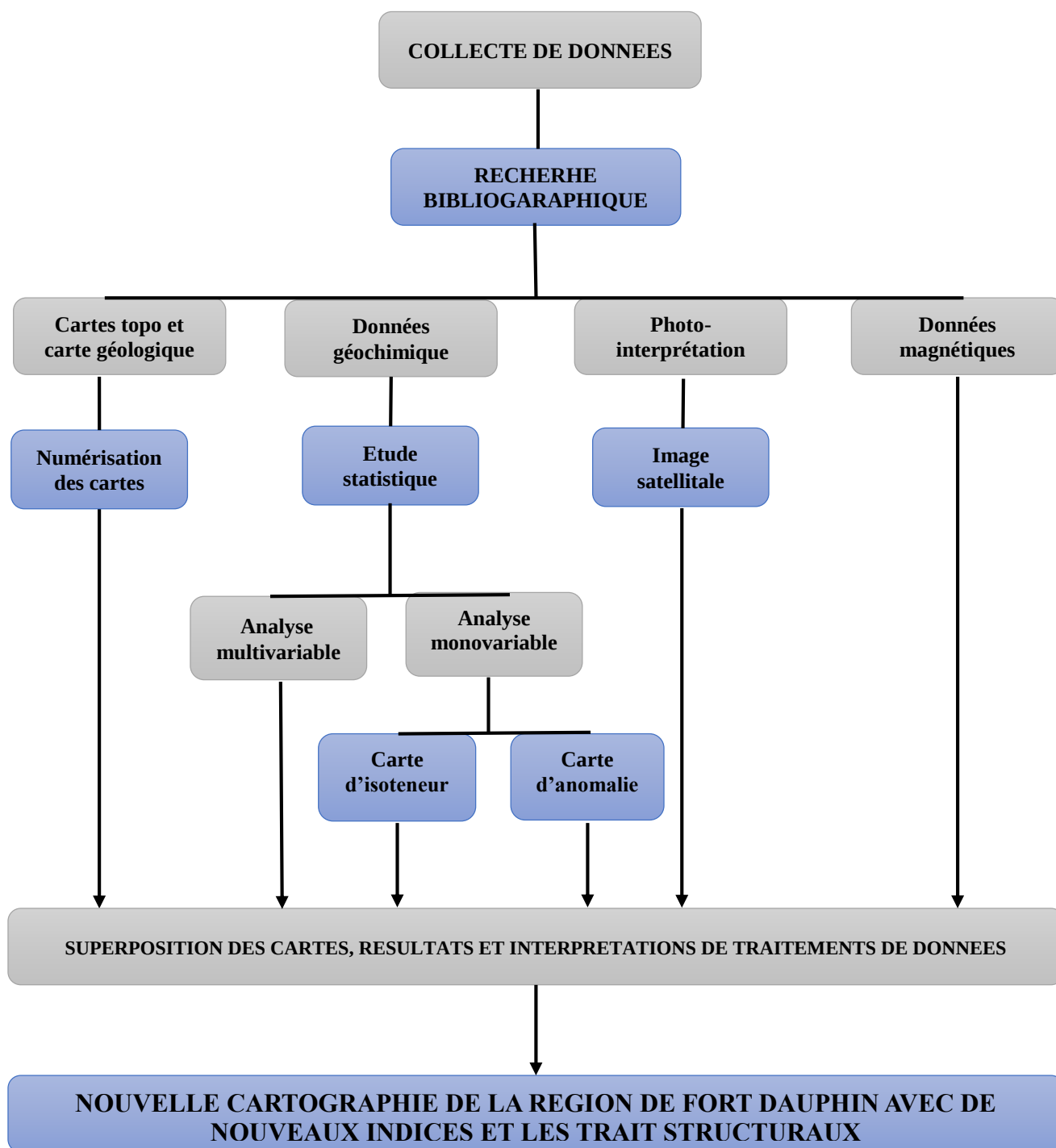


Figure 12: Organigramme résumant la méthodologie de l'étude.

IV.1. TRAITEMENT DES DONNEES GEOCHIMIQUES :

Pour le traitement des données géochimiques, l'utilisation des méthodes statistiques à l'aide de l'outil informatique est d'un apport considérable. Le développement des logiciels permet non seulement l'efficacité dans le traitement des données, mais aussi le gain en précision et temps.

Les éléments chimiques sont subdivisés en trois groupes :

- ❖ Les éléments majeurs : éléments à forte teneur dans les roches ;
- ❖ Les éléments mineurs : éléments ayant une teneur relativement faible ;
- ❖ Les éléments en trace : éléments à concentration inférieure à 0.1 ppm.

D'après Goldschmidt, ces éléments sont classifiés selon leurs affinités relatives pour des éléments de références :

- Les éléments chalcophiles : éléments qui ont une affinité avec le soufre ;
- Les éléments sidérophiles : éléments ayant une affinité pour le fer ;
- Les éléments lithophiles : éléments qui ont une affinité avec les silicates.

Le tableau 1 ci-dessous indique le classement des éléments chimiques :

Chalcophiles	Lithophiles	Sidérophiles
Pb, Zn, Ag, Sb, Cd, Cu.	Mg, Al, Na, Ca, K, Sc, U, Th, V, Nb, Zr, Y, Ce, Mn, Ta, Li, La, Cr, Ba, Rb, W, Ti.	Fe, Au, Ni, Co, Pd, Pt, Sn, Mo.

Tableau 11: Classification des éléments selon Goldschmidt.

Dans notre traitement statistique des données, l'analyse porte sur Dix-sept éléments tels que : Sb, Ce, Cu, La, Mn, Hg, Mo, Ni, Nb, Pb, S, Te, W, U, V, Y, Zn.

On a choisi ces éléments en fonction de la demande du ministère pour d'éventuels prospections dans la zone et de la nature lithologique de la région.

Nous avons utilisé les logiciels suivants :

- ❖ Excel, pour la saisie des résultats des analyses chimiques ;
- ❖ Xlstat pour le traitement monovarié et multivarié ;
- ❖ Matlab pour le traçage des courbes d'anomalie

- ❖ Surfer v 9.11 pour la carte d'isoteneur.

IV.1.1. Analyse univariable

Dans le but de déterminer certains paramètres statistiques tels que la moyenne arithmétique et géométrique, l'écart -type, etc. le traitement monovariable est le moyen le plus adéquat pour aboutir aux meilleurs résultats, car elle permet de synthétiser par les calculs et graphiquement les caractéristiques de la distribution de la variable (élément chimique).

Les paramètres statistiques :

- ❖ Moyenne arithmétique ($\bar{X}$) ;

$$\bar{X} = \frac{X_1 + X_2 + \dots + X_n}{n} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

- ❖ Moyenne géométrique (M_G) : la moyenne géométrique est la valeur la plus probable dans une distribution lognormale, elle permet d'estimer la teneur du fond géochimique des éléments analysés;

- ❖ Ecart-type (σ) : elle intervient dans le calcul du seuil d'anomalie.

$$\sigma := \sqrt{\sum_{i=1}^n p_i (x_i - \bar{x})^2} = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n p_i x_i^2 \right) - \bar{x}^2}$$

- **Distribution des éléments**

Pour pouvoir connaître la distribution des éléments à étudier, des tests ont été appliqués :

Si $\bar{X}/M_G \geq 1$ la distribution suit une loi lognormale

Si $\bar{X}/M_G = 1$ la distribution suit une loi normale

Où $\bar{X}$: la moyenne arithmétique

M_G : la moyenne géométrique

Le tableau 12 ci-après montre ces différents paramètres statistiques.

Et la formule : $\bar{X} - 2\sigma$

Si $\bar{X} - 2\sigma < 0$ loi lognormale

Si $\bar{X} - 2\sigma > 0$ loi normale

Où σ est l'écart-type

Le tableau 13 exprime la nature des distributions.

Pour pouvoir établir les populations d'anomalies :

- ✚ La méthode de l'écart-type est utilisée pour la distribution normale ;
- ✚ Et la méthode des fréquences cumulées pour la distribution lognormale.
- ❖ Méthode de l'écart-type

Pour cette méthode, la formule $\bar{X} \pm 2\sigma$ a été calculée pour déterminer les anomalies.

- ❖ Méthode des fréquences cumulées

Pour cette méthode, il faut calculer :

Le nombre de classe C : $C = 10 \cdot \log_{10} N$

Avec N : le nombre total des échantillons ;

Le nombre d'intervalle I : $I = \text{Valeur Max } x_i / C$

Avec C : le nombre de classe ;

x_i : l'élément.

La classe C et l'intervalle I permet de réaliser un tableau pour montrer le résultat.

Ce résultat est ensuite tracé sur du papier logarithme pour obtenir un graphique.

Cependant, pour gagner plus de temps et de précision, nous avons jugé utile d'apporter quelques améliorations dans la méthode :

On a décidé d'utiliser le logiciel Mupad de Matlab version r2013a pour répartir les données dans les classes et déterminer les fréquences : D'abord, on ouvre le logiciel Matlab, puis sous l'onglet Applications, on clique sur le Mupad notebook. Ensuite, introduit les valeurs des concentrations de chaque élément entre crochet et séparés de virgules. On entre ensuite la commande `stats::frequency` et puis le nombre de classes ainsi que le variable à classer. Ensuite, mupad répartit automatiquement les valeurs en intervalles égaux. Puis on entre la commande `TheClasses` pour faire ressortir les classes et `TheFrequencies` pour faire ressortir tous les fréquences de chaque classe. (Voir annexe 7 pour les détails de l'algorithme).

[19]

On a également décidé de tracer la courbe de fréquences cumulées non pas à la main sur du papier logarithme .mais sur le logiciel Matlab. Cela permet de déduire plus précisément le seuil d'anomalie. Pour cela, on joint les points ayant pour abscisses la limite supérieure des classes et pour ordonnées les fréquences cumulées croissantes. Afin de joindre les points, on a appliqué une interpolation cubique entre chaque point. Pour cela, on a utilisé la commande plot pour représenter les points et interpl pour représenter l'interpolation cubique. (Voir annexe 6 pour les détails de l'algorithme). [19]

On a utilisé la version 9.0 du logiciel Surfer pour la création des courbes d'isoteneurs.

Les tableaux 12 à 19 suivants nous montrent les calculs faits pour les éléments qui ont une distribution lognormale et qui suivent la méthode cumulée pour trouver leurs anomalies.

Quant aux figures 13 à 20, elles montrent le seuil d'anomalie de chaque élément correspondant aux tableaux. Les autres sont représentées en annexe 10.

Classe Mn	Fréquence	Fréquence Cumulée	% Cumulée
[150,000 ; 314,5429[	7	7	5,22
[314,5429 ; 479,0858[	15	22	16,42
[479,0858 ; 643,6287[	19	41	30,60
[643,6287 ; 808,1716[	18	59	44,03
[808,1716 ; 972,7145[	15	74	55,22
[972,7145 ; 1137,2574[	13	87	64,93
[1137,2574 ; 1301,8003[	14	101	75,37
[1301,8003 ; 1466,3432[	9	110	82,09
[1466,3432 ; 1630,8861[	7	117	87,31
[1630,8861 ; 1795,4290[	7	124	92,54
[1795,4290 ; 1959,9719[	1	125	93,28
[1959,9719 ; 2124,5148[	2	127	94,78
[2124,5148 ; 2289,0577[	0	127	94,78
[2289,0577 ; 2453,6007[	2	129	96,27
[2453,6007 ; 2618,1436[	1	130	97,01
[2618,1436 ; 2782,6865[	2	132	98,51
[2782,6865 ; 2947,2294[	0	132	98,51
[2947,2294 ; 3111,7723[	0	132	98,51
[3111,7723 ; 3276,3152[	1	133	99,25
[3276,3152 ; 3440,8581[	0	133	99,25
[3440,8581 ; 3605,4010[	1	134	100

Tableau 12: Tableau de fréquence en Manganèse (Mn).

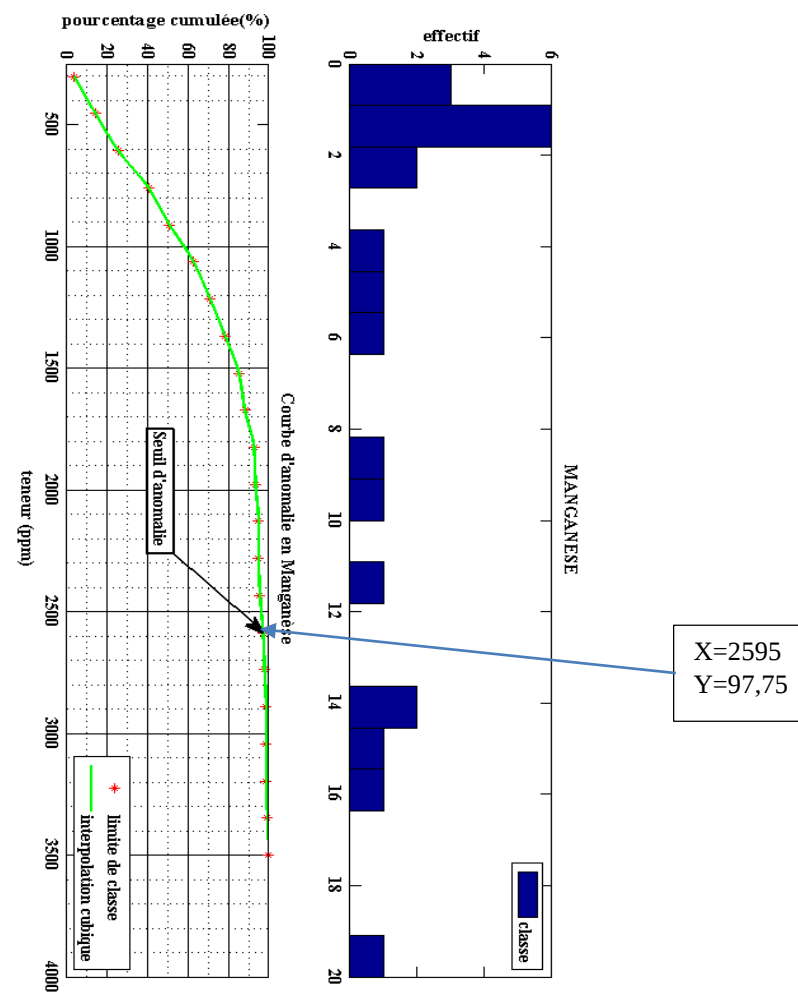


Figure 13: Courbe d'anomalie en Mn.

Classe Mo	Fréquence	Fréquence Cumulée	% Cumulée
[0,6800 ; 1,5873[	6	6	4,48
[1,5873 ; 2,4947[	17	23	17,16
[2,4947 ; 3,4020[	20	43	32,09
[3,4020 ; 4,3093[	19	62	46,27
[4,3093 ; 5,2167[	14	76	56,72
[5,2167 ; 6,1240[	13	89	66,42
[6,1240 ; 7,0314[	14	103	76,87
[7,0314 ; 7,9387[	5	108	80,60
[7,9387 ; 8,8460[	6	114	85,07
[8,8460 ; 9,7534[	9	123	91,79
[9,7534 ; 10,6607[	3	126	94,03
[10,6607 ; 11,5680[	1	127	94,78
[11,5680 ; 12,4754[	3	130	97,01
[12,4754 ; 13,3827[	1	131	97,76
[13,3827 ; 14,2900[	0	131	97,76
[14,2900 ; 15,1974[	0	131	97,76
[15,1974 ; 16,1047[	1	132	98,51
[16,1047 ; 17,0121[	0	132	98,51
[17,0121 ; 179,194[	1	133	99,25
[17,9194 ; 18,8267[	0	133	99,25
[18,8267 ; 19,7341[	1	134	100

Tableau 13: Tableau de fréquence en Molybdène (**Mo**)

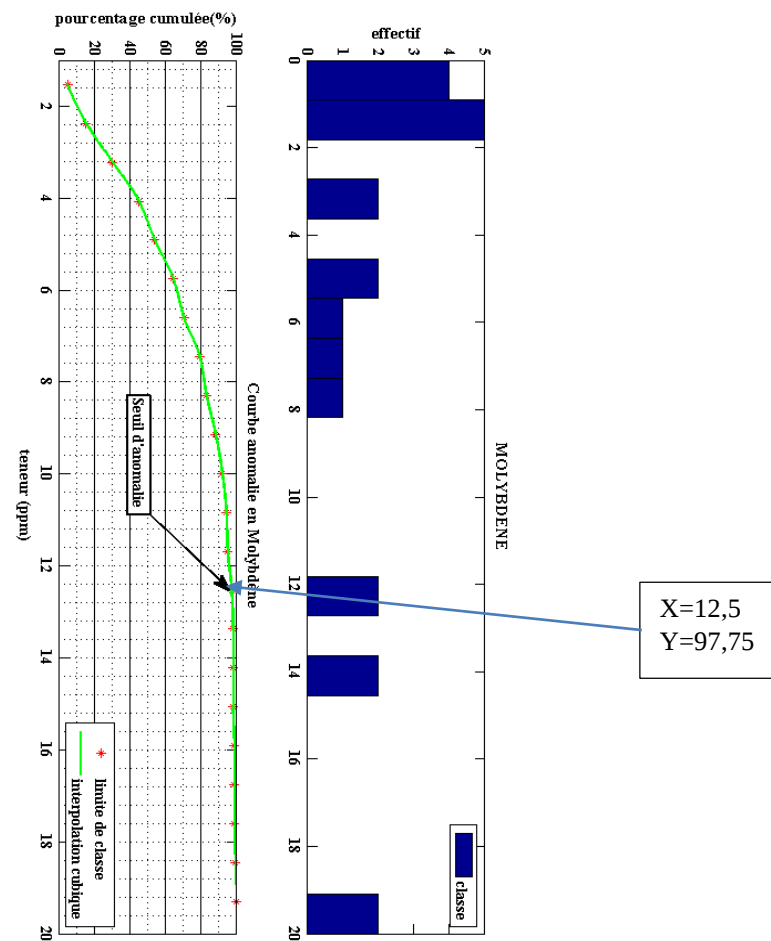


Figure 14: Courbe d'anomalie en Mo

Classe Pb	Fréquence	Fréquence Cumulée	% Cumulée
[12,1000 ; 26,6738[	8	8	5,97
[26,6738 ; 41,2476[	17	25	18,66
[41,2476 ; 55,8214[	21	46	34,33
[55,8214 ; 70,3952[	14	60	44,78
[70,3952 ; 84,9690[	11	71	52,99
[84,9690 ; 99,5428[	8	79	58,96
[99,5428 ; 114,1166[	8	87	64,93
[114,1166 ; 128,6904[	15	102	76,12
[128,6904 ; 143,2642[	8	110	82,09
[143,2642 ; 157,8380[	3	113	84,33
[157,8380 ; 172,4118[	4	117	87,31
[172,4118 ; 186,9856[	4	121	90,30
[186,9856 ; 201,5594[	1	122	91,04
[201,5594 ; 216,1332[	3	125	93,28
[216,1332 ; 230,7070[	0	125	93,28
[230,7070 ; 245,2808[	3	128	95,52
[245,2808 ; 259,8546[	2	130	97,01
[259,8546 ; 274,4284[	1	131	97,76
[274,4284 ; 289,0022[	1	132	98,51
[289,0022 ; 303,5760[	1	133	99,25
[303,5760 ; 318,1498[	1	134	100

Tableau 14: Tableau de fréquence en Plomb (Pb)

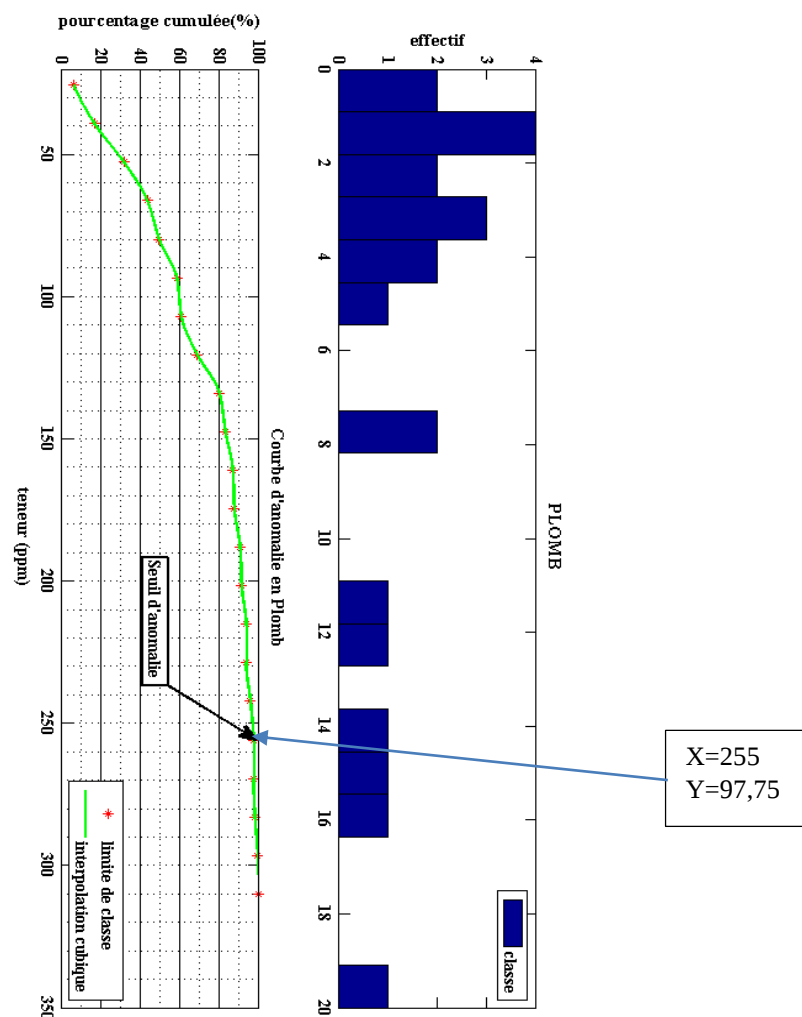


Figure 15: Courbe d'anomalie en Pb.

Classe Te	Fréquence	Fréquence Cumulée	% Cumulée
[0,0000 ; 0,0080[	44	44	32,84
[0,0080 ; 0,0160[	0	44	32,84
[0,0160 ; 0,0240[	0	44	32,84
[0,0240 ; 0,0320[	0	44	32,84
[0,0320 ; 0,0400[	0	44	32,84
[0,0400 ; 0,0480[	0	44	32,84
[0,0480 ; 0,0559[	23	67	50,00
[0,0559 ; 0,0639[	14	81	60,45
[0,0639 ; 0,0719[	16	97	72,39
[0,0719 ; 0,0799[	0	97	72,39
[0,0799 ; 0,0879[	9	106	79,10
[0,0879 ; 0,0959[	5	111	82,84
[0,0959 ; 0,1039[	8	119	88,81
[0,1039 ; 0,1119[	3	122	91,04
[0,1119 ; 0,1199[	0	122	91,04
[0,1199 ; 0,1279[	4	126	94,03
[0,1279 ; 0,1359[	4	130	97,01
[0,1359 ; 0,1439[	1	131	97,76
[0,1439 ; 0,1518[	1	132	98,51
[0,1518 ; 0,1598[	0	132	98,51
[0,1598 ; 0,1678[	1	133	99,25
[0,1678 ; 0,1758[	1	134	100

Tableau 15: Tableau de fréquence en Tellurium (Te)

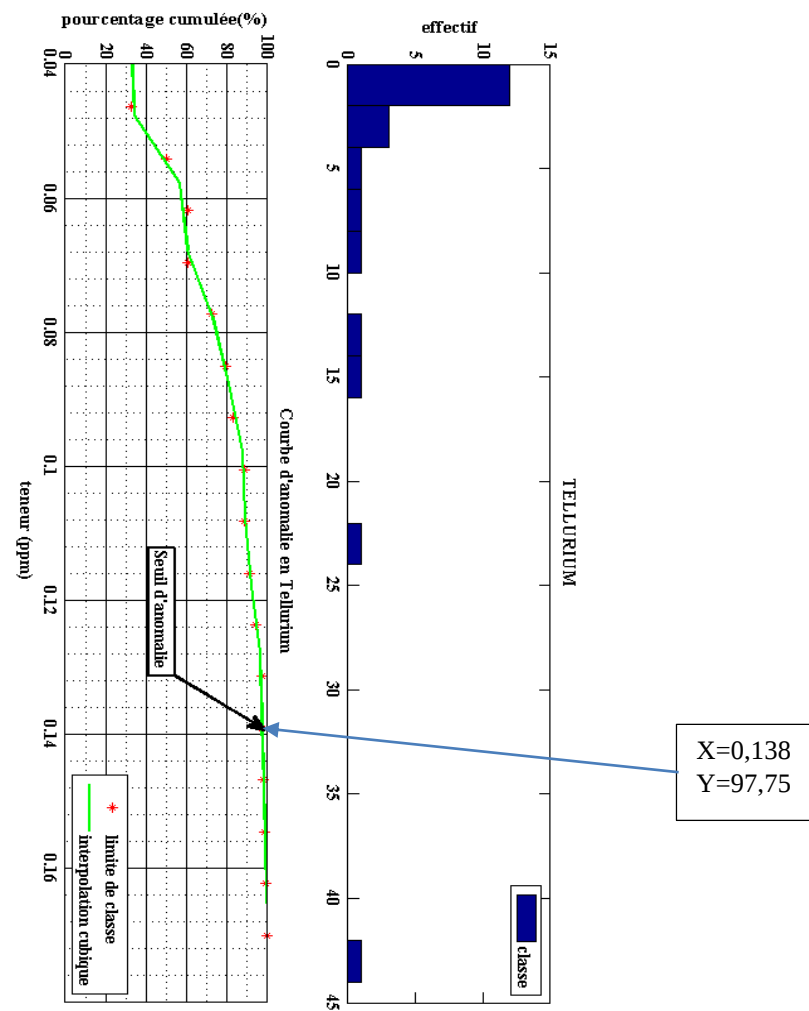


Figure 16: Courbe d'anomalie en Te

Classe W	Fréquence	Fréquence Cumulée	% Cumulée
[0,9000 ; 1,5394[	9	9	6,72
[1,5394 ; 2,1787[	11	20	14,93
[2,1787 ; 2,8181[	28	48	35,82
[2,8181 ; 3,4575[	12	60	44,78
[3,4575 ; 4,0968[	17	77	57,46
[4,0968 ; 4,7362[	18	95	70,90
[4,7362 ; 5,3756[	10	105	78,36
[5,3756 ; 6,0149[	14	119	88,81
[6,0149 ; 6,6543[	4	123	91,79
[6,6543 ; 7,2937[	0	123	91,79
[7,2937 ; 7,9330[	3	126	94,03
[7,9330 ; 8,5724[	2	128	95,52
[8,5724 ; 9,2118[	2	130	97,01
[9,2118 ; 9,8511[	0	130	97,01
[9,8511 ; 10,4905[	0	130	97,01
[10,4905 ; 11,1299[	2	132	98,51
[11,1299 ; 11,7692[	0	132	98,51
[11,7692 ; 12,4086[	0	132	98,51
[12,4086 ; 13,0480[	1	133	99,25
[13,0480 ; 13,6873[	1	134	100

Tableau 16: Tableau de fréquence en Tungstène (W)

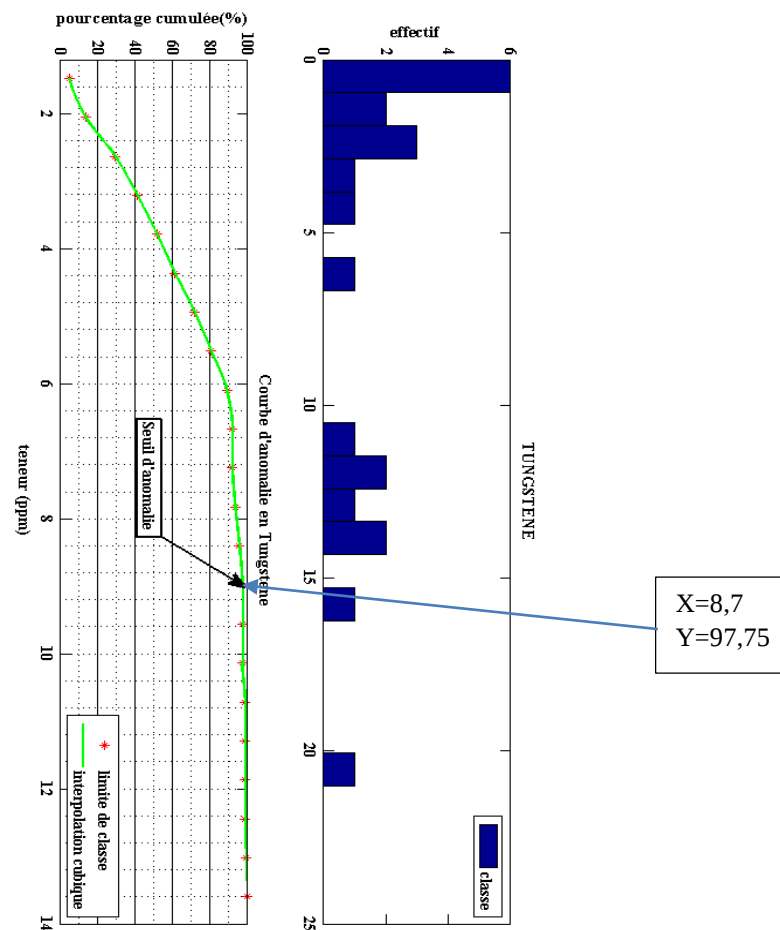


Figure 17: Courbe d'anomalie en W.

Classe U	Fréquence	Fréquence Cumulée	% Cumulée
[0,3000 ; 23,5241[	22	22	16,42
[23,5241 ; 46,7481[	21	43	32,09
[46,7481 ; 69,9722[	18	61	45,52
[69,9722 ; 93,1962[	17	78	58,21
[93,1962 ; 116,4203[	13	91	67,91
[116,4203 ; 139,6443[	10	101	75,37
[139,6443 ; 162,8684[	6	107	79,85
[162,8684 ; 186,0924[	5	112	83,58
[186,0924 ; 209,3165[	4	116	86,57
[209,3165 ; 232,5406[	3	119	88,81
[232,5406 ; 255,7646[	3	122	91,04
[255,7646 ; 278,9887[	1	123	91,79
[278,9887 ; 302,2127[	2	125	93,28
[302,2127 ; 325,4368[	2	127	94,78
[325,4368 ; 348,6608[	1	128	95,52
[348,6608 ; 371,8849[	2	130	97,01
[371,8849 ; 395,1089[	0	130	97,01
[395,1089 ; 418,3330[	1	131	97,76
[418,3330 ; 441,5571[	0	131	97,76
[441,5571 ; 464,7811[	1	132	98,51
[464,7811 ; 488,0052[	0	132	98,51
[488,0052 ; 511,2292[	2	134	100

Tableau 17: Tableau de fréquence en Uranium (U)

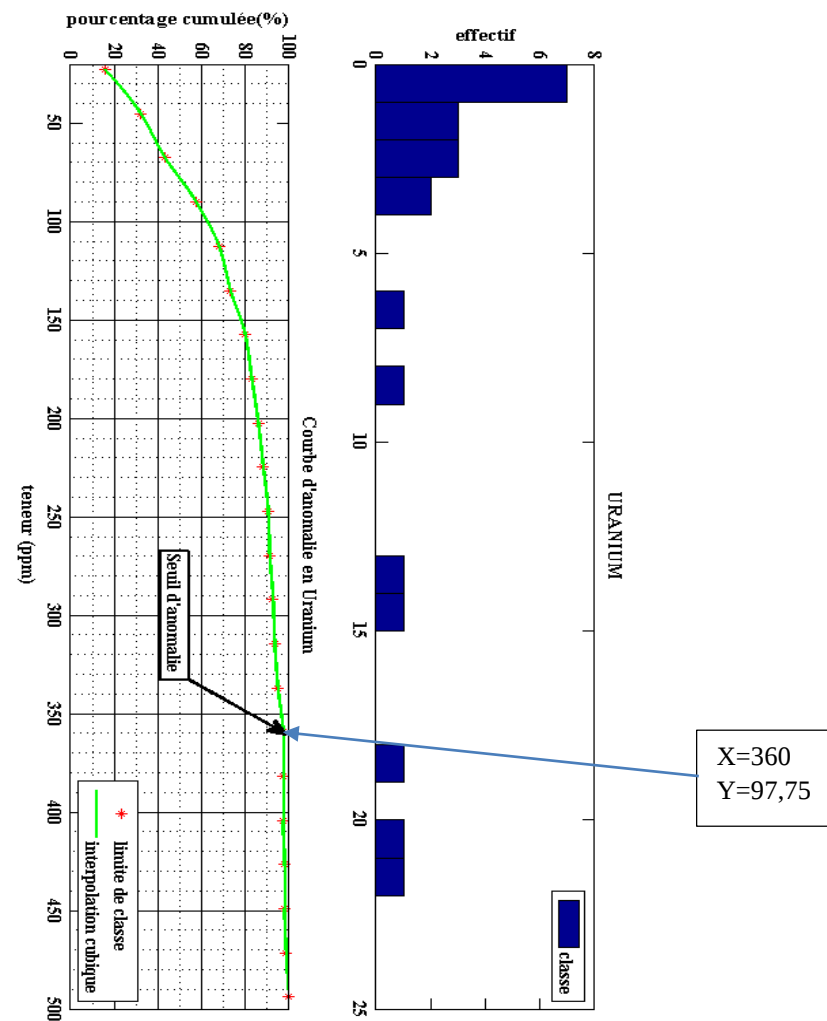


Figure 18: Courbe d'anomalie en U

Classe Y	Fréquence	Fréquence Cumulée	% Cumulée
[11,0000 ; 28,5356[	15	15	11,19
[28,5356 ; 46,0711[	19	34	25,37
[46,0711 ; 63,6067[	16	50	37,31
[63,6067 ; 81,1423[	15	65	48,51
[81,1423 ; 98,6779[	17	82	61,19
[98,6779 ; 116,2134[	4	86	64,18
[116,2134 ; 133,7490[	16	102	76,12
[133,7490 ; 151,2846[	4	106	79,10
[151,2846 ; 168,8202[	6	112	83,58
[168,8202 ; 186,3557[	5	117	87,31
[186,3557 ; 203,8913[	4	121	90,30
[203,8913 ; 221,4269[	1	122	91,04
[221,4269 ; 238,9624[	2	124	92,54
[238,9624 ; 256,4980[	1	125	93,28
[256,4980 ; 274,0336[	1	126	94,03
[274,0336 ; 291,5692[	2	128	95,52
[291,5692 ; 309,1047[	2	130	97,01
[309,1047 ; 326,6403[	3	133	99,25
[326,6403 ; 344,1759[	0	133	99,25
[344,1759 ; 361,7114[	0	133	99,25
[361,7114 ; 379,2470[	1	134	100

Tableau 18: Tableau de fréquence en Yttrium (Y)

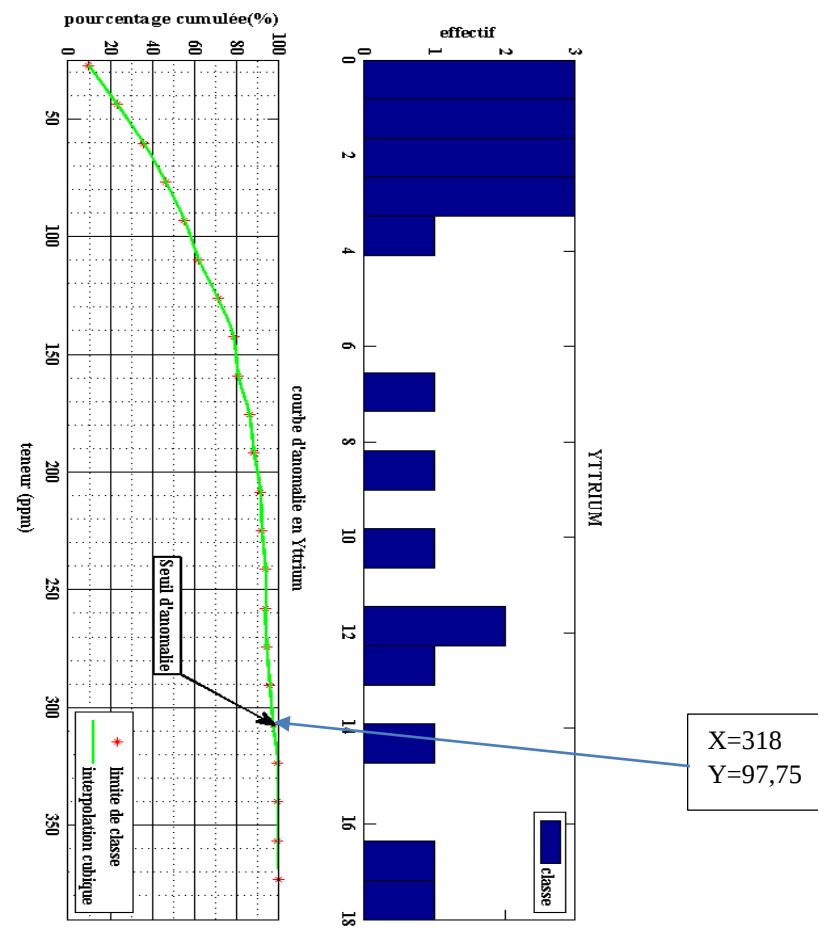


Figure 19: Courbe d'anomalie en Y.

Classe Zn	Fréquence	Fréquence Cumulée	% Cumulée
[25,0000 ; 61,2465[	5	5	3,73
[61,2465 ; 97,4929[	6	11	8,21
[97,4929 ; 133,7394[	8	19	14,18
[133,7394 ; 169,9858[	5	24	17,91
[169,9858 ; 206,2323[	19	43	32,09
[206,2323 ; 242,4787[	9	52	38,81
[242,4787 ; 278,7252[	10	62	46,27
[278,7252 ; 314,9716[	10	72	53,73
[314,9716 ; 351,2181[	19	91	67,91
[351,2181 ; 387,4645[	7	98	73,13
[387,4645 ; 423,7110[	7	105	78,36
[423,7110 ; 459,9574[	6	111	82,84
[459,9574 ; 496,2039[	5	116	86,57
[496,2039 ; 532,4503[	7	123	91,79
[532,4503 ; 568,6968[	4	127	94,78
[568,6968 ; 604,9432[	2	129	96,27
[604,9432 ; 641,1897[	3	132	98,51
[641,1897 ; 677,4361[	1	133	99,25
[677,4361 ; 713,6826[	0	133	99,25
[713,6826 ; 749,9290[	0	133	99,25
[749,9290 ; 786,1755[	1	134	100

Tableau 19 : Tableau de fréquence en Zinc (Zn).

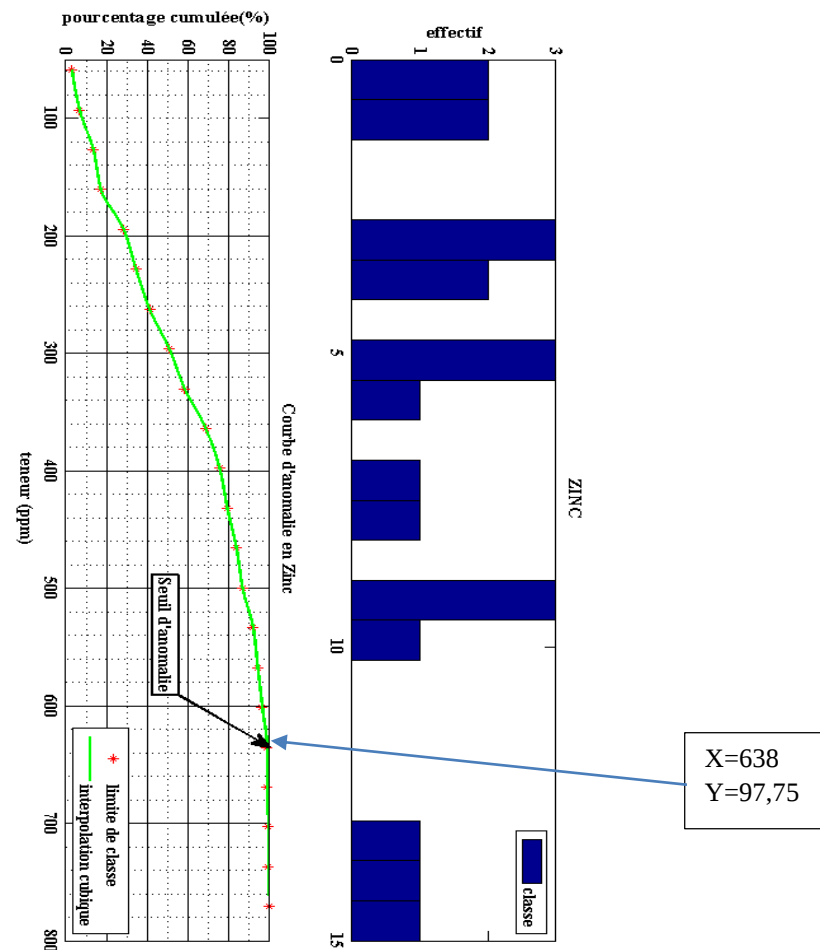


Figure 20: Courbe d'anomalie en Zn

IV.1.2. Analyse à variable multiple

Dans le cadre d'une prospection géochimique, il est nécessaire de faire un traitement univariable et multivariable afin de connaître les relations entre les éléments.

Le paramètre qui permet de distinguer cette relation est : le coefficient de corrélation noté ρ : il est égale au rapport de la covariance de x et y, sur le produit de leurs écart -type σ_x et σ_y .

$$\rho(x,y) = \text{cov}(x,y) / \sigma_x \cdot \sigma_y$$

Et la covariance $\text{Cov}(x,y) = \overline{xy} - \bar{x} \cdot \bar{y}$

Avec $\overline{xy}$: moyenne de x et y ;

$\bar{x}$: La moyenne de la variable x et $\bar{y}$: moyenne de la variable y.

Le tableau 21 ci-après nous montre la corrélation entre les divers éléments.

La tracée de la courbe des fréquences cumulées et la détermination du seuil d'anomalie a été faite à l'aide de logiciel Matlab r2013a. Ceci a été fait pour offrir une grande précision.

Le niveau de signification des coefficients de corrélation des différents couples est une information essentielle quant à la détermination de leur degré de corrélation. Il est donc intéressant de connaître la valeur minimum du coefficient de corrélation significatif (r_0). Ce dernier est calculé suivant la loi de Student qui est inversement proportionnelle à la taille de l'échantillon. Il est estimé par la formule :

$$r_0 = \sqrt{\left[\frac{t^2}{t^2 + (n - 2)} \right]} \quad \text{Avec } t = \text{valeur de la variable Student ;}$$

n = nombre d'échantillon

Au seuil de probabilité 95% ($t = 1.975$) et (r_0) prend la valeur 0.155.

La classification des coefficients de corrélation, en coefficients faibles, moyens, forts et très forts est représentée dans le tableau 23 :

$$\text{Où } f = 1 - r_0/4 = 0,211$$

Pour mettre en évidence les couples de variables qui reflètent une bonne corrélation, on n'a considéré que les coefficients forts et très forts. Le tableau 20 ci-dessous montre les différents types de corrélations entre les éléments traités.

Intervalle	Type de corrélation	Valeur de r
$r_0 \text{ à } r_0 + f$	Faible	$0.155 < r \leq 0.366$
$r_0 + f \text{ à } r_0 + 2f$	Moyenne	$0.366 < r \leq 0.577$
$r_0 + 2f \text{ à } r_0 + 3f$	Fort	$0.577 < r \leq 0.844$
$r_0 + 3f \text{ à } r_0 + 4f$	Très fort	$0.844 < r \leq 1$

Tableau 20: Variation des corrélations.

IV.2. METHODOLOGIE POUR LES TRAITEMENTS ET EXPLOITATION DES DONNÉES DE LA TELEDETECTION.

La présente étude s'appuie sur le traitement et l'interprétation d'une scène Landsat 7 ETM+ multispectrale et panchromatique [une bande panchromatique TM 8 à 15 m de résolution spatiale, 6 bandes multispectrales (TM 1, 2, 3, 4, 5, 7, à 30 m) et une bande TM 6 à 60 m] couvrant la feuille NO62, path 158 row 077 du 14 Décembre 2013.

Dans cette étude, en plus des photos satellitaires, nous avons consulté une assez riche bibliographie concernant la région d'étude, et avons utilisé des données géoscientifiques sous forme de cartes géologiques au 1/100 000^{ème}. Ainsi que les images ont subi une série de traitements à l'aide des logiciels ENVI 4.5 et ERDAS 2011, logiciels de visualisation et d'analyse d'image.

Ces cartes ont été, par la suite, analysées en vue de comprendre la lithostratigraphie, la structuration et l'histoire géodynamique de la région, puis intégrées dans ArcGIS. 10; l'un des Systèmes d'Informations Géographiques (SIG) les plus utilisés qui permet, entre autres, la digitalisation des cartes et la réalisation d'une cartographie intégrée dans un SIG.

IV.2.1. TRAITEMENTS DES IMAGES ETM+ DE LANDSAT-7

L'image Landsat peut être utilisé dans la télédétection à diverses fins, mais dans notre cas elle est surtout utile pour la réalisation d'une carte linéamentaire et structurale de la zone d'étude. Pour ce faire, les différentes étapes à suivre sont les analyses en composantes principale (ACP) et le rehaussement des linéaments par filtrage.

Ces diverses étapes sont affichées sur l'organigramme de la figure 21 :

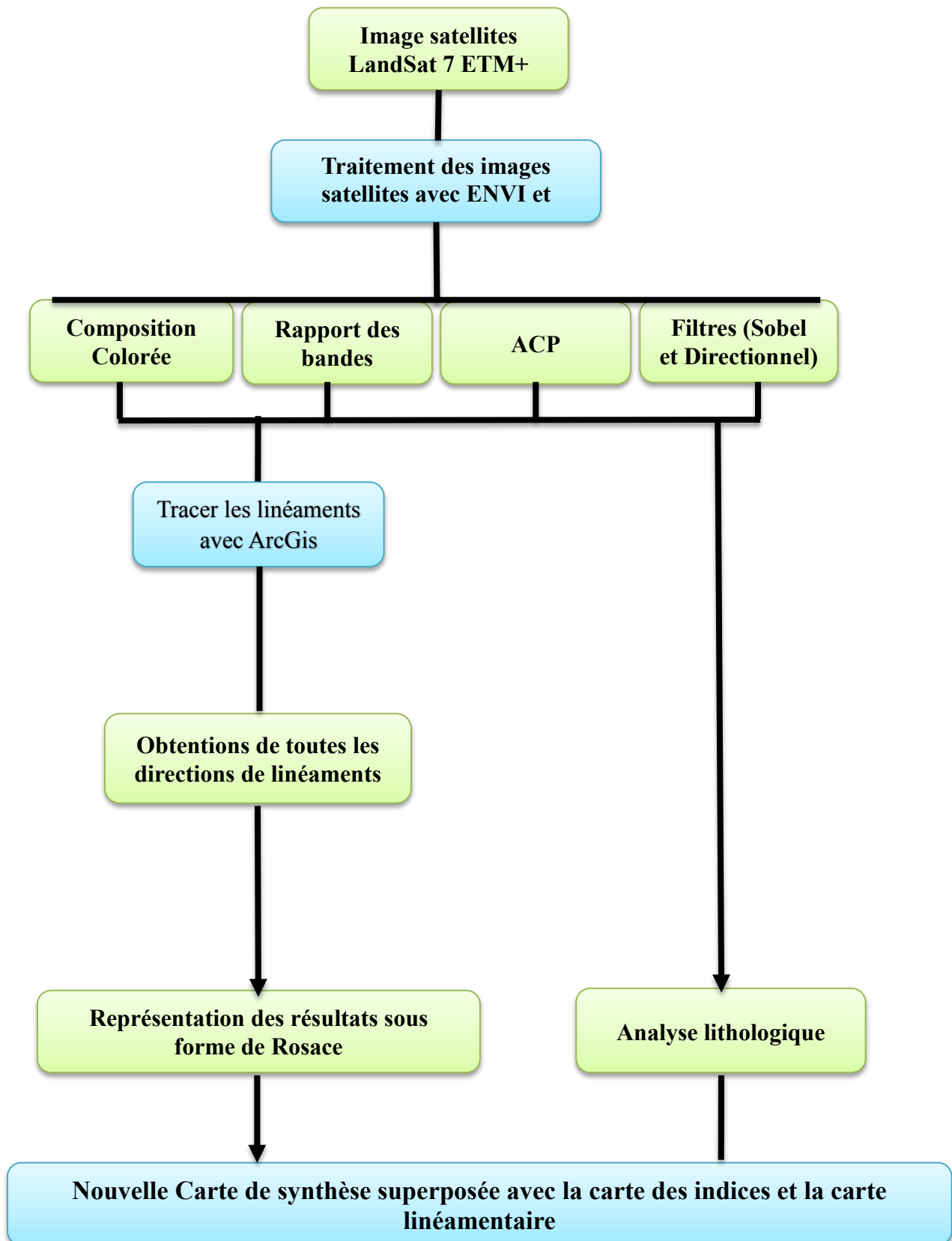


Figure 21: Organigramme de traitement des données satellitaires.

IV.2.1.1. Affichage en fausses couleurs : composition colorée

La composition consiste à combiner trois canaux ou bandes correspondant à trois fenêtres spectrales de numérisation différente en vue d'en constituer une image de synthèse. Le choix des bandes à combiner se fait en fonction de chacune de leurs caractéristiques (Tableau 21) et selon l'information voulue.

Bandes spectrales	Caractéristiques
TM1	Révèle mieux les teintes naturelles
TM2	Indicateur des fortes teneurs en métal
TM3	Révèle les déformations et les discontinuités (analyse structurale: plis, faille)
TM4	Sensible aux oxydes de fer et correspond à la réflectance maximale de la matière vivante
TM5	Révélateur des argiles et aussi de l'altération hydrothermale

Tableau 21: Caractéristiques des bandes spectrales.

IV.2.1.2. Délimitation de la lithologie:

✓ La composition colorée ou affichage en fausses couleurs :

Les images de télédétection sont en mode RASTER ; où l'espace est divisé en unités spatiales élémentaires appelées pixel (Picture element) portant chacun une valeur radiométrique renseignant sur sa luminosité et sa couleur.

Ainsi, Un fichier RASTER peut être constitué d'un ou plusieurs plans de couleurs (ou groupes de valeurs radiométriques) et chaque plan image correspond à une bande spectrale précise, c'est-à-dire à une longueur d'onde dans laquelle l'image a été acquise par les différents canaux radiométriques du satellite.

En codant les six canaux de même résolution (30 m, Bandes 1, 2, 3, 4, 5 et 7) d'une image Landsat avec les trois couleurs fondamentales (rouge, vert et bleu), on peut élaborer 216 compositions colorées.

✓ Choix des combinaisons de bandes en composition colorée :

La variété des canaux Landsat 7 ETM+ nous offre une multitude de choix pour réaliser les combinaisons tertiaires RVB. Cependant, il arrive que ces combinaisons soient très corrélables, c'est-à-dire que l'information portée se répète dans plusieurs bandes. Pour échapper

à cette répétitivité et choisir les compositions RVB les plus importantes, une étude statistique pour les six bandes de même résolution spatiale (1, 2, 3, 4, 5 et 7) est effectuée. Ainsi, le coefficient de corrélation des six bandes et leurs déviations standards (figure 22) sont calculés. Les meilleures compositions colorées obtenues correspondent aux combinaisons de trois bandes les moins corrélées entre elles.

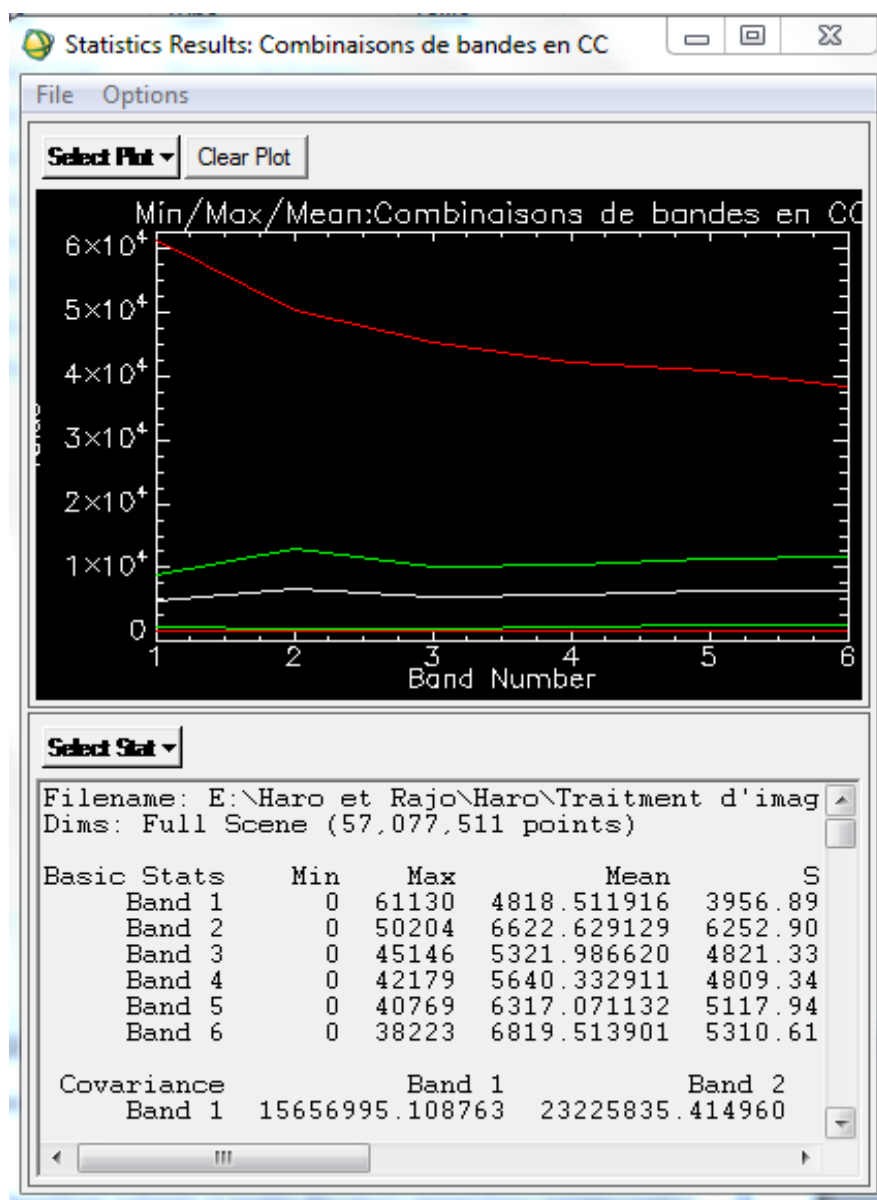


Figure 22: corrélations entre les matrices des six bandes 1, 2, 3, 4, 5 et 6 (correspondant respectivement aux méta-bandes ETM 7, 5, 4, 3, 2 et ETM 1) et des écarts types standards absolus (Stdev), de la zone d'étude.

Cependant, pour un choix réellement quantitatif des meilleures combinaisons de bandes pour l'extraction d'un maximum d'information, Chavez et al. (1982) ont introduit la notion d'« Optimum Index Factor ». L'OIF est calculé de la façon suivante :

$$OIF = \frac{\sum_{K=1}^3 S_K}{\sum_{j=1}^3 |r_j|}$$

Où : $\sum S_K$ = Somme des écarts types (déviations standards) des combinaisons des 3 bandes k1, k2, k3.

$\sum |r_j|$ = Somme des valeurs absolues du coefficient de corrélation.

La combinaison qui a l'OIF le plus élevé est susceptible de fournir le maximum d'informations lithologiques puisqu'elle utilise les données ayant le moins de redondances.

✓ **Band ratios (rapport de bandes) :**

Elle consiste en la division du DN (digital number ou valeur radiométrique d'un pixel) dans une bande par le DN d'une autre bande (nous rappelons qu'un pixel correspond à une valeur entre 0 et 255, correspondant à l'intensité du gris, avec 0 = le noir et 255 = le blanc). Il s'agit d'un procédé multi-spectral très utilisé pour mettre en évidence les différences entre canaux et permettre de s'affranchir des variations d'éclairement des pixels, donc de réduire les effets de la topographie et d'augmenter le contraste entre les surfaces minérales. En pratique, trois rapports de bandes sont utilisés pour obtenir une image en RVB.

✓ **L'analyse en composantes principales (ACP):**

Les données multi-spectrales des différents canaux contenant souvent de l'information similaire, des transformations d'images sont utilisées pour réduire cette redondance de données. Les "néo" bandes qui en résultent sont appelées composantes et permettent de réduire par l'information comprise dans 5 ou 6 canaux en seulement trois composantes tout en conservant plus de 90% de l'information initiale.

C'est une technique efficace pour accentuer une image multispectrale pour des fins d'interprétation géologique.

✓ **Analyse structurale et cartes linéamentaires**

Les filtres directionnels peuvent être, ensuite, appliqués aux différentes bandes spectrales et aux néo-canaux (CP, et band ratios) en vue d'obtenir les cartes linéamentaires.

Filtrer une image c'est lui appliquer une fonction mathématique qui modifie les valeurs du gris de tout ou une partie des pixels. Si la fonction est linéaire on parle de filtrage linéaire, si elle prend en compte les valeurs du gris au voisinage de chaque pixel transformé, elle est dite fonction de convolution. Les méthodes utilisées dans ce travail sont de type convolution. Il s'agit :

❖ **Le filtre Sobel** : utilisé pour détecter les contours d'objets dans une image, en faisant deux balayages l'un horizontal et l'autre vertical. Il donne souvent de bons résultats pour la détection des linéaments.

❖ **Les filtres directionnels** : améliorent la perception des linéaments, correspondants à des discontinuités lithologiques ou structurales, en provoquant un effet optique d'ombre portée sur l'image.

IV.2.2. TRAITEMENTS DES DONNEES AEROMAGNETIQUES

Le champ magnétique terrestre est formé par le champ géomagnétique provenant du noyau de la Terre, le champ induit qui est le champ magnétique induit dans les matériaux de la croûte terrestre par le champ géomagnétique et enfin, le champ rémanent qui résulte de l'aimantation de minéraux ferromagnétiques et qui demeure même si le champ inducteur cesse. Le champ géomagnétique est de l'ordre de 50.000 gammas ($=10^9$ T) et varie peu au cours du temps mais il est variable selon la région du globe. Le champ induit varie selon la susceptibilité magnétique k du corps. L'intensité du champ induit et rémanent (dont les amplitudes ne dépassent pas quelques milliers de gammas) reflètent donc l'hétérogénéité lithologique d'une région donnée. C'est l'objet de la prospection magnétique. L'anomalie de Champ Magnétique Total est calculée soustrayant du champ magnétique total observé le champ géomagnétique théorique de référence (IGRF : International Geomagnetic Reference Field) à chaque section de levée. L'ensemble des valeurs des anomalies magnétiques (Champ Magnétique Totale) des valeurs d'amplitudes déterminées en chaque point de mesures sont interpolées pour obtenir à chaque fois une grille bidimensionnelle du paramètre considérée. Ces grilles sont utilisées pour le tracé des cartes d'iso valeurs. [25]

Dans cette étude, les données aéromagnétiques et leurs dérivées sont surtout utilisées pour contribuer à une étude structurale de la zone d'étude. Pour ce faire nous allons procéder à une observation et interprétation des linéaments géophysiques présents sur les cartes.

Le traitement des données aéromagnétiques exige d'abord les corrections des effets des variations diurnes, le nivellement des données magnétiques à partir des intersections des lignes de vol et des lignes de contrôle, et enfin la déduction de l'IGRF à partir de ces données nivelées. [25]

Ces 3 étapes étant déjà accomplies pour les données de BPGRM, on passe tout de suite à l'étape suivante qui consiste à l'application des différents filtres. Le menu MAGMAP de Oasis Montaj permet l'application et le traitement de ces différents filtres.

On trouve ci- dessous l'organigramme de traitement des données aéromagnétiques

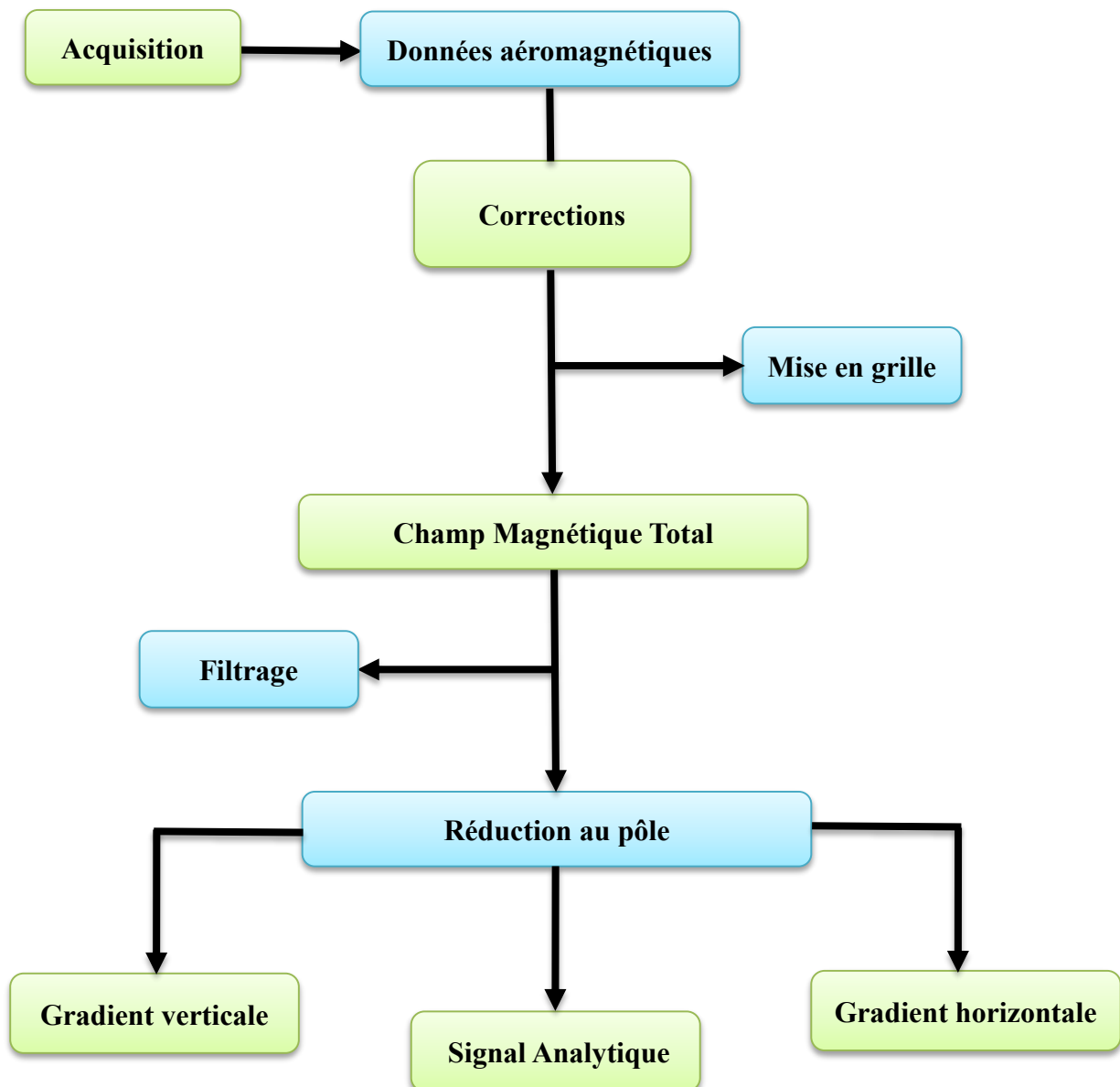


Figure 23: Organigramme de traitement des données aéromagnétiques.

IV.2.4. CARTE D'OCCUPATION DU SOL

La télédétection rassemble toutes les techniques qui permettent d'obtenir des informations à propos d'un objet sans être en contact direct avec lui. C'est un système d'acquisition d'information à distance, relativement à la terre ou à l'atmosphère, qui est basé sur les propriétés du rayonnement électromagnétique. La télédétection a été utilisée pour l'établissement de la carte d'occupation du sol (figure 4) à partir de l'image satellite multi spectrale du LANDSAT TM 7(scène 158 /077) de la région d'étude.

La réalisation de la carte d'occupation du sol ou COS (figure n° 4) est basée sur la combinaison des différentes bandes en un canal qui représente l'état de surface, puis la classification de l'image c'est à dire donner quelques classes d'objets suffisamment homogène pour qu'il soit possible de caractériser chaque catégorie par des critères spectraux.

On a pu différencier 8 classes données par le tableau 22.avec les surfaces occupées par chaque classe.

Numéro	Désignation	Surface (Ha)	Pourcentage(%)
1	Forêt dense	13440	14,4
2	Forêt littorale	22535,4	24,1
3	Rizière	11645,9	12,4
4	Savane herbeuse	2535,4	2,8
5	Savane arborée	16810,5	18
6	Mosaïque de culture	15773,1	16,8
7	Rivières et Lac	8405,6	9
8	Zone reboisées	2319,8	2,5

Tableau 22: Classification des occupations du sol.

PARTIE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DU TRAITEMENT DES DONNEES GEOCHIMIQUES

V.1. ANALYSE UNIVARIABLE

D'après le calcul des paramètres statistiques, le tableau 23 a donné le résultat comme suit :

- ✓ Un élément tel que le vanadium (V) suit la distribution normale ;
- ✓ Et les seize autres éléments à savoir l'antimoine (Sb), le cérium (Ce), le cuivre (Cu), le mercure (Hg), le lanthanide (La), le manganèse (Mn), le molybdénite (Mo), le nickel (Ni), le niobium, le plomb (Pb), le soufre (S), le tellurium (Te), le tungstène (W), l'uranium (U), l'yttrium (Y) et le Zinc (Zn) suivent la distribution lognormale.

Le tableau ci-dessous exprime la nature des distributions.

	Sb	Ce	Cu	La	Mn	Hg	Mo	Ni	Nb	Pb	S	Te	W	U	V	Y	Zn
N	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134	134
$\bar{X}$	0,0863	3269,6022	9,9530	2170,3134	1012,6119	0,0159	5,3740	210,2910	16,5112	96,8582	0,0062	0,0525	4,0672	107,2799	268,2910	102,7993	303,3881
M_G				1356,6037	857,1605		4,5038		11,6167	77,2568			3,5657	66,0709	243,0029	78,3377	257,9195
Min	0	0	0	37,4	150	0	0,68	0	2,6	12,1	0	0	0,9	0,3	66	11	25
Max	0,76	9940	31,5	9750	3500	0,15	19,3	500	140	310	0,07	0,17	13,6	494	936	373	771
C	22																
I	0,0357	467,3018	1,4809	458,3695	164,5429	0,0071	0,9073	23,5061	6,5817	14,5738	0,0033	0,0080	0,6394	23,2241	44,0035	17,5356	36,2465
σ	0,1207	2835,9166	5,5755	1981,7011	603,6653	0,0200	3,2924	160,1277	19,5528	65,1992	0,0092	0,0437	2,2125	102,6226	119,8921	76,2725	154,3443
$\bar{X}+2\sigma$	0,3277	8941,4355	21,1040	6133,7156	2219,9426	0,0558	11,9588	530,5464	55,6168	227,2565	0,0247	0,1398	8,4922	312,5250	508,0753	255,3442	612,0767
$\bar{X}-2\sigma$	-0,155	-2402,231	-1,1981	-1793,089	-194,7187	-0,024	-1,2109	-109,964	-22,594	-33,5401	-0,012	-0,035	-0,358	-97,9653	28,5068	-49,7457	-5,3005

Tableau 23: Tableau des paramètres statistiques des éléments.

	Sb	Ce	Cu	La	Mn	Hg	Mo	Ni	Nb	Pb	S	Te	W	U	V	Y	Zn
$\bar{X}/M_G$				1,5998	1,1814		1,1932		1,4213	1,2537			1,1406	1,6237	1,1041	1,3123	1,1763
$\bar{X}-2\sigma$	-0,155	-2402,231	-1,1981	-1793,089	-194,7187	-0,024	-1,2109	-109,964	-22,594	-33,5401	-0,012	-0,035	-0,358	-97,9653	28,5068	-49,7457	-5,3005
Distribution	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	L	N	L	L

Avec N : Loi normale et L : Loi lognormale

Tableau 24: Tableau des distributions des éléments.

V.2. ANALYSE A VARIABLE MULTIPLE

	Sb	Ce	Cu	La	Mn	Hg	Mo	Ni	Nb	Pb	S	Te	W	U	V	Y	Zn
Sb	1,000																
Ce	0,027	1,000															
Cu	0,077	-0,150	1,000														
La	-0,427	-0,012	-0,143	1,000													
Mn	-0,158	-0,067	0,120	0,261	1,000												
Hg	0,083	0,068	-0,099	-0,327	-0,110	1,000											
Mo	-0,002	-0,028	0,066	0,267	0,755	-0,158	1,000										
Ni	0,305	0,054	0,029	-0,695	-0,066	0,287	0,001	1,000									
Nb	-0,091	0,054	0,105	0,064	0,081	0,007	-0,118	-0,194	1,000								
Pb	0,025	-0,012	-0,017	-0,118	0,426	0,093	0,280	0,188	-0,027	1,000							
S	0,203	-0,089	0,174	-0,500	-0,167	0,110	-0,107	0,342	-0,187	0,000	1,000						
Te	0,400	-0,149	0,104	-0,670	-0,096	0,375	-0,137	0,572	-0,149	-0,085	0,340	1,000					
W	-0,120	-0,030	0,149	0,162	0,682	-0,083	0,520	-0,134	0,355	0,320	-0,126	-0,154	1,000				
U	-0,047	-0,004	-0,025	-0,007	0,365	0,127	0,161	0,025	0,170	0,867	-0,072	-0,146	0,321	1,000			
V	0,058	-0,037	0,336	-0,056	0,634	-0,037	0,438	0,048	0,451	0,394	-0,093	0,020	0,694	0,360	1,000		
Y	-0,076	-0,023	0,084	0,005	0,515	0,072	0,263	0,050	0,075	0,891	-0,098	-0,110	0,408	0,864	0,429	1,000	
Zn	-0,185	0,047	0,028	0,086	0,530	0,088	0,149	-0,042	0,494	0,571	-0,228	-0,152	0,420	0,683	0,567	0,632	1,000

Tableau 25: Tableau de corrélation des éléments.

D'après le calcul des coefficients de corrélation des 17 éléments et la classification des corrélations qu'on a évoquées au tableau 25 :

✓ Les couples d'éléments (Pb-U), (Pb-Y) et (U-Y) ont des coefficients de corrélation positive très forte ($0.844 < r \leq 1$) ;

✓ Les couples d'éléments (Mn-Mo), (Mn-W), (Mn-V), (W-V), (U-Zn) et (Y-Zn) ont des coefficients de corrélation positive forte ($0.577 < r \leq 0.844$) ;

✓ Les couples d'éléments (Nb- Pb), (Sb- Te), (Hg- Te), (Ni- Te), (Mo- W), (Pb- V), (Nb- V), (Mo- V), (Mn- Y), (W- Y), (V- Y), (Mn- Zn), (Nb-Zn), (Pb- Zn), (W- Zn), et (V- Zn) ont des coefficients de corrélations positive moyennes ($0.366 < r \leq 0.577$) ;

✓ Les couples d'éléments à valeur de coefficients de corrélations inférieures à **0.366** et négative sont classées faibles.

Couples de variables	Mn-Mo	Mn-W	Mn-V	Pb-U	Pb-Y	W-V	U-Y	U-Zn	Y-Zn
Coeff de corrélation.	0,755	0,682	0,634	0,867	0,891	0,694	0,864	0,683	0,632
Type de corrélation.	Fort	Fort	Fort	Très fort	Très fort	Fort	Très fort	Fort	Fort

Tableau 26: Tableau des couples en corrélation.

✓ Diagramme de dispersion

Les couples à fortes et à très fortes corrélations signalées précédemment sont confirmés après dépouillement de leurs graphiques. Les couples (Mn-Mo), (Mn-W), (Mn-V), (Pb-U), (Pb-Y), (W-V), (U-Y), (U-Zn) et (Y-Zn) montrent des diagrammes avec des points dispersés en forme d'ellipsoïde dont le plus grand axe de cet ellipsoïde est le coefficient directeur de la droite de régression linéaire simple ($y = ax + b$).

Ces diagrammes sont montrés par les figures 24 et 25 ci-après.

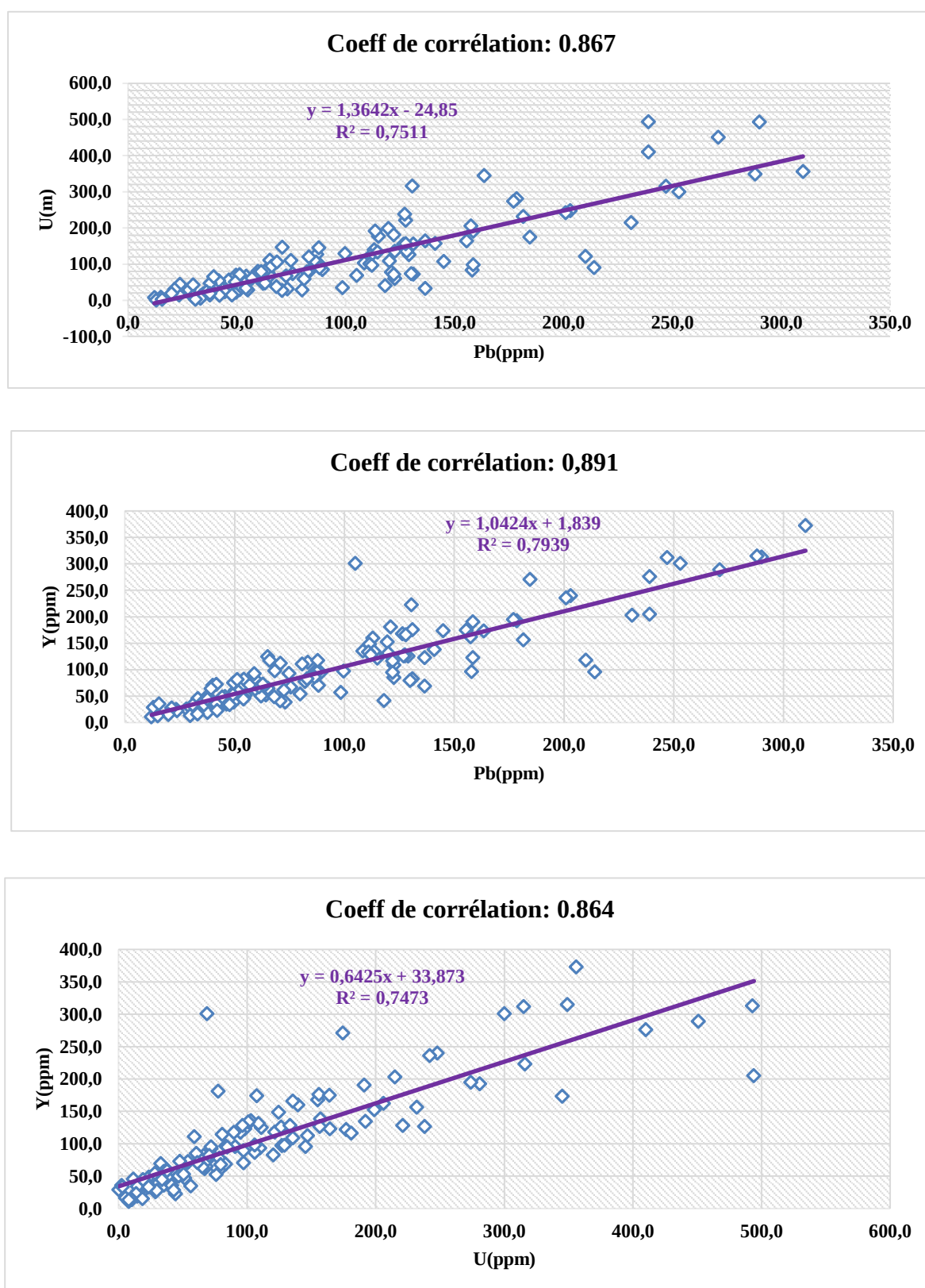


Figure 24: Diagrammes binaires représentant couples d'éléments à corrélations très fortes.

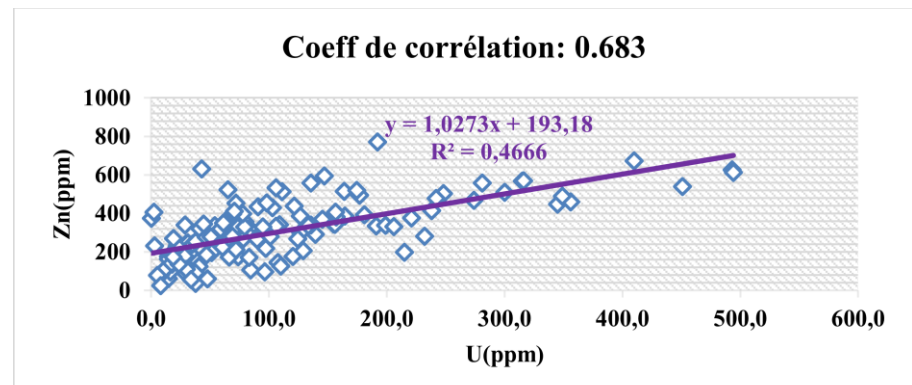
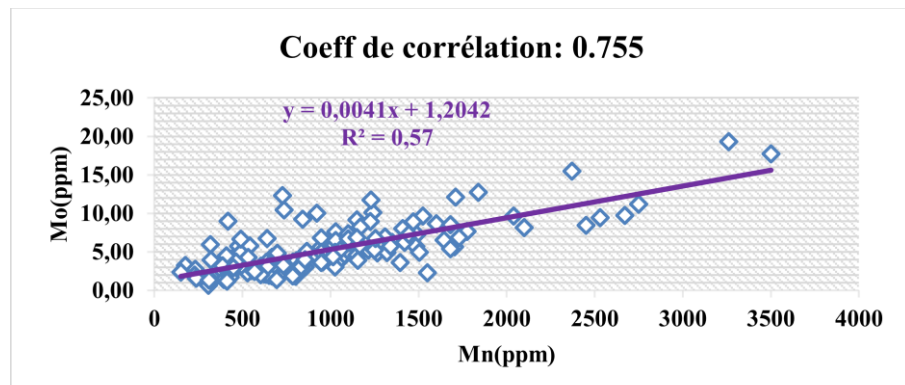
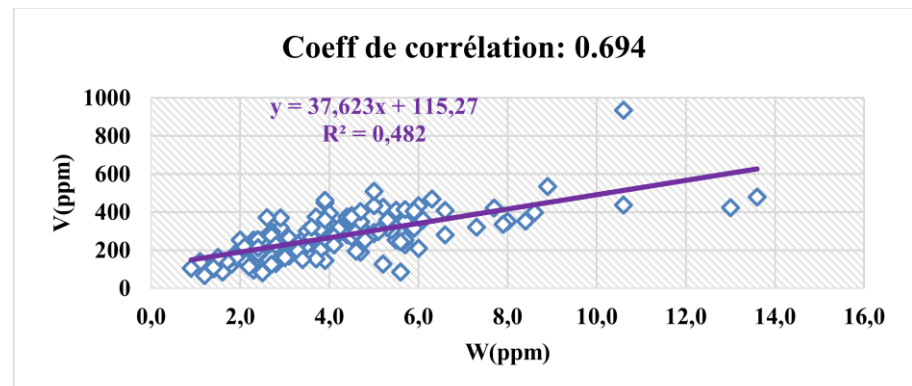
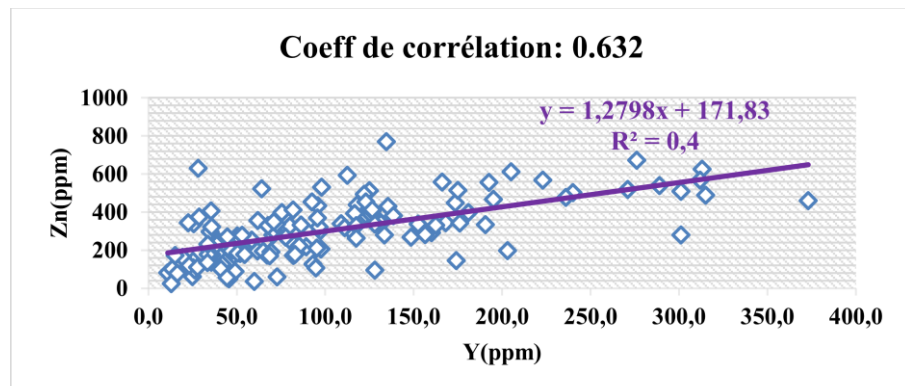
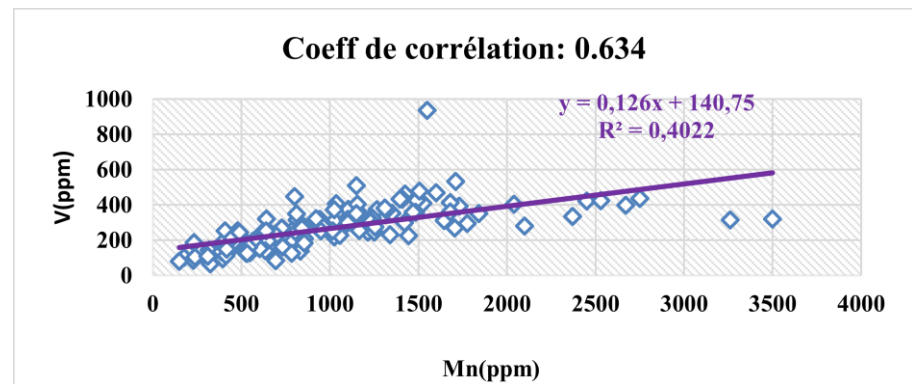
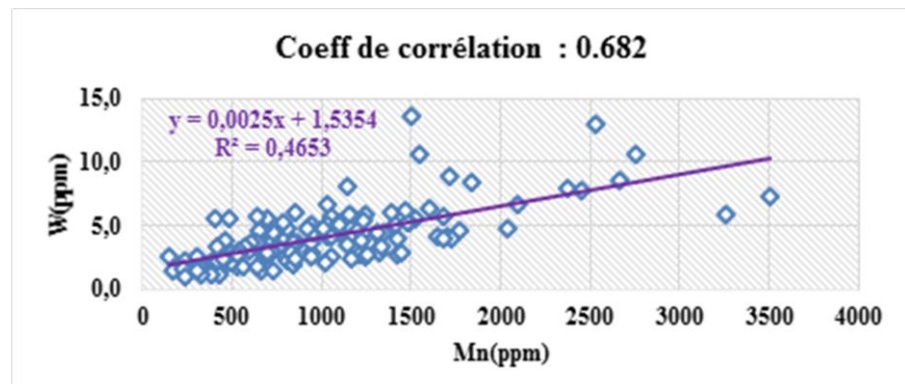


Figure 25: Diagrammes binaires représentant couples d'éléments à corrélations fortes.

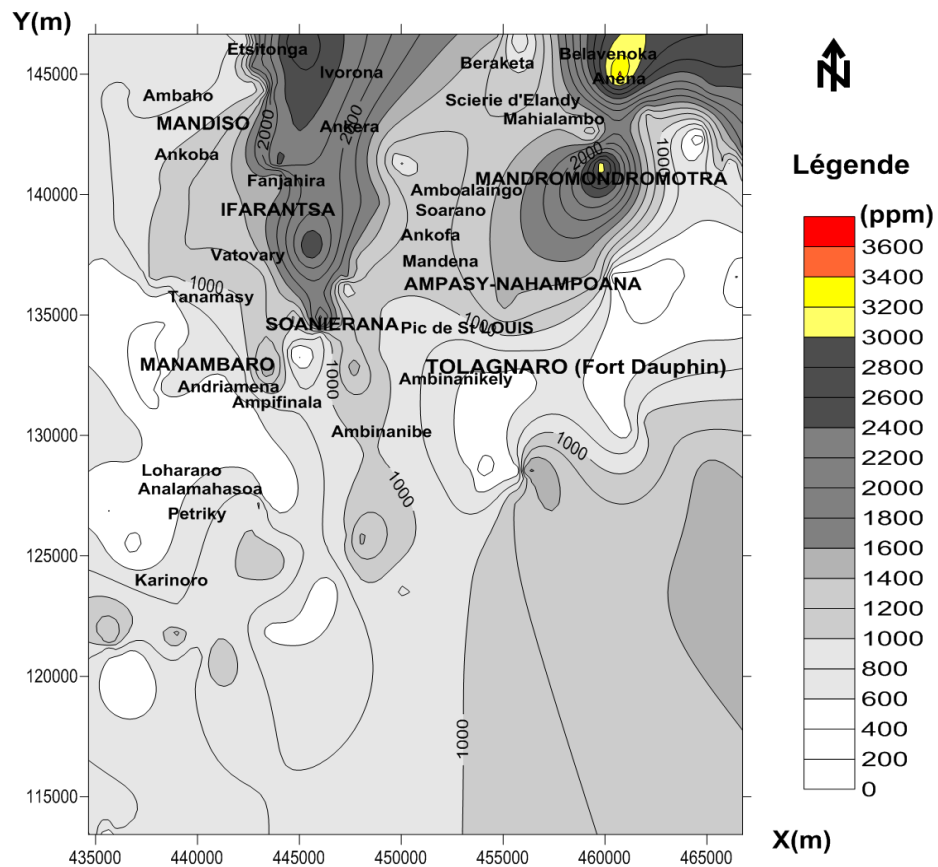
V.3. LA CARTOGRAPHIE GEOCHIMIQUE (COURBE D'ISOTENEUR)

Le but principal de l'établissement des cartes géochimiques d'isoteneurs est de mettre en évidence les anomalies géochimiques, de les localiser géographiquement et de les corréler avec l'environnement géologique.

D'après les distributions des éléments ainsi que les études des corrélations et les digrammes de dispersion faites, huit éléments chimiques entre autres le manganèse, le molybdène, le plomb, l'uranium, le tungstène, le vanadium, l'yttrium et zinc ont plus de corrélations. Ainsi, nous allons voir leurs courbes d'isoteneurs de ces éléments pour mieux décerner leurs localisations de la forte anomalie dans la zone d'études.

V.3.1. LE MANGANESE

CARTE D'ISOTENEUR EN MANGANESE



VUE EN 3D

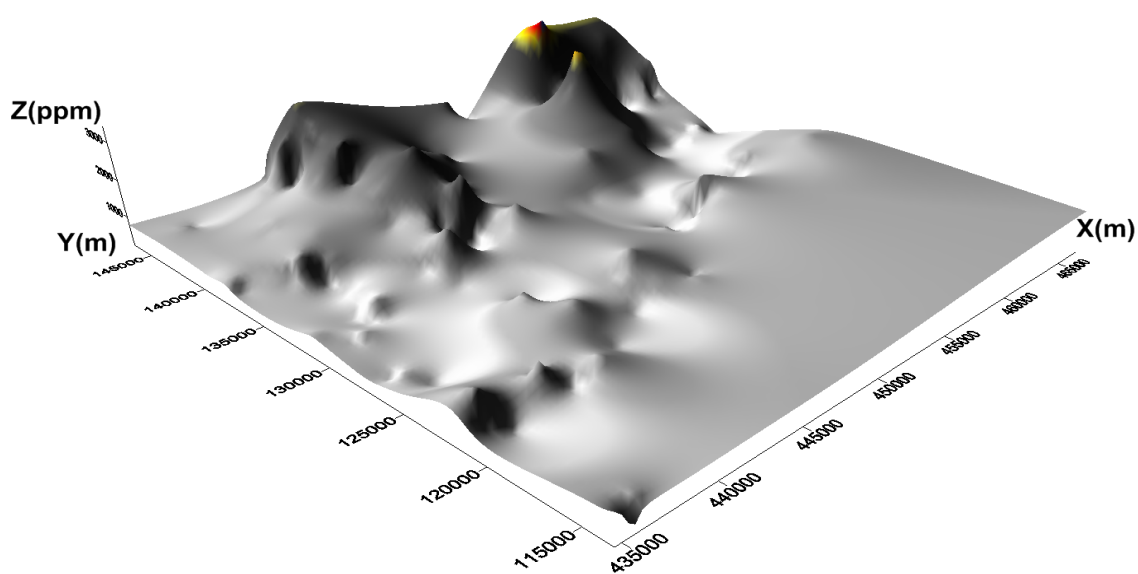
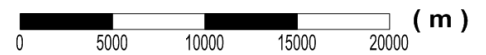
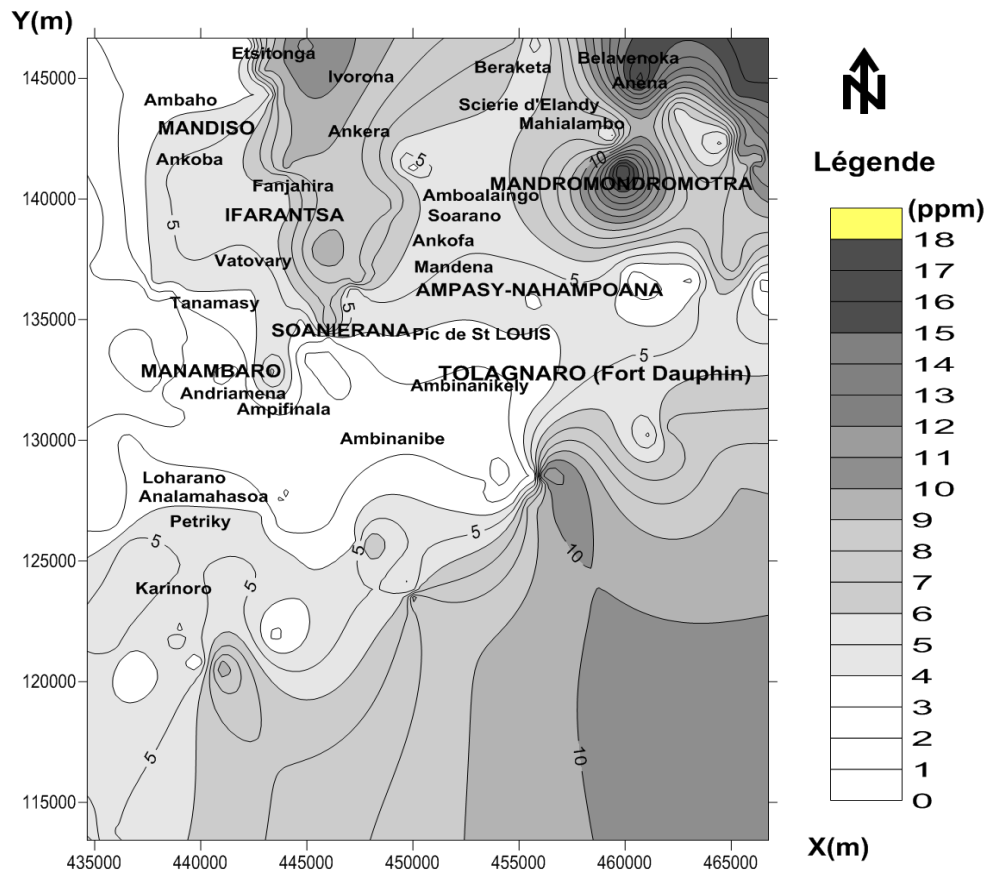


Figure 26: Carte d'isoteneur en Manganèse.

V.3.2. LE MOLYBDENE

CARTE D'ISOTENEUR EN MOLYBDENE



VUE EN 3D

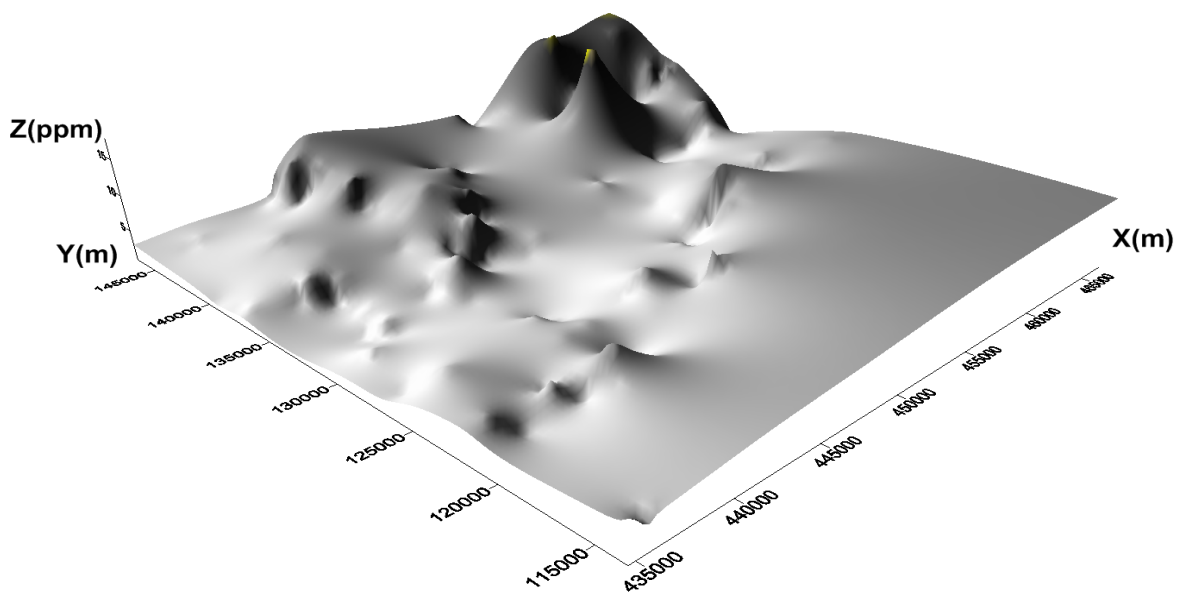
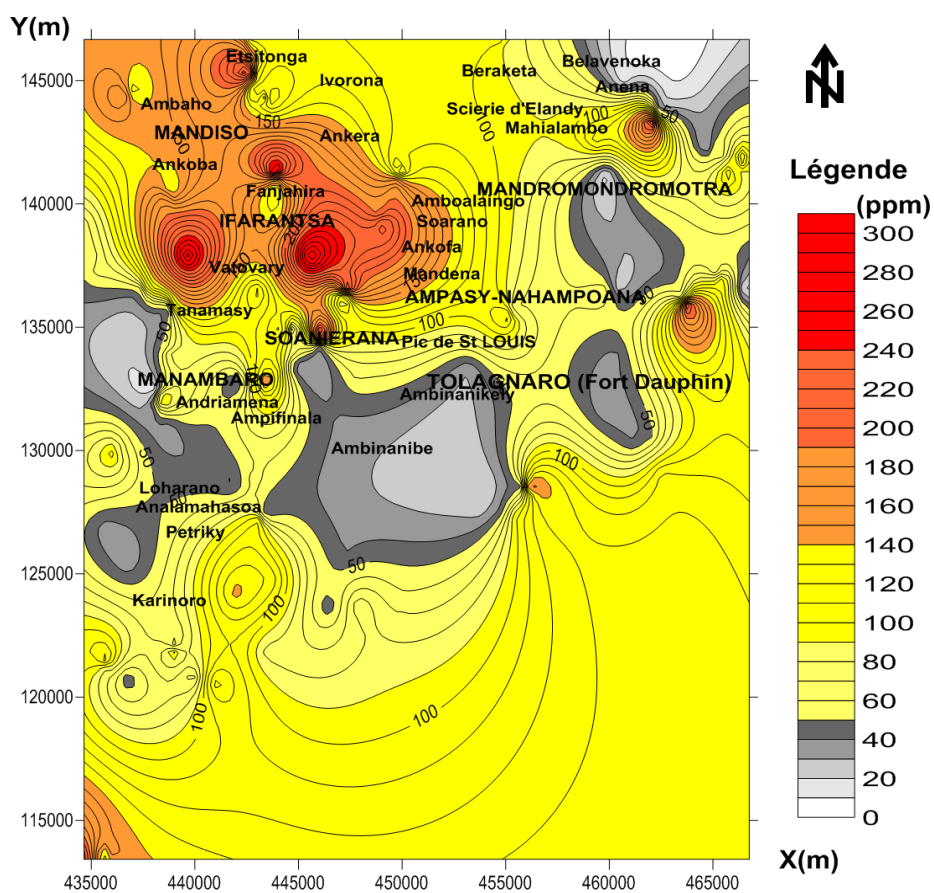


Figure 27: Carte d'isoteneur Molybdène.

V.3.3. LE PLOMB

CARTE D'ISOTENEUR EN PLOMB



VUE EN 3D

0 5000 10000 15000 20000 (m)

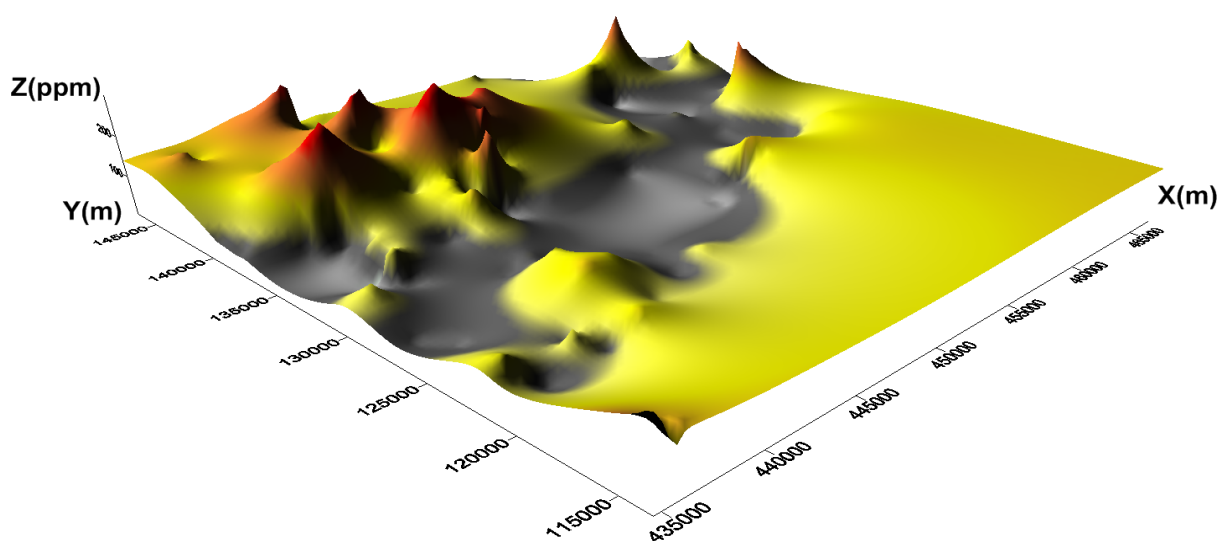


Figure 28: Carte d'isoteneur en Plomb.

V.3.4. LE TUNGSTENE

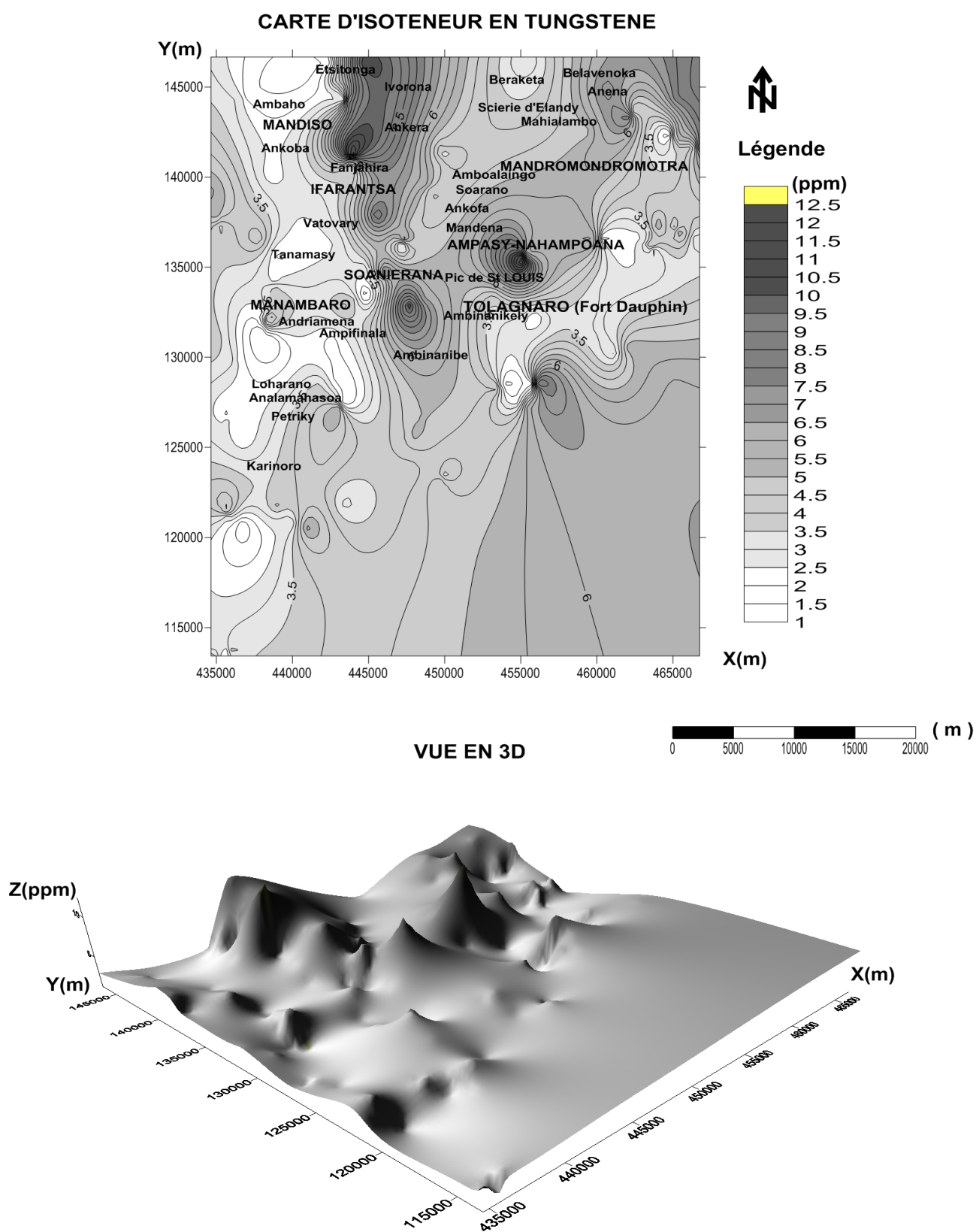
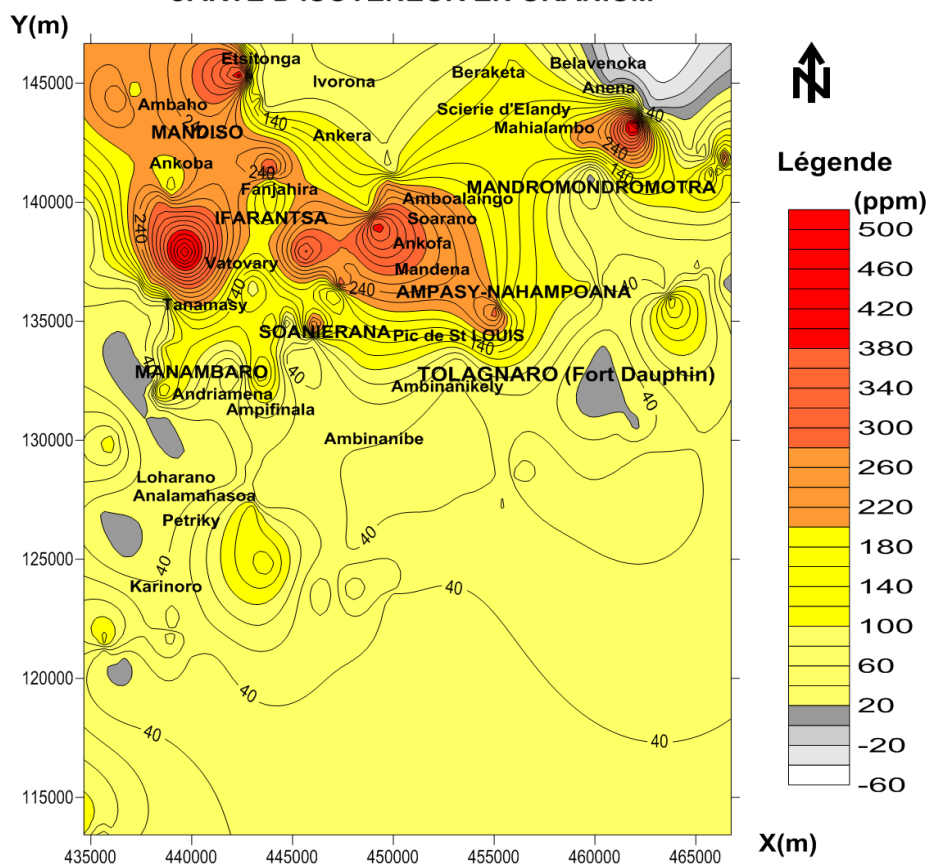


Figure 29: Carte d'isoteneur en Tungstène.

V.3.5 L'URANIUM

CARTE D'ISOTENEUR EN URANIUM



VUE EN 3D

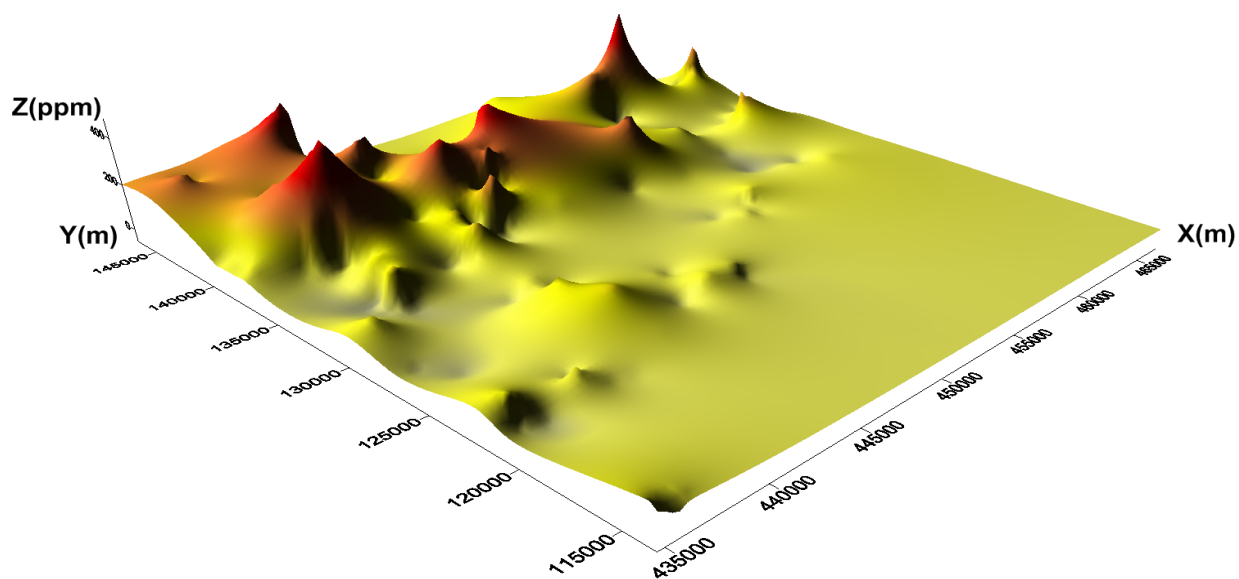
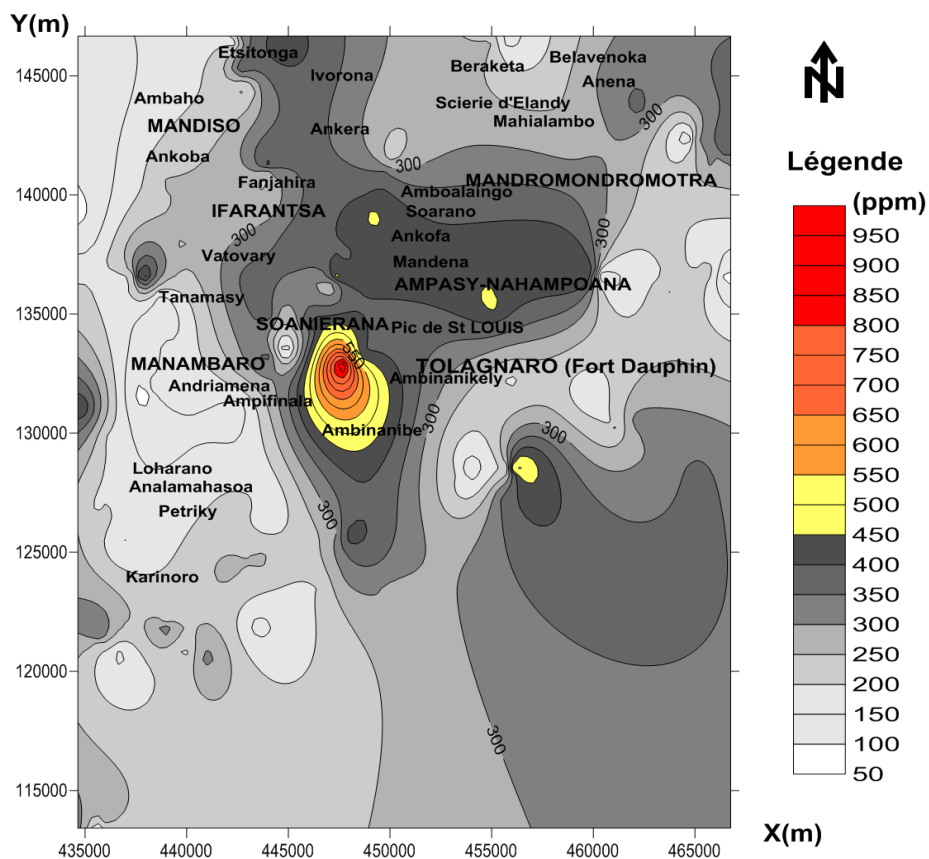


Figure 30: Carte d'isoteneur en Uranium.

V.3.6. LE VANADIUM

CARTE D'ISOTENEUR EN VANADIUM



VUE EN 3D

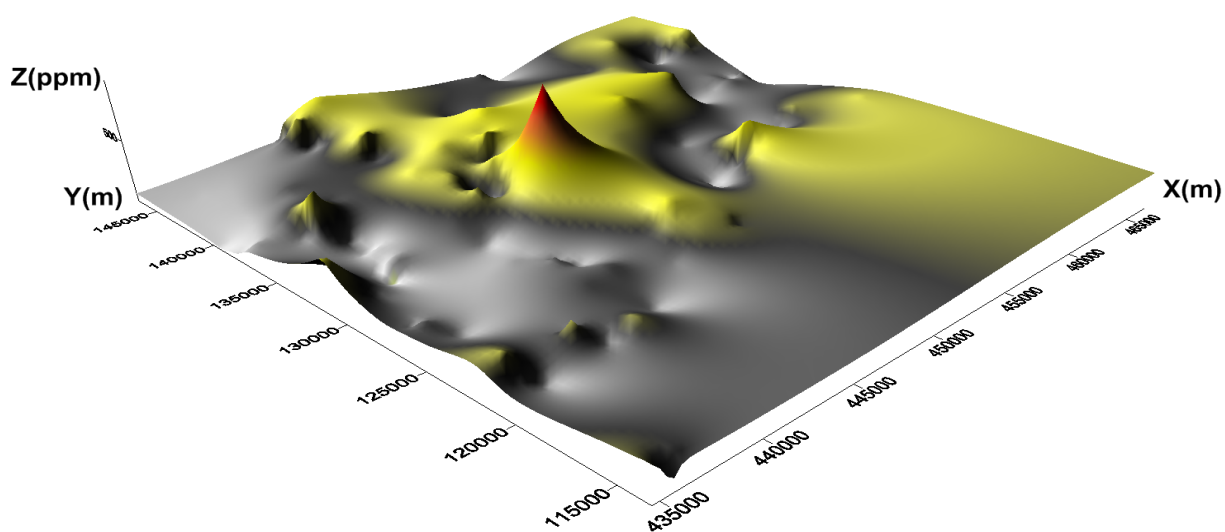
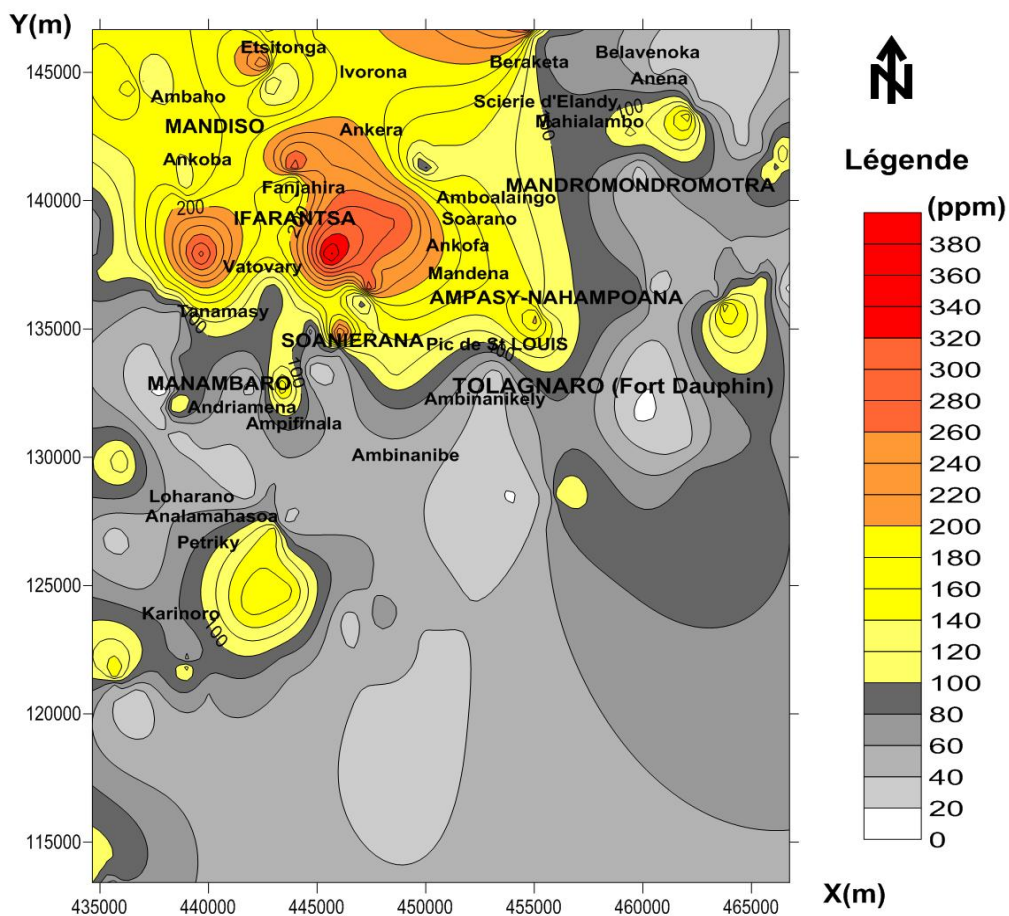


Figure 31: Carte d'isoteneur en Vanadium.

V.3.7. L'YTTRIUM

CARTE D'ISOTENEUR EN YTTRIUM



VUE EN 3D

0 5000 10000 15000 20000 (m)

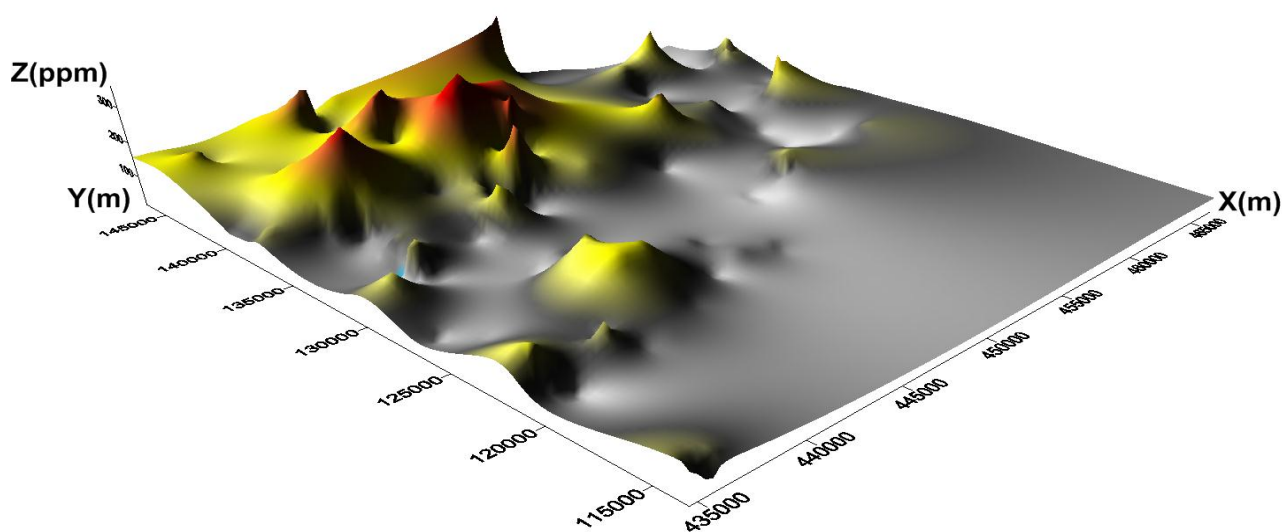
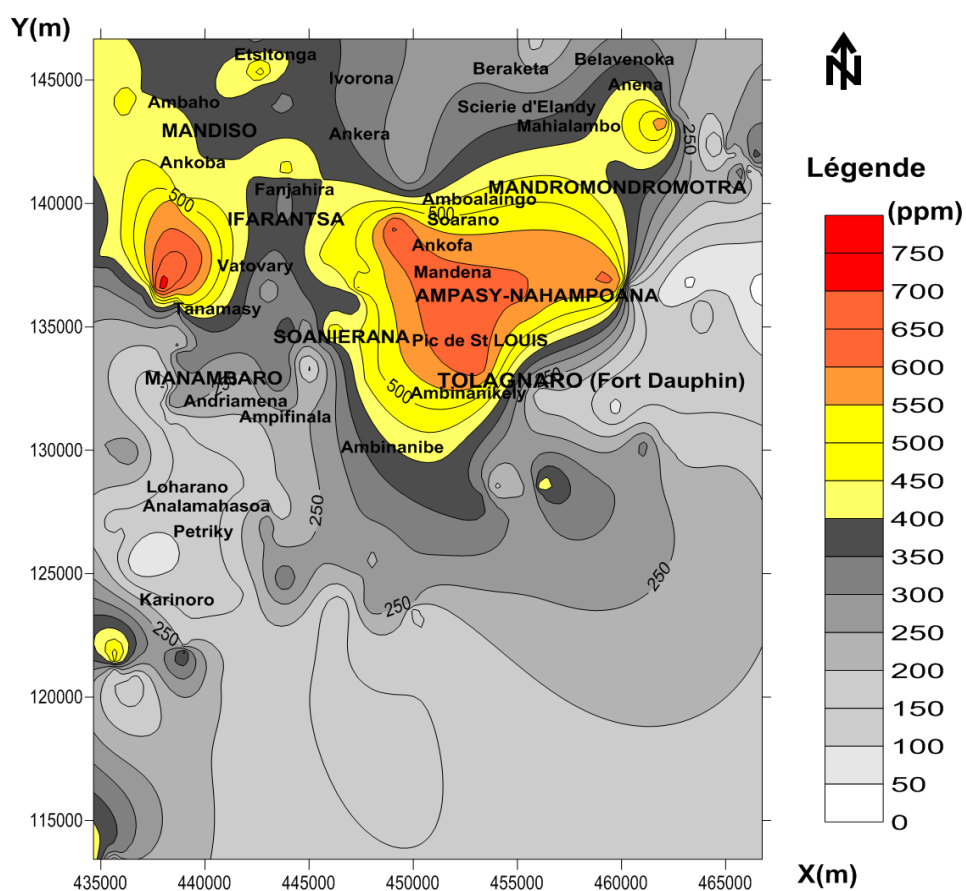


Figure 32: Carte d'isoteneur en Yttrium.

V.3.8. LE ZINC

CARTE D'ISOTENEUR EN ZINC



VUE EN 3D

0 5000 10000 15000 20000 (m)

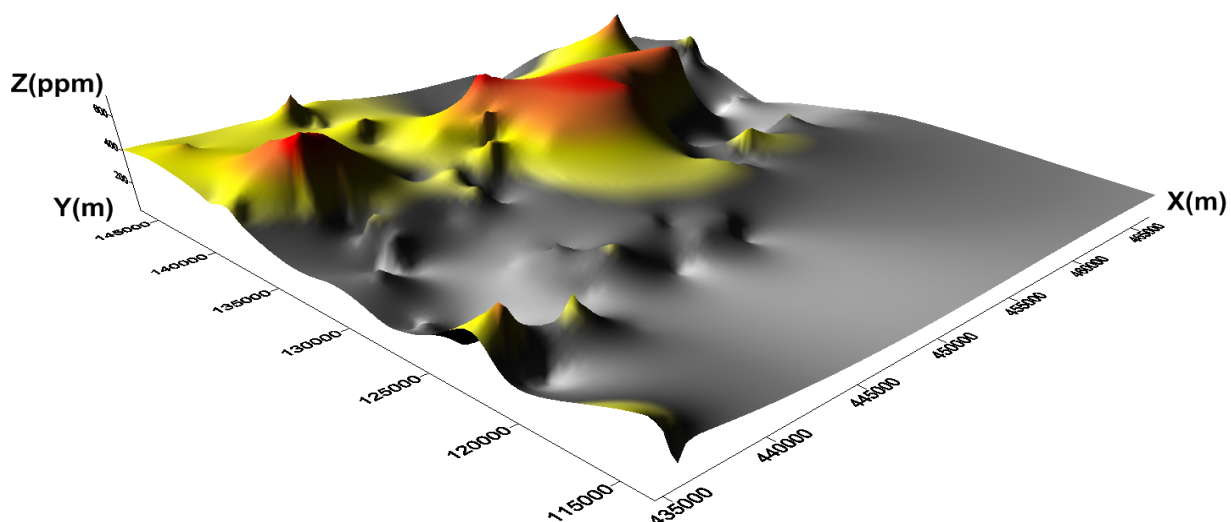


Figure 33: Carte d'isoteneur en Zinc.

Dans notre étude, la couleur qu'on a utilisée dans cette carte d'isoteneur de chacun des éléments chimiques dépend de la teneur de Clarke.

La teneur forte colorée en jaune au rouge est la teneur trois fois supérieure au Clarke. Tandis que la teneur moyenne colorée en blanc au gris foncé est la teneur inférieure ou égale au Clarke.

Le principe d'interprétation de ces cartes dépend de la teneur au Clarke de chaque élément : la couleur jaune au rouge signifie la plus grande teneur d'élément et la teneur très forte concentration en élément. La couleur blanc au gris foncé marque la teneur moyenne et moins abondance d'élément dans la zone.

Ainsi la teneur au Clarke joue le rôle très important pour déterminer l'anomalie géochimique de ces éléments dans la zone d'étude. (Voir l'annexe pour la teneur de Clarke).

✓ **Le Manganèse** (figure 26) : Le Manganèse est un élément chimique de symbole Mn et de numéro atomique 25. Il fait partie des éléments lithophiles. C'est un métal de transition.

La concentration supérieure est représentée par la couleur jaune qui se manifeste dans la mineur partie Nord Est tandis que la concentration minimale domine presque dans la zone qui est colorée en gris clair et gris foncé.

Et d'après les calculs statistiques ont démontré que sa teneur moyenne varie de 200 ppm à 3600 ppm. Ces teneurs sont très importantes par rapport au Clarke qui est de 1000 ppm, alors, le manganèse a une teneur d'exploitabilité intéressante pour la Région de Fort Dauphin. .

✓ **Le Molybdène** (figure 27): Le molybdène est un élément chimique de symbole Mo et de numéro atomique 42. Il fait partie des éléments sidérophiles. C'est un métal de transition, pur et d'aspect blanc métallique.

La concentration supérieure est représentée par la couleur jaune qui se manifeste dans la partie Sud tandis que la concentration moyenne domine presque dans la zone d'étude qui est colorée en gris au gris foncé. La teneur supérieure en Molybdène est 19 ppm qui est supérieur au Clark qui est de 15 ppm. Alors le molybdène est moins rentable dans cette zone.

✓ **Le Plomb** (figure 28): C'est un élément chimique de symbole Pb et de numéro atomique 82. Il fait partie des éléments chalcophiles.

La teneur maximale en plomb se situe dans toute la partie de la zone, la forte concentration colorée en rouge se trouve dans les trois communes telles que la commune de Mandiso, la commune d'Ifarantsa et la commune de Soanierana. Sa teneur maximale est 320

ppm qui est strictement trois fois supérieur au Clark qui est de 16 ppm. Donc, on peut dire que le plomb est un élément très intéressant dans notre Zone d'étude. Il y a des gisements de plomb très exploitable dans cette zone.

✓ **Le tungstène** (Figure 29): C'est un élément chimique de symbole W et de numéro atomique 74. Il fait partie des éléments lithophiles.

A propos de Tungstène, les calculs statistiques ont démontré que sa teneur moyenne varie de 3 ppm à 12 ppm. Ces teneurs sont insuffisantes par rapport au Clarke qui est de 69 ppm, alors, il s'agit d'un simple indice.

✓ **L'Uranium** (figure : 30): L'Uranium, de symbole chimique U et de numéro atomique 92, est un métal lourd radioactif et se trouvant partout à l'état de trace, même dans l'eau de mer

La concentration supérieure est représentée par la couleur rouge qui se repartie dans toute la partie Nord de la zone d'étude c'est-à-dire dans les communes suivantes : Mandiso, Ifarantsa, Ampasy-Nahampoana et au nord de Mandromondromotra tandis que la concentration moyenne domine presque dans la zone qui est colorée en jaune claire au blanche. La teneur maximale en Uranium est 540 ppm qui est 100 fois supérieur au Clark dont elle est de 4 ppm. D'après cette figure, l'indice de l'Uranium dans cette zone est très important. Ainsi, on peut dire sans ambiguïté qu'il y a des grands gisements d'Uranium très intéressant dans notre zone d'étude.

✓ **Le Vanadium** (figure : 31) : Le Vanadium est un métal blanc, brillant, mou et ductile, de symbole V et de numéro atomique 23. . Il fait partie des éléments lithophiles.

D'après cette carte, la teneur supérieur en vanadium colorée en rouge est 1000 ppm qui est six fois supérieures au Clark est de 150 ppm. La concentration se situe dans la partie centrale de la zone d'étude. D'après ce fort indice, l'exploitation de vanadium est rentable dans les communes suivantes : Manambaro, Soanierana et Tolagnaro (Fort Dauphin).

✓ **L'Yttrium** (Figure 32): L'Yttrium de symbole chimique Y et de numéro atomique 39 est un élément de transition d'apparence métallique et classé parmi les terres rares, avec le scandium et les lanthanides.

La teneur moyenne est comprise entre 20 ppm et 100 ppm. Elle est repartie presque dans la majeure partie de la zone d'étude. Mais la teneur maximale en Y variant de 140 à 400 ppm

se trouve dans la partie Nord-Ouest de la carte c'est dire dans les trois communes tels que : la commune de Mandiso, la commune d'Ifarantsa et la commune d'Ampasy- Nahampoana. Elle est très supérieure au Clarke de l'élément. Alors l'exploitation de l'Yttrium dans notre zone d'étude est rentable.

✓ **Le Zinc** (Figure 33): C'est un élément chimique de symbole Zn et de numéro atomique 30. Il fait partie des éléments chalcophiles.

D'après cette carte, la teneur maximale en Zinc colorée en rouge est comprise entre 500 ppm à 800 ppm qui est très supérieures au Clark qui est 132 ppm. La concentration se situe dans la partie centrale et la Nord-Ouest de la zone d'étude, comme le vanadium, l'exploitation de Zinc est rentable dans les communes suivantes : Mandromondromotra, Ampasy-Nahampoana, Tolagnaro (Fort Dauphin) et Ouest de la commune d'Ifarantsa.

V.4.CARTE GEOLOGIQUE ET ELABORATION DES CARTES DES INDICES :

V.4.1. CARTES DES ECHATILLONS A VALEUR ANOMALES

On obtient les échantillons à valeurs anormales que l'on superpose sur la carte géologique numérisée. Sur la carte de la figure 34 sont représentées les échantillons à valeur anormale en : Pb, U et Y (indices en très forte corrélation). Sur la carte de la figure 35 sont représentées les échantillons à valeur anormale en Mn, Mo, W, V et Zn (indices en forte corrélation), tandis que sur la figure 36 sont représentées les échantillons à valeur anormale en Mn, Mo, Pb, W, U, V, Y et Zn.



LEGENDE

- Chef lieu Communes
 - Chef lieu District
 - Lac et rivière
- ### STRUCTURALES
- Faïlle supposée ou marquée
 - Faïlle
 - Mylonite
 - Schistosité
 - Structure anticlinale
 - Structure synclinale
 - Pendages

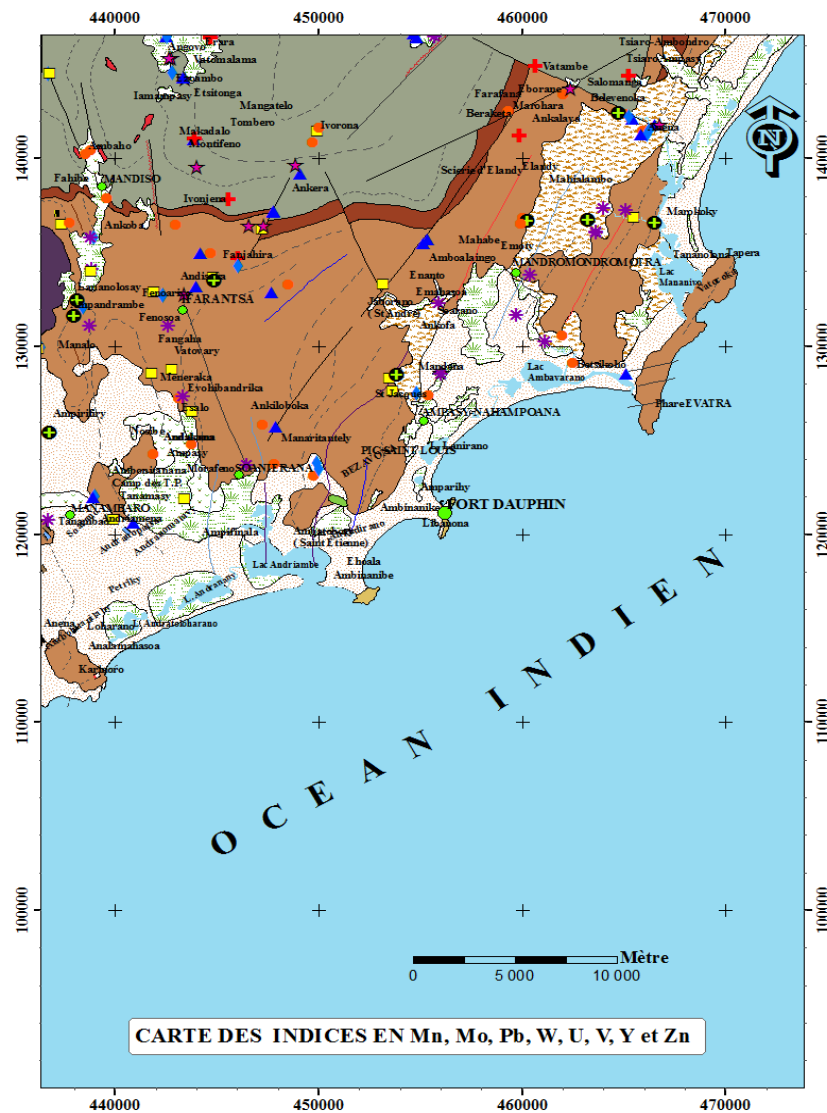
INDICES

- ⊕ Mn
- ✱ Mo
- ◆ W
- ▲ V
- ✚ Zn

LITHOLOGIQUES

- Alluvions aciennes
- Alluvions récentes
- Couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites.
- Couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite)
- Couches de Tranomaro: Gneiss à pyroxène et cordiérite, pyroxénite
- Granite calco- alcalin porphyroïde et charnockyte des chaines anosyennes à septa de gneiss à biotite et amphibolites
- Grès oliotiques
- Grès quaternaire à stratifications entrecroisées
- Néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites
- Sables dunaires et dépôts d'embouchure

Figure 35: Catre des indices en forte corrélation.



LEGENDE

- Chef lieu Communes
- Chef lieu District

Lac et rivière

STRUCTURALES

- Faille supposée ou marquée
- Faille
- Mylonite
- Schistosité
- Structure anticlinale
- Structure synclinale
- Pendages

INDICES

- ⊕ Mn
- ✱ Mo
- Pb
- ◇ W
- U
- ▲ V
- ✱ Y
- ✱ Zn

LITHOLOGIQUES

- Alluvions anciennes
- Alluvions récentes
- Couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites.
- Couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite)
- Couches de Tranomaro: Gneiss à pyroxène et cordiérite, pyroxénite
- Granite calco- alcalin porphyroïde et charnockyte des chaînes anosyennes à septa de gneiss à biotite et amphibolites
- Grès olistiques
- Grès quarternaire à stratifications entrecroisées
- Néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites
- Sables dunaires et dépôts d'embouchure

Figure 36: Carte des indices en Mn, Mo, Pb, W, U, V, Y et Zn.

V.4.5. INTERPRETATION DES CARTES DES INDICES

V.4.5.1. Pour les indices en très fortes corrélations

Le nombre des échantillons à valeurs anormales observées en Pb, U et Y (voir carte ci-dessus) est 105.

Sur Les 50 échantillons à valeur anormale en Plomb, 6 sont localisées dans la granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaines anosyennes, 23 sont localisées sur les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite), 10 sont délimitées par le néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites, 3 sont localisés sur les alluvions récentes et 8 sont portées par les sables dunaires.

Sur les 10 échantillons à valeur anormale en Yttrium, 2 sont localisées sur les alluvions récentes, 3 sont situées dans les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite) et 5 sont portées par la granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaines anosyennes.

Sur les 47 échantillons à valeur anormale observées en Uranium, 8 sont délimitées par la granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaines anosyennes, 2 sont localisées sur les couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites, 19 sont portées par les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite), 6 sont situées par le néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites, 5 et 7 sont localisées respectivement sur les sables dunaires et les alluvions récentes.

V.4.5.2. Pour les indices en fortes corrélations

Le nombre des échantillons à valeurs anormales observées en Mn, Mo, W, V et Zn (voir carte ci-dessus) est 177.

Sur les 26 échantillons à valeur anormale observées en Manganèse, 5 sont portées par les alluvions récentes, 10 sont localisées sur les Couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite), 7 sont localisées sur le néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites et 4 anomalies sont portée par les sables dunaires

Sur les 37 échantillons à valeur anormale observées en Tungstène, 3 sont localisées sur le granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaines anosyennes à septa de gneiss à biotite et amphibolites, 2 sont délimitées par les Couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites, 14 sont portées par les Couches de Fort-

Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite), 5 sont repérées par le néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites, 6 sont limitées par sables dunaires et dépôts d'embouchure, 6 sont cernées par les alluvions récentes et une est située par l'alluvion ancienne.

Sur les 32 échantillons à valeur anormale observées en Molybdène, 5 sont localisées sur le granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaînes anosyennes à septa de gneiss à biotite et amphibolites, une est repérée par les couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites, 15 sont limitées par les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite), 3 sont situées par le Néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites, 6 sont délimitées par les sables dunaires et dépôts d'embouchure et 2 sont circonscrits par les alluvions récentes.

Sur les 27 échantillons à valeur anormale observées en Vanadium, 5 sont localisées sur les alluvions récentes, 7 sont délimitées sur le granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaînes anosyennes à septa de gneiss à biotite et amphibolites, 2 sont situées par les couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites, 9 sont cernées par les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite), 2 et 2 sont délimitées respectivement par Néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites et les sables dunaires et dépôts d'embouchure.

Sur les 8 échantillons à valeur anormale observées en Zn, 4 et 5 sont localisées respectivement par le granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaînes anosyennes à septa de gneiss à biotite et amphibolites et par les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite).

CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DU TRAITEMENT DES DONNEES GEOPHYSIQUES

VI.1. RESULTATS DU TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITALES DE « FORT DAUPHIN » ET INTERPRETATIONS

L'objectif de ce travail vise à extraire des images satellitales, des informations géologiques et structurales afin de permettre une cartographie des unités lithologiques et linéaments majeurs de notre région (Fort Dauphin).

VI.1.1 LES TRAITEMENTS DES IMAGES SATELLITALES SOUS ERDAS 2011 ET ENVI 4.5.

VI.1.1.1. Résultats du traitement en fausses couleurs (compositions colorées):

Deux combinaisons tertiaires sont souvent utilisées comme premières images pour l'analyse ; il s'agit des compositions colorées dites :

- ✓ En couleurs naturelles ou vraies couleurs (432 RGB) en attribuant le rouge au canal rouge (TM4), le vert au canal vert (TM3) et le bleu au canal bleu (TM2) ;
- ✓ En pseudo-vraies couleurs (341 RGB) (Girard, 2004) qui s'obtient en attribuant le rouge à la bande TM3, le vert à la bande proche-infrarouge TM4 et le bleu à la bande TM1 et dont les couleurs ressemblent à celles détectées par l'œil humain. Cette dernière combinaison n'est pas retenue dans cette étude pour son faible apport contrairement à la première (432 RGB), souvent utilisée comme image de fond pour les débutants de télédétection, qui est d'une assez bonne qualité. [14]

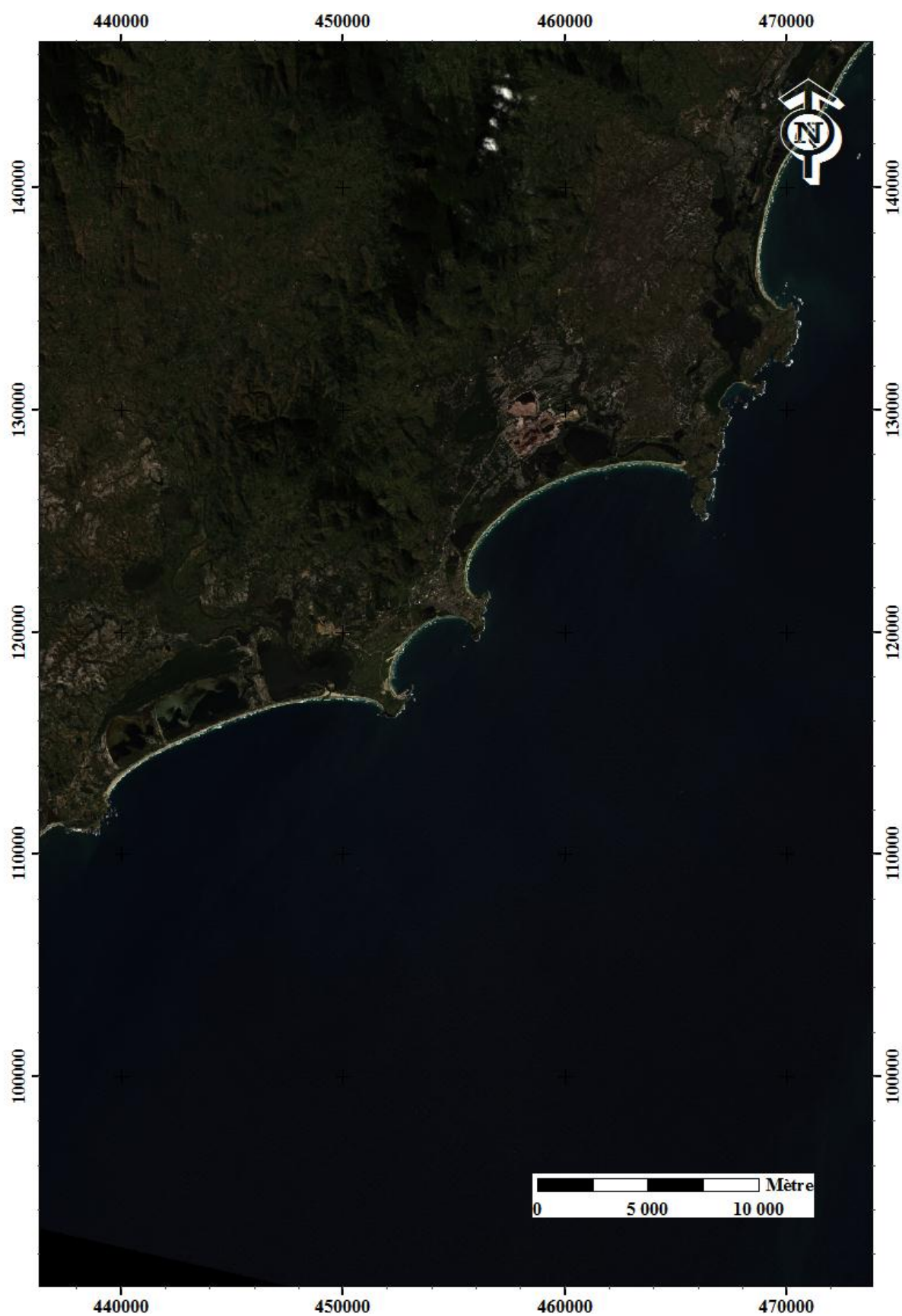


Figure 37: Scène en couleurs naturelles (432RGB).

✓ Les autres compositions sont dites en fausses couleurs. Pour en choisir les plus importantes, nous avons effectué une étude statistique en calculant le coefficient de corrélation des six bandes et leurs déviations standards (figure 22), à base desquels nous avons calculé l'« Optimum Index Factor, OIF » (voir page 69). Cette étude nous a permis, dans notre cas, de sélectionner les combinaisons suivantes : 753 – 752 – 543- 532 – 732 – 742 – 542 – 521– 721 (Tableau 27).

Compositions colorées	Bandes équivalentes	ΣS_k	$\Sigma /r_j/$	OIF
754	123	15237,9054	2,976926	5118,67120
753	124	15249,8987	2,0645877	7386,41360
752	125	16681,4624	2,740062	6087,98720
543	234	16180,1885	2,0884137	7747,59737
532	245	16192,1818	2,703564	5989,19863
751	126	14385,4537	2,861563	5027,13157
743	134	14941,2985	2,950188	5064,52421
732	145	16384,8556	2,747074	5964,47550
531	246	13896,1731	1,9752907	7035,00153
731	146	14088,8469	2,84331	4955,08645
542	235	16180,1885	2,781569	5816,92868
742	135	16372,8623	2,760493	5931,13703
541	236	13884,1798	2,872955	4832,71746
741	136	14076,8536	2,861616	4919,19725
521	256	15327,7368	2,749497	5574,74215
432	345	11074,2379	2,819039	3928,37342
721	156	15520,4106	2,734666	5675,43187
431	346	13587,573	2,88516	4709,46948
321	456	15031,13	2,795452	5376,99448
421	356	15019,1367	2,794197	5375,11732

Tableau 27: facteur d'indice optimum à partir de toutes les combinaisons possibles des six bandes dans la région d'étude.

Parmi les compositions en fausses couleurs retenues à partir du calcul de l'OIF, nous nous sommes limités à deux images seulement, permettant la différenciation du plus grand nombre de formations :

- Les images 543 et 743 sont écartées en raison de la prépondérance de la teinte rouge à grenat sur l'ensemble du terrain, rendant difficile la distinction de la limite couche-couverture. Néanmoins, les formations de granites et charnockites d'anosyen se discernables en couleur rouge, et les dunes des sable en grenat.

- Les compositions colorées 753 et 752, en dépit de leur OIF élevé, fournissent des réponses spectrales très proches ce qui se traduit par une homogénéité des couleurs des formations.

- La meilleure des compositions colorées est la 754 RGB (le rouge et vert attribué respectivement aux canaux moyen-infrarouge 7 et 5, et le bleu au canal proche-infrarouge 4) (figure 38), qui fait apparaître la dominance de la couleur verte dans toute les formations, les granites et charnockites d'anosyen en vert clair avec intrusion de formation en couleur blanc et les formations meubles telles que les alluvions, les sables dunaires en vert orangé et violacé.

L'utilisation des traitements en compositions colorées nous ont permis, non seulement la bonne discrimination des différentes formations figurants dans la carte géologique de BAZOT G. et al., (1972), couvrant la région de Fort Dauphin, mais également une mise à jours de celle-ci. En fait, les réponses spectrales nous révèlent l'existence d'un affleurement - d'une plusieurs de kilomètres- de la série métamorphique de la région. [14]

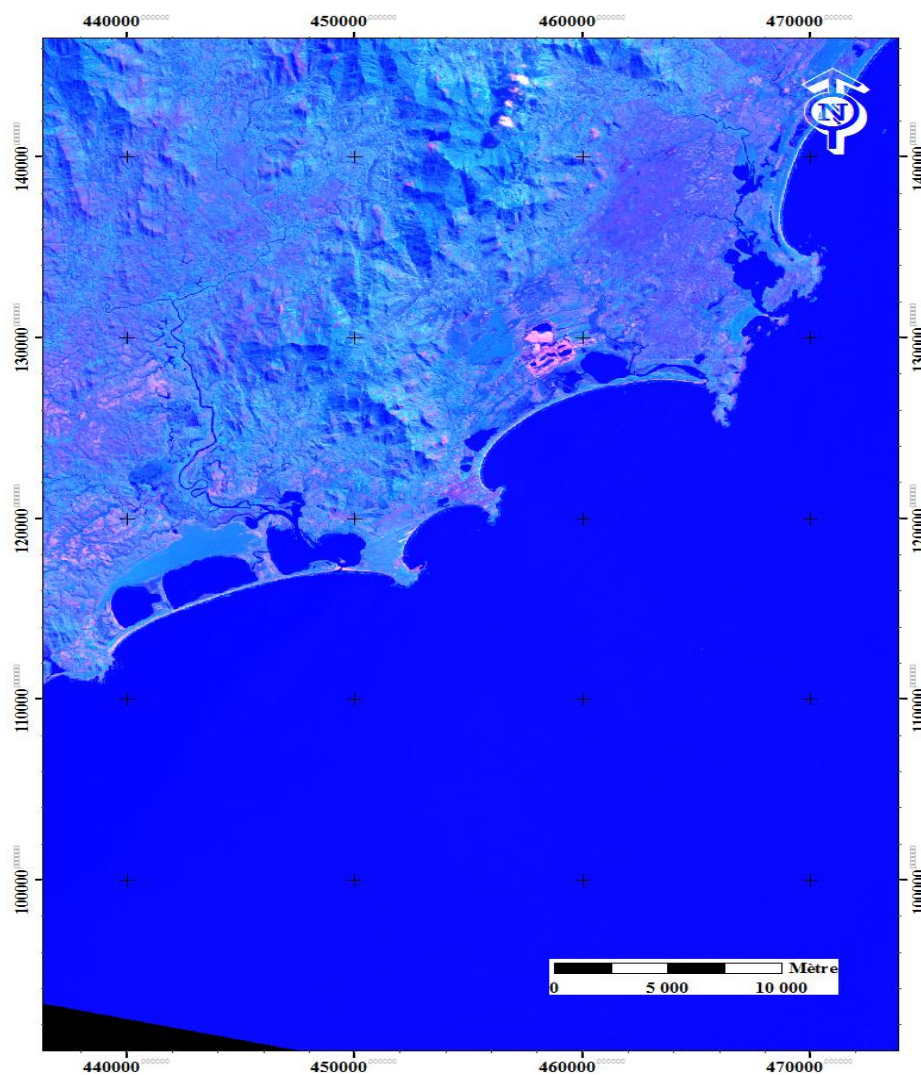


Figure 38: Discrimination lithologique en composition colorée 752 et 753 RGB.

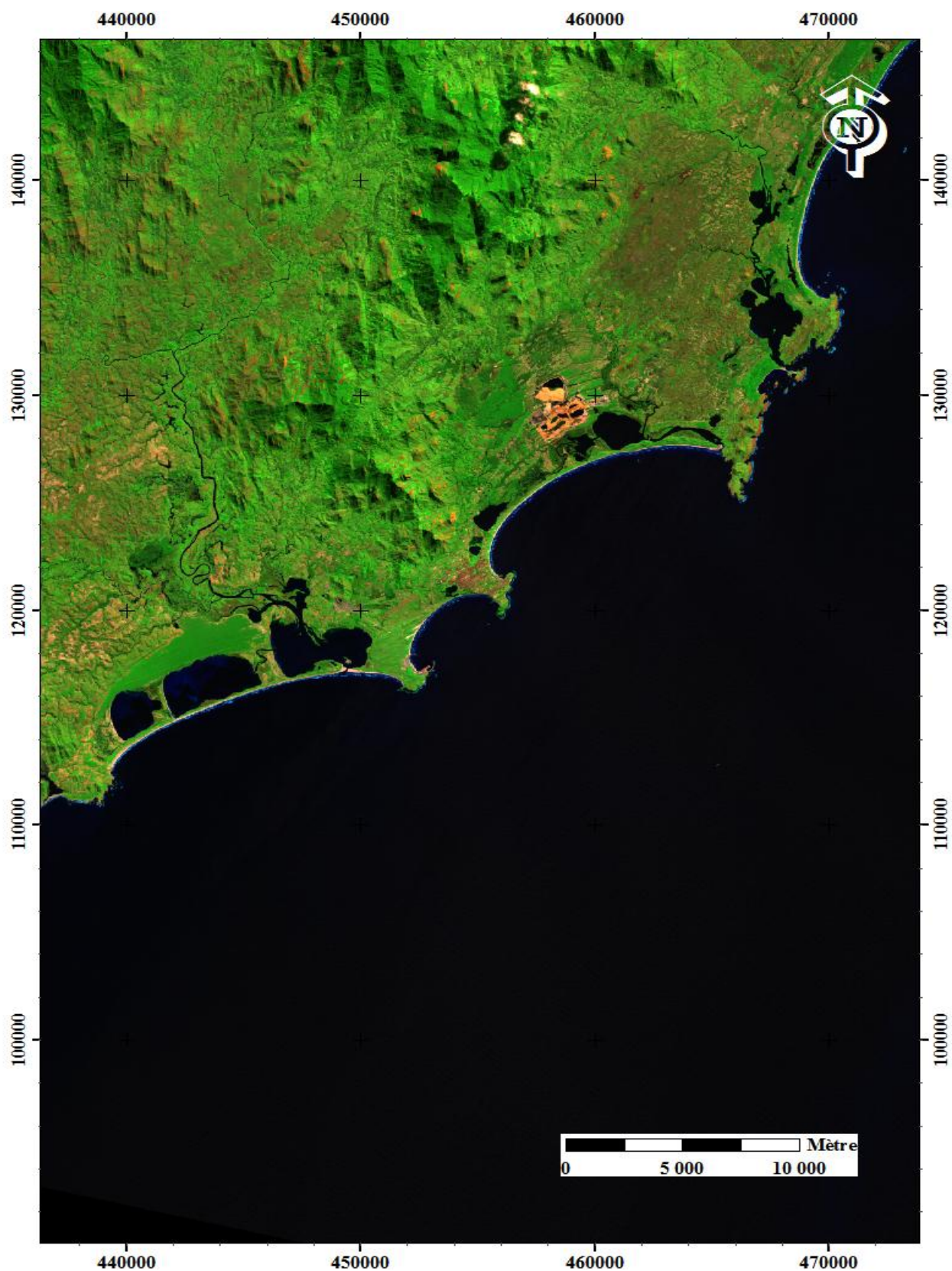


Figure 39: Discrimination lithologique en composition colorée 754 RGB.

VI.1.1.2. Résultats de l'analyse en composantes principales :

Dans notre étude, nous avons appliqué cette technique, largement employée en télédétection, aux différents domaines spectraux en vue de condenser l'information répartie dans les nombreuses bandes spectrales de notre scène TM de Landsat.

-Dans le domaine du visible, pour les bandes TM 1, 2 et 3, nous avons obtenu les néo-bandes CPv 1, 2 et 3. La composition colorée générée à partir de ces trois composantes principales est identique à la 321 RGB. [17]

-Dans le domaine mixte, pour les bandes 7, 3 et 1, la composition colorée issue des trois composantes principales est analogue à la 742 RGB.

-Dans l'infrarouge proche à moyen, la composition colorée résultant de la CP 1, 2 et 3 des bandes TM 4, 5 et 7 est la même que la 754 RGB représentée par la figure 36.

-Mais il s'avère que la composition colorée (CP1, CP2, CP3) RGB générée à partir des Six bandes TM 1, 2, 3, 4, 5 et 7 est la meilleure pour l'interprétation géologique. Elle rassemble en une seule image optimisée 90%, voir plus, de la variance (l'information) contenue dans les fichiers images originaux, et fournit une composition colorée nette qui permet la discrimination des différentes unités lithologiques. [14]

VI.1.1.3. Résultats du traitement par band ratios :

Le calcul des rapports de bandes, en prenant les moins corrélables, a permis de réaliser de nouvelles compositions colorées. Dans le cas de Fort Dauphin, les compositions qui nous ont fournis les meilleurs résultats sont : la (5/7, 5/1, 5/4) RGB et la (7/3 ; 5/2 ; 4/3) RGB.

L'image obtenue en fausses couleurs à partir des rapports de bandes 5/7, 5/1 et 5/4 RGB (figure 41) est d'une excellente qualité. [14]

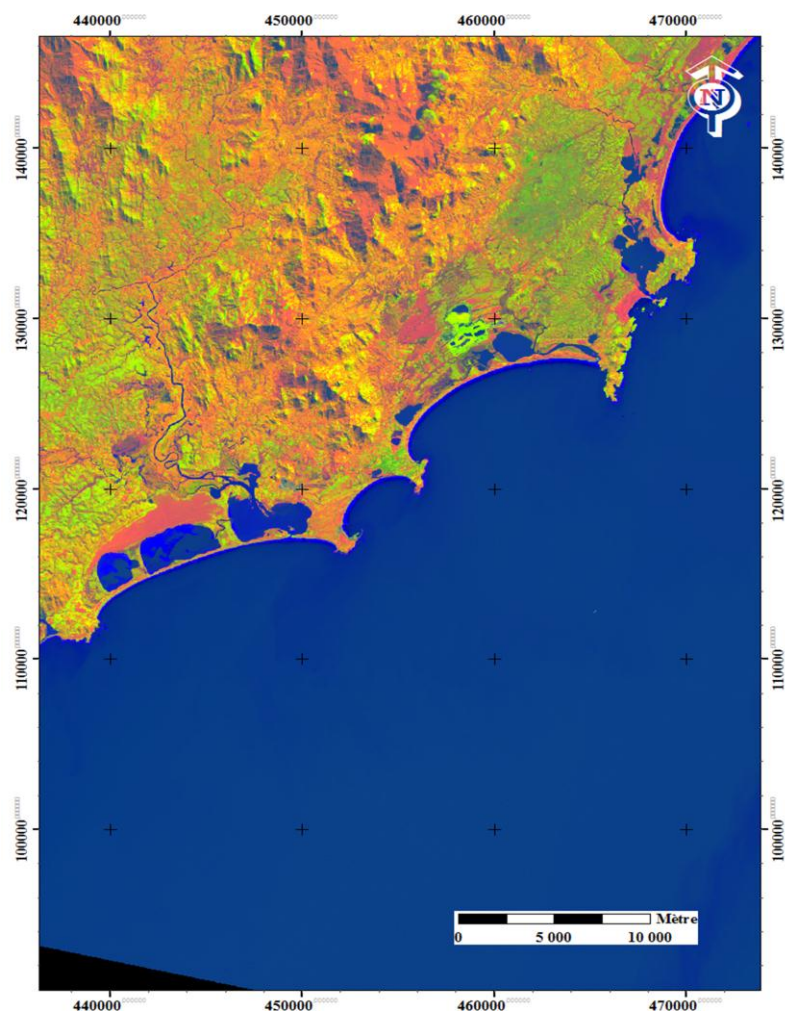


Figure 40: Image RGB obtenue avec les néobandes issues des rapports 5/2, 7/3 et 4/7

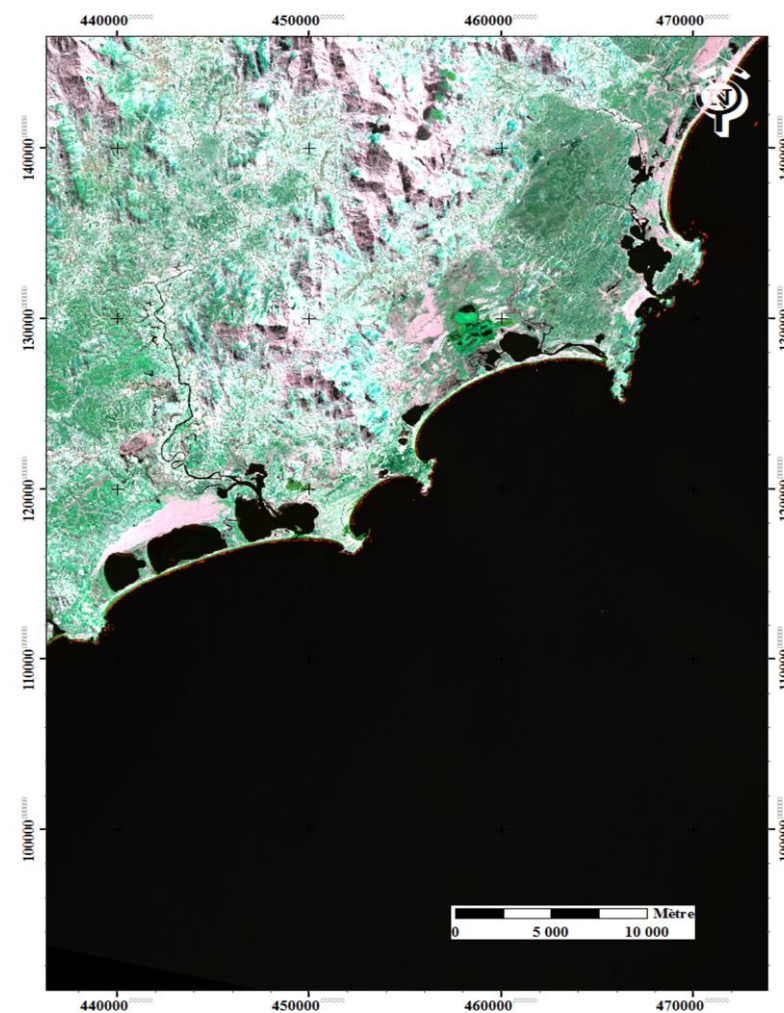
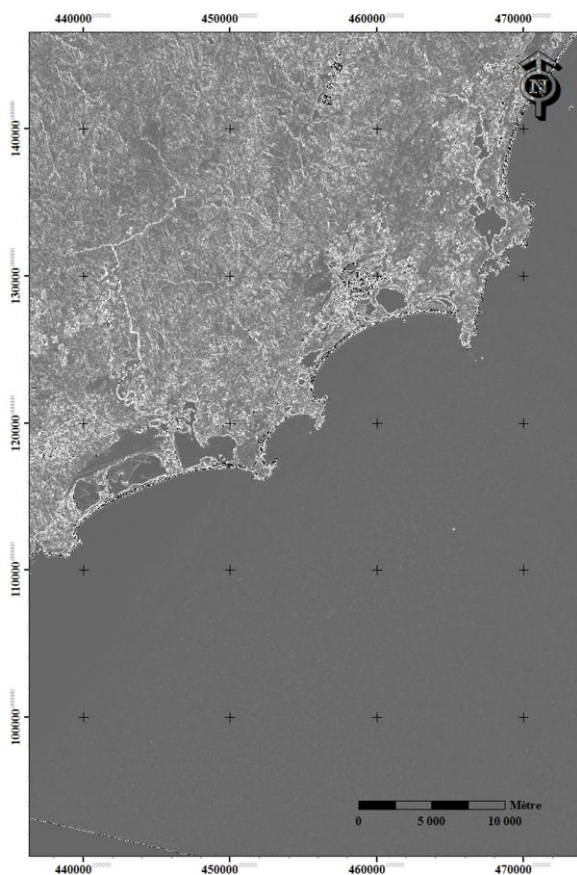


Figure 41: Image RGB obtenue avec les néobandes issues des rapports 5/7, 5/1 et 5/4.

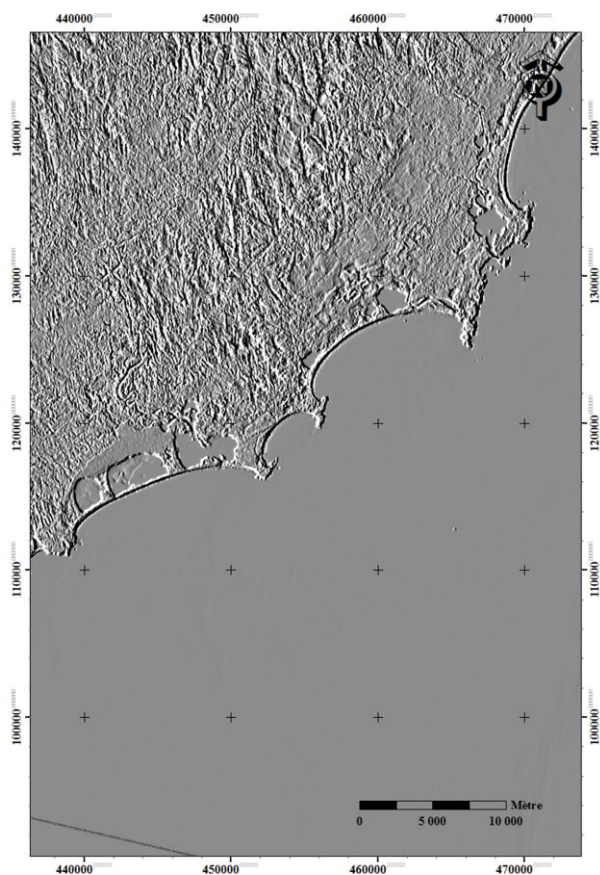
VI.1.1.4. Résultats du traitement par filtrage

Pour les données habituelles d'observation de la Terre provenant des satellites Spot et Landsat, etc. la plupart des informations (au moins 90%) se retrouvent dans la CP1. De ce fait, nous avons choisi d'appliquer le filtrage à cette première composante principale. [12]

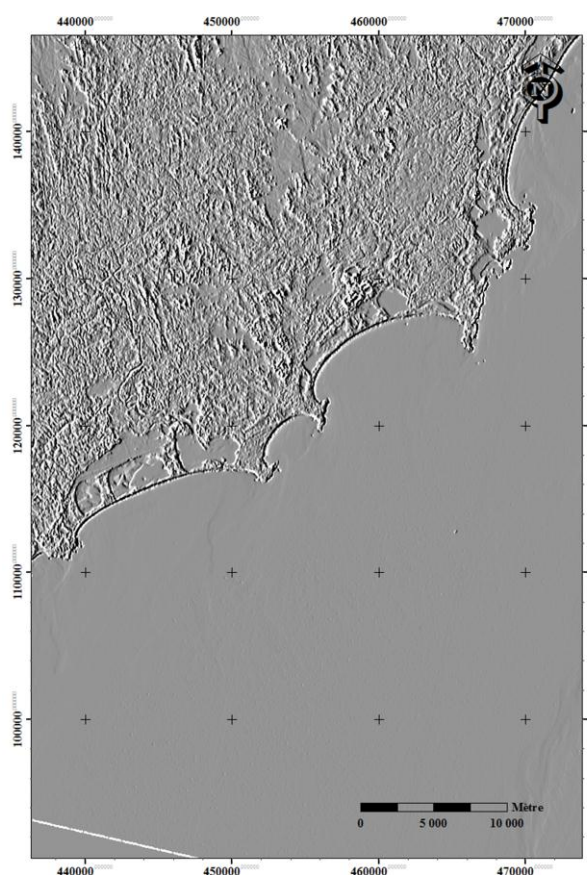
L'image résultant de l'application du filtre Sobel (figure 37a) permet une bonne perception des contours des différentes formations et des grands accidents tectoniques qui les affectent. Pour le filtrage directionnel (figure 42 b, c et d), le rehaussement a été effectué dans plusieurs directions (0° , 10° , 45° , 70° , 90° , 135° , 120° , 160°) mais seuls $\alpha = 0^\circ$, $\alpha = 10^\circ$ et $\alpha = 120^\circ$ ont été retenus à cause de leur meilleure mise en relief des discontinuités radiométriques (fort contraste obtenus sur les images). Une participation de 5% de l'image originale dans l'image produite, et une fenêtre de convolution de 5x5 ont été jugées les plus convenables à notre étude; permettant de voir le maximum de détails structuraux. [12]



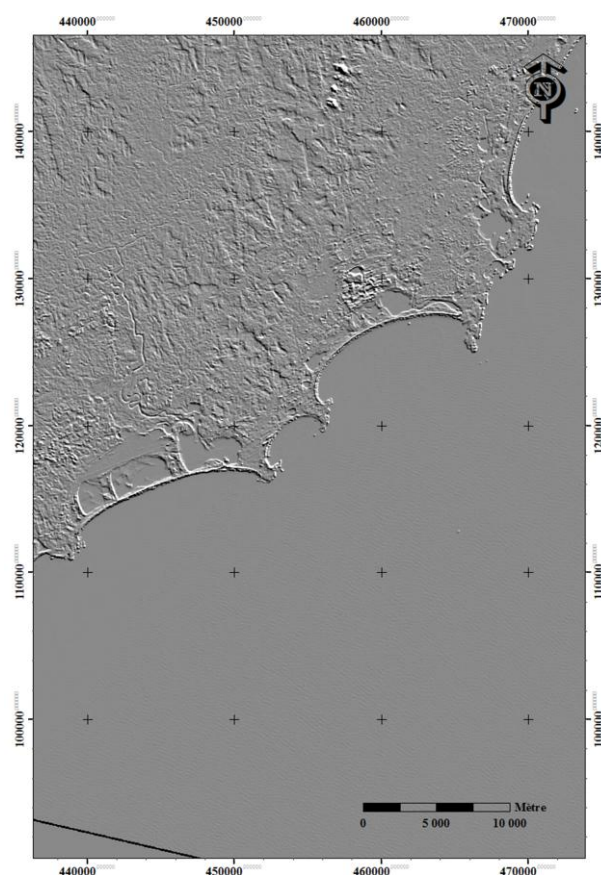
(a) Filtre Sobel



(b) Filtre Directionnel 00° à matrice 5x5



(c) Filtre Directionnel 10° à matrice 5x5



(d) Filtre Directionnel 120° à matrice 5x5

Figure 42: Différents filtres appliquées à la première composante principale CP1.

VI.1.2. CARTOGRAPHIE LINEAMENTAIRE :

Les images issues des traitements par les filtres directionnels sont ensuite importées dans ArcGis pour dresser une carte linéamentaire de la région d'étude. Celle qui fait ressortir le plus de discontinuités images est la CP1 traitée par le filtre directionnel 00° à matrice 5x5. Elle permet de déterminer des linéaments tracés comme étant des filons, panneaux, dykes et failles incluant, entre autre, tous les accidents signalés par Bazot et al., (1958) qui ressortent de manière très claire. L'analyse de cette carte linéamentaire indique une direction majeure subméridienne. [24]

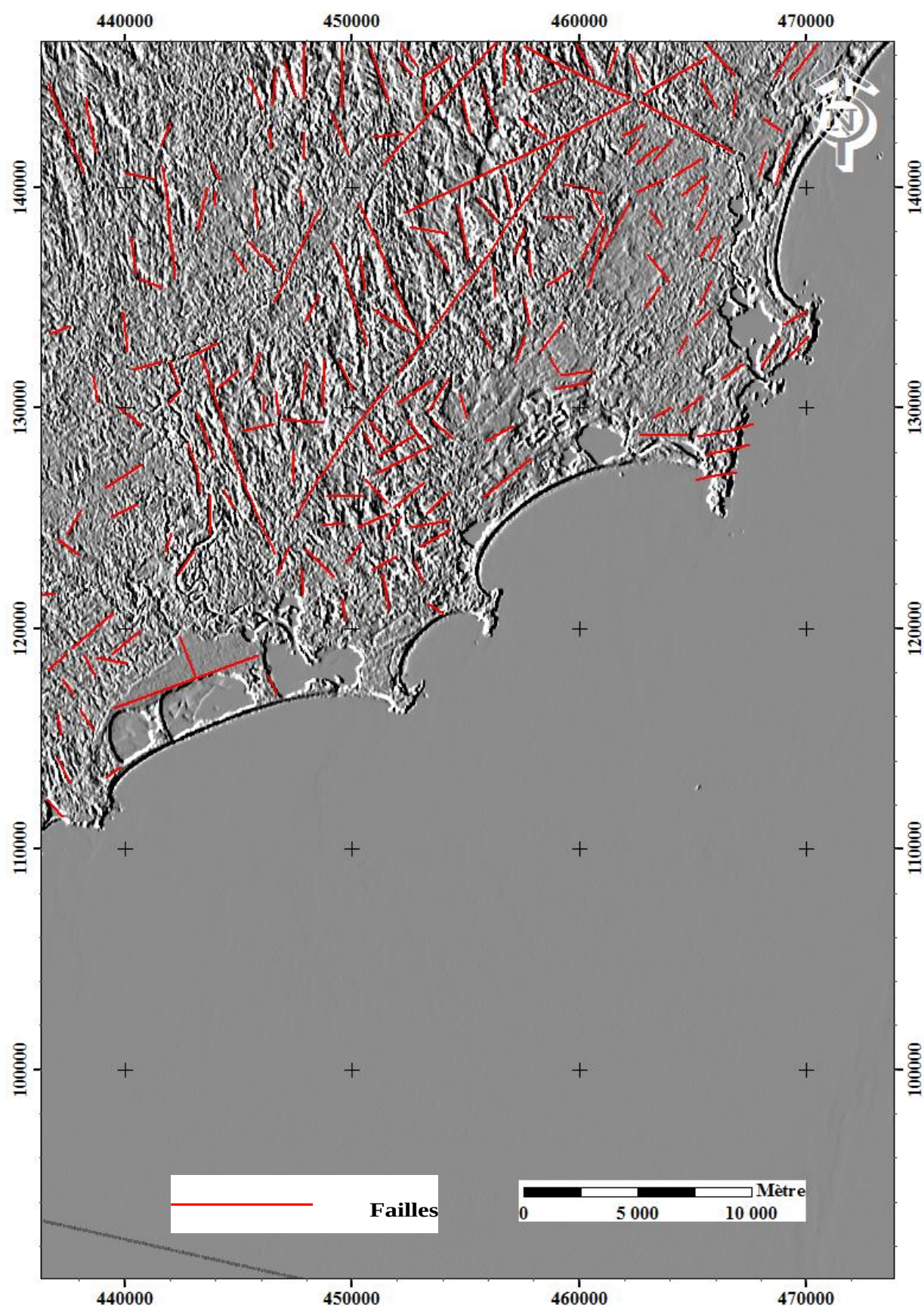


Figure 43: Carte linéaire au 1/100 000 de la région de Fort Dauphin (filtre directionnel 00°).

VI.1.3. ORIENTATION ANALYSE STATISTIQUE DE LA CARTE LINEAMENTAIRE

VI.1.3.1. Résultats du traitement avec ARCGIS 10 :

A l'issue de l'introduction de la carte linéamentaire obtenue par le filtre directionnel (00°) dans ArcGIS (figure 38), on a pu déterminer plus de 191 linéaments de tailles variables. Le tableau 28 résume les résultats obtenus sur la distribution des linéaments. [14]

Ces valeurs indiquent que les directions dominantes dans cette carte linéamentaire sont les directions entre N150 à N160 et N170 à N180 (Sud Est ou Nord-Ouest) et de même pourcentage 13,61%.

Angle en degré	Nombre de linéaments	Pourcentage(%)
[0 – 10[	4	2,09
[10 – 20[	9	4,71
[20 – 30[	14	7,33
[30 – 40[	14	7,33
[40 – 50[	15	7,85
[50 – 60[	13	6,81
[60 – 70[	9	4,71
[70 – 80[	6	3,14
[80 – 90[	9	4,71
[90 – 100[	2	1,05
[100 – 110[	4	2,09
[110 – 120[	2	2,05
[120 – 130[	6	3,14
[130 – 140[	9	4,71
[140 – 150[	11	5,76
[150 – 160[	26	13,61
[160 – 170[	12	6,28
[170 – 180[	26	13,61

Tableau 28: Synthèse des résultats du calcul sous Matlab R2013a, montrant la distribution de l'orientation des linéaments de la carte linéamentaire (filtre 00°) obtenue par ArcGIS.

[0 - 10°[	[10 - 20°[	[20 - 30°[	[30 - 40°[	[40 - 50°[	[50 - 60°[	[60 - 70°[	[70 - 80°[	[80 - 90°[	[90 - 100°[	[100 - 110°[	[110 - 120°[	[120 - 130°[	[130 - 140°[	[140 - 150°[	[150 - 160°[	[160 - 170°[	[170 - 180°]
N2	N13	N22	N32	N42	N52	N63	N76	N83	N97	N101	N112	N125	N131	N141	N151	N161	N171
N5	N15	N22	N33	N42	N53	N63	N77	N83	N99	N101	N119	N125	N132	N141	N152	N162	N172
N7	N15	N23	N33	N43	N56	N63	N77	N84		N103		N125	N133	N141	N152	N163	N173
N8	N15	N24	N34	N45	N56	N64	N77	N86		N104		N125	N137	N141	N152	N163	N173
	N16	N24	N35	N46	N57	N64	N78	N89				N127	N139	N141	N153	N165	N173
	N17	N25	N35	N46	N57	N68	N79	N90				N130	N139	N145	N153	N165	N173
	N19	N26	N35	N47	N58	N68		N91					N139	N145	N153	N166	N173
	N19	N26	N35	N47	N58	N69		N91					N140	N146	N153	N167	N174
	N20	N27	N38	N47	N58	N70		N91					N140	N149	N153	N167	N174
		N28	N39	N48	N58									N149	N153	N167	N174
		N29	N39	N48	N60									N150	N153	N169	N174
		N29	N40	N48	N60										N154	N170	N175
		N30	N40	N50	N61										N154		N176
		N31	N41	N50											N156		N177
				N51											N156		N177
															N158		N177
															N159		N179
															N159		N180
															N159		N180
															N159		N180
															N159		N180
															N159		N180
															N159		N180
															N160		N180
															N160		N180

Tableau 29: direction des linéaments.

VI.1.3.2. La rosace de direction tracée avec le logiciel Rose.net

Analyse statistique de la carte linéamentaire :

Les néo-données résultant du calcul sous Matlab R2013a ont été ensuite utilisées pour tracer les rosaces de direction. L'étude du diagramme de fréquence (figure 44) confirme l'existence des deux directions majeures déjà signalées et l'importance des accidents méridiens par rapport aux autres linéaments.

Le logiciel Rose net 0.10 permet de réaliser un rose diagramme (figure 39) montrant ces valeurs :

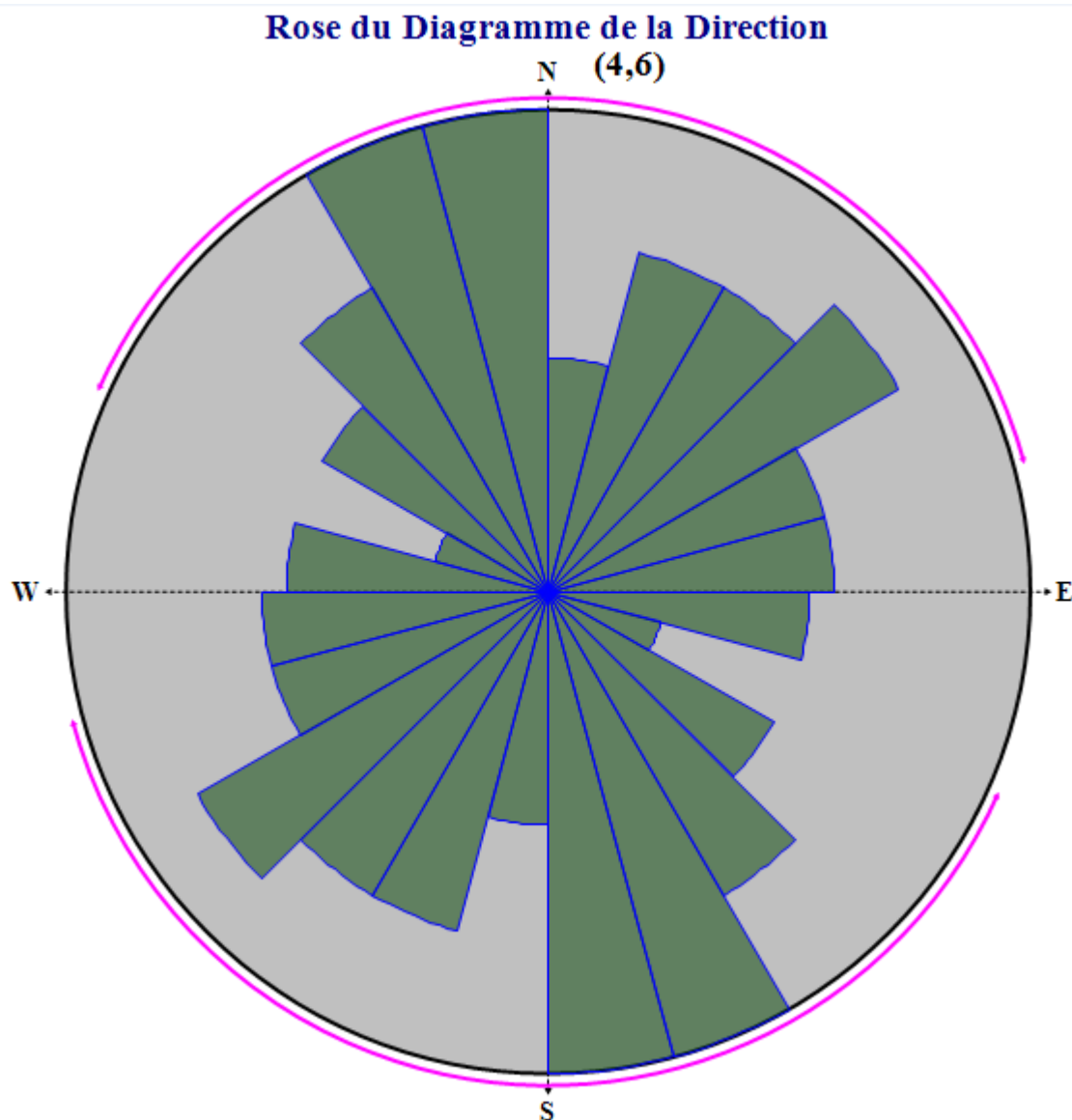


Figure 44: Rosace des directions des linéaments de la zone de Fort Dauphin
(filtre 00°)

VI.2. RESULTATS D'ANALYSE DE DONNEES AEROMAGNETIQUES

VI.2.1.LE CHAMP MAGNETIQUE TOTAL :

Le résultat d'un levé magnétique aéroporté est présenté sur une carte de l'intensité du champ magnétique total.

Comme étant dit antérieurement, le champ Magnétique total mesuré à la surface de la terre se décompose en 3 termes :

- ✓ le champ principal dû à la rotation de la terre.
- ✓ le champ transitoire produit par les rayonnements externes, le soleil, les astres,...
- ✓ le champ crustal est le champ magnétique dû à l'aimantation des roches dans la croûte.

La figure 44 montre la carte du champ magnétique total qui représente les anomalies magnétiques mesurées lors du levé. Ces anomalies magnétiques varient de 33108 à 33818 nano Teslas avec une valeur moyenne de 33294. Comme la valeur du champ magnétique total dans cette zone d'après le calcul du modèle de l'IGRF doit être de 34236.9 n T ; on a donc des anomalies négatives.

Les anomalies magnétiques les plus importantes (en rose) se rencontrent surtout dans les parties Ouest et Nord Est de la Région d'étude.

✓ Filtrage numérique des données aéromagnétiques :

Les anomalies brutes sont générées par la superposition des effets causés par diverses sources de différentes dimensions et situées à des profondeurs variables, par conséquent, il est difficile de distinguer, d'isoler et d'analyser séparément ces effets.

Le filtrage des données brutes est une étape indispensable dans la chaîne de traitement, c'est un procédé mathématique, permettant la transformation du champ magnétique pour faciliter la tâche de l'interprétation. Le filtrage numérique, peut être effectué dans le domaine spatial par le biais d'une convolution ou dans le domaine fréquentiel en utilisant la transformée de Fourier discrète (TFD).

Plusieurs filtres sont utilisés dans le traitement des données magnétiques, dans étude, on va utiliser les filtres suivants :

- ✓ la réduction aux pôles
- ✓ le Gradient verticale
- ✓ le Signal Analytique

VI.2.2. REDUCTION AUX POLES:

Contrairement au champ d'attraction gravitationnel, qui est vertical et toujours dirigé vers le bas, le vecteur champ aimantation et le vecteur champ inducteur sont généralement inclinés, causant une asymétrie dans l'allure des anomalies. Cette circonstance n'est pas observée dans la région du pôle magnétique où le champ magnétique est vertical et se comporte comme le champ gravimétrique. [01]

Pour repositionner les anomalies magnétiques à l'aplomb des sources qui les causent, Baranov (1957) ainsi que Baranov et Naudy (1964) ont introduit une transformation dite « réduction aux pôles » qui consiste à calculer des pseudo-anomalies qui seraient observées dans la région du pôle magnétique. [01]

Comme on a dit ci-dessus, le champ crustal est dû uniquement à l'aimantation des roches de la croûte ; et c'est ce qui nous intéresse. Ce que l'on mesure lors d'un levé magnétique est la résultante des champs principaux et crustal. La réduction au pôle consiste en d'autres termes à mettre la source de l'anomalie à son vertical. La carte des pseudo-anomalies est dite carte réduite au pôle. [01]

Bhattacharrya (1965) effectua les calculs des filtres de la réduction au pôle en utilisant des doubles séries de Fourier. Plus tard cette technique a été améliorée et simplifiée avec l'introduction de la transformée de Fourier rapide (FFT) (méthode utilisée par Oasis Montaj). Les nouvelles anomalies observées sur la carte réduite au pôle seraient celles observées si le champ est vertical dans la zone d'étude. La transformée de Fourier de la formule de la réduction au pôle est donnée par la relation suivante :[05]

$$R_p = \frac{1}{[\sin(Ia) - i \cos(Ia) \cdot \cos(D + \theta)]^2}$$

Avec :

I : l'inclinaison géomagnétique

Ia : l'inclinaison pour la correction de la composante réelle (Ia - I)

D : la déclinaison géomagnétique

Θ : la phase

Pour le calcul de l'opérateur de la réduction au pôle dans notre étude, nous avons utilisé pour inclinaison et déclinaison magnétique respectivement : I= 53° 26' 38'' et D= -16° 18'

34'' Ces valeurs correspondent à l'inclinaison et déclinaison de la zone d'Anosy durant l'année des levés aérogéophysiques du BPGRM. La figure 41B montre la carte réduite au pôle. Les anomalies se déplacent généralement d'un angle d'environ -12° par rapport à la carte du champ magnétique total. Cette valeur de déplacement de l'angle se rapproche bien à la valeur de la déclinaison de la zone (-16°) [05]

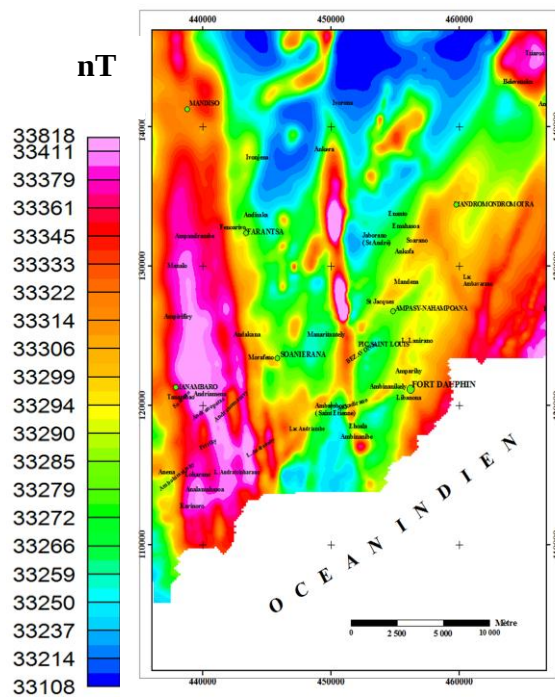
VI.2.3. LA DERIVATION VERTICALE:

Les filtres de dérivation amplifient l'effet des sources superficielles en atténuant l'effet de celles profondes, focalisent les anomalies et permettent de cerner d'avantage les limites géométriques du corps. [25]

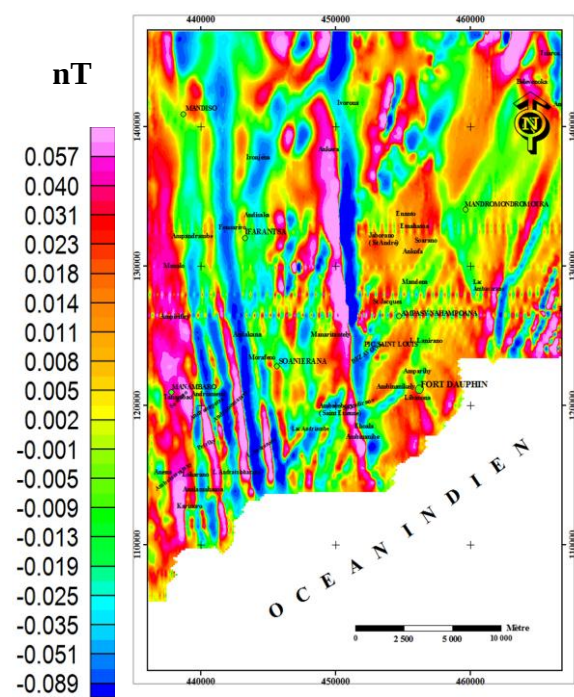
La carte de la première dérivée verticale donne une plus grande résolution en rehaussant le signal des objets superficiels et en enlevant les composantes régionales. C'est un très bon filtre pour identifier les différents linéaments. [01]

La carte de dérivation verticale (figure 45C) affiche bien les anomalies magnétiques liées aux contacts lithologiques et structuraux, et aux accidents tectoniques.

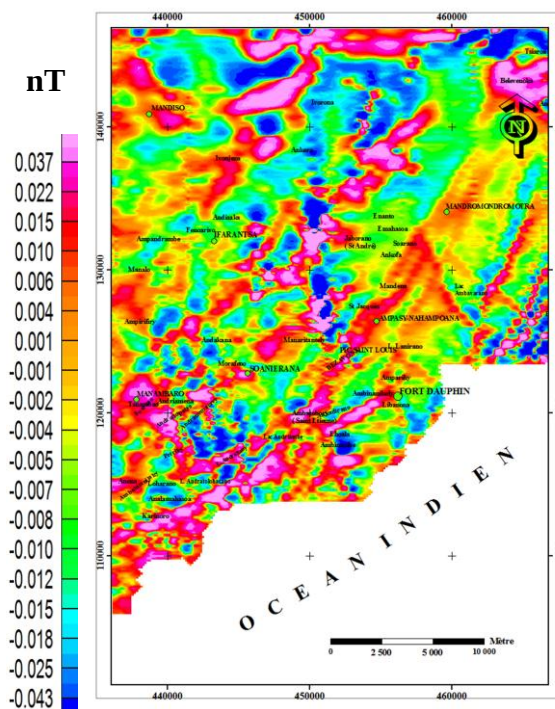
Le menu « CET Grid Analysis » du logiciel Oasis Montaj 6.4 permet de mettre en évidence les différents linéaments présents sur la carte à l'aide du sous menu « texture Analysis », « Lineation detection » et « Lineation vectorisation ».



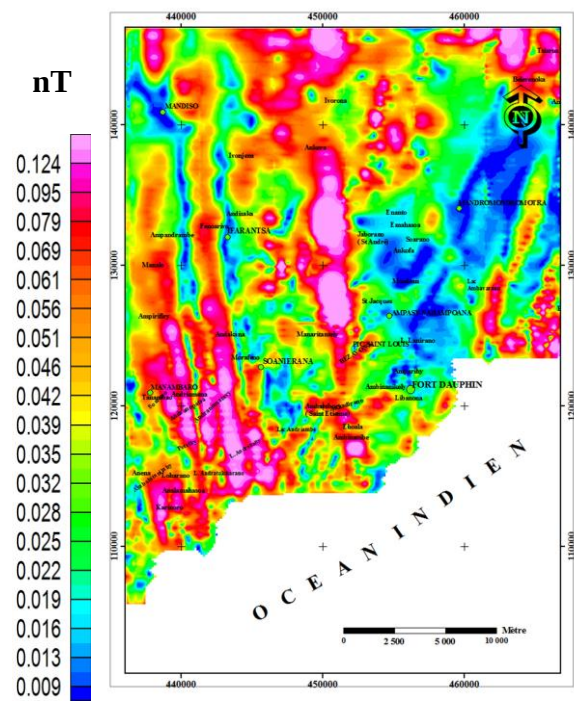
A : Carte du Champ Magnétique



B : Carte réduite au pôle.



C : Carte de gradient vertical.



D : Carte de signal Analytique.

Figure 45: Carte des anomalies du CMT ainsi que la carte du CMT après réduction au pôle, application du gradient vertical et du signal analytique.

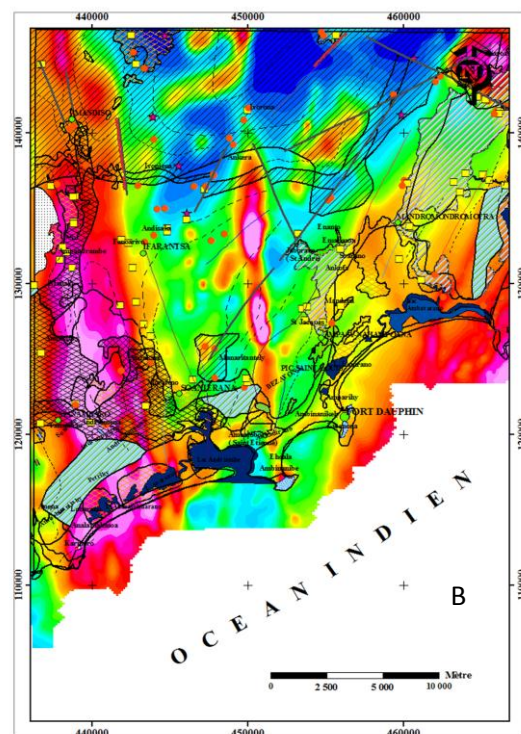
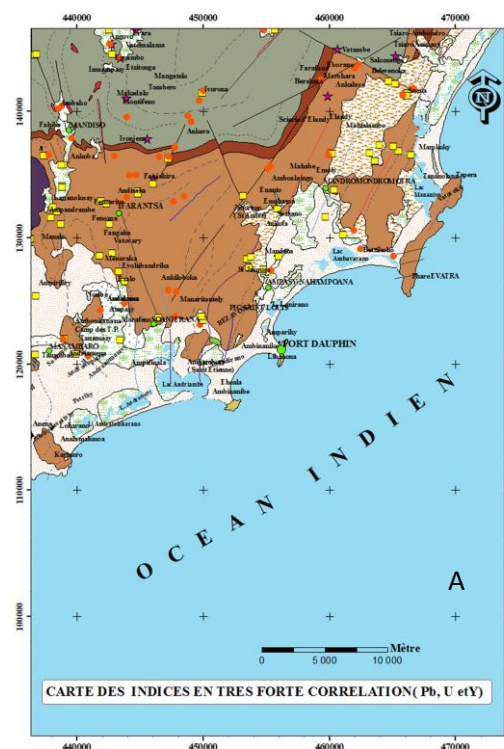
Les anomalies magnétiques résultent de la fossilisation du champ magnétique par les basaltes de la croûte océanique. Lorsque les roches riches en corps ferromagnésiens se mettent en place, elles fossilisent le champ magnétique existant. Les anomalies correspondent à des variations locales du champ magnétique par rapport au champ moyen de la région, avec des valeurs soit légèrement plus forte (anomalie positive), soit légèrement plus faible (anomalie négative).

Ainsi, l'anomalie du champ magnétique total dans cette zone est caractérisée par les fortes intensités magnétiques d'intensité 33079 à 33818 nT. Elle est de couleur rose violacée, et apparaît sous une forme allongée. Cette forte intensité magnétique se localise dans les parties Ouest et Nord Est de la Région c'est-à-dire dans la partie Ouest et Nord Est du granite calco-alcalin porphyroïde et charnockite des chaînes anosyennes, sur les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite. Ces formations contiennent en générale des éléments magnétiques. Ainsi cette zone peut contenir des minerais de Pb, U et Y. (figure 47A).

D'après la carte magnétique, les fortes teneurs en U se trouvent dans les tons roses et la faible teneur dans les couleurs bleus.

Il y a une corrélation négative entre le champ magnétique total et la teneur en U. Vu que les anomalies magnétiques résultent de la fossilisation du champ magnétique par le granite et charnockite de la chaîne anosyenne, on pourrait penser que l'U ne dépend pas de la présence des roches intrusives tels que le gabbro. L'abondance de granite, qui est une roche de la croûte inférieure de la Terre, justifie cette hypothèse.

La superposition de la carte aéromagnétique et de la carte lithologique de la zone (figure 47B), nous permet de visualiser les zones favorables aux minerais d'uranium. La minéralisation se trouve disséminée dans des zones de failles et dans des sables dunaires présenté comme roche encaissante des minerais.



LEGENDE

- Chef lieu Communes
- Chef lieu District

■ Lac et rivière

STRUCTURALES

- Faille supposée ou marquée
- Faille
- Mylonite
- Schistosité
- Structure anticlinale
- Structure synclinale
- Pendages

INDICES

- Pb
- U
- ★ Y

LITHOLOGIQUES

- Alluvions anciennes
- Alluvions récentes
- Couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites.
- Couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite)
- Couches de Tranomaro: Gneiss à pyroxène et cordiérite, pyroxénite
- Granite calco- alcalin porphyroïde et charnockyte des chaînes anosyennes à septa de gneiss à biotite et amphibolites
- Grès olistiques
- Grès quarternaire à stratifications entrecroisées
- Néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites
- Sables dunaires et dépôts d'embouchure

ZONES D'ANOMALIE

- Zone d'anomalie en Plomb
- Zone d'anomalie en W, Mo

- Zone d'anomalie en Manganèse et Zinc
- Zone d'anomalie en Uranium

33818
33411
33379
33361
33345
33333
33322
33314
33306
33299
33294
33290
33285
33279
33272
33266
33259
33250
33237
33214
33108



Figure 47: Etude comparative de la CMT, carte géologique et l'indices en U, Pb, Y.

VI.1.3. CARTOGRAPHIE SOUS SIG

Parmi les traitements appliqués aux images Landsat 7 ETM+ couvrant la région de Fort Dauphin, les plus efficaces sont les compositions colorées 754 RGB et 742 RGB, les rapports de bandes (5/7, 5/1, 5/4) et (7/3, 5/2, 4/3), l'analyse en composantes principales ACP (CP1, CP2, CP3 issues des 6 bandes TM 1,2,3,4,5 et 7) et les filtres Sobel et directionnel 00° à matrice 5x5. Une carte lithostructurale au 1/100 000ème (figure 49) est réalisée à partir de l'assemblage des différents résultats des analyses lithologiques et structurales en vue de tester la cartographie des différentes lithologies sur ces images obtenues par traitements, estimer leur apport et valider leurs résultats. Pour faire, la méthodologie utilisée est accompagnée d'un travail parallèle bibliographique et de terrain (remplacé dans le cas de la Région Fort Dauphin par la carte de BAZOT et al. (1972) comme outil de référence, d'examen et de confirmation. [14]

Pour estimer le degré de concordance avec la carte géologique de BAZOT et al. (1972) (figure 10), cette dernière a été digitalisée et incorporée dans un système d'informations géographiques (SIG) dans le logiciel ArcGis, puis superposée à d'autres calques comportant la carte linéamentaire obtenue et les différentes images issues des traitements utilisées pour dresser la carte lithologique de la région. [12]

La nouvelle carte lithostructurale ou carte de synthèse obtenue est précise et apporte des mises-à-jours à la carte géologique existante.

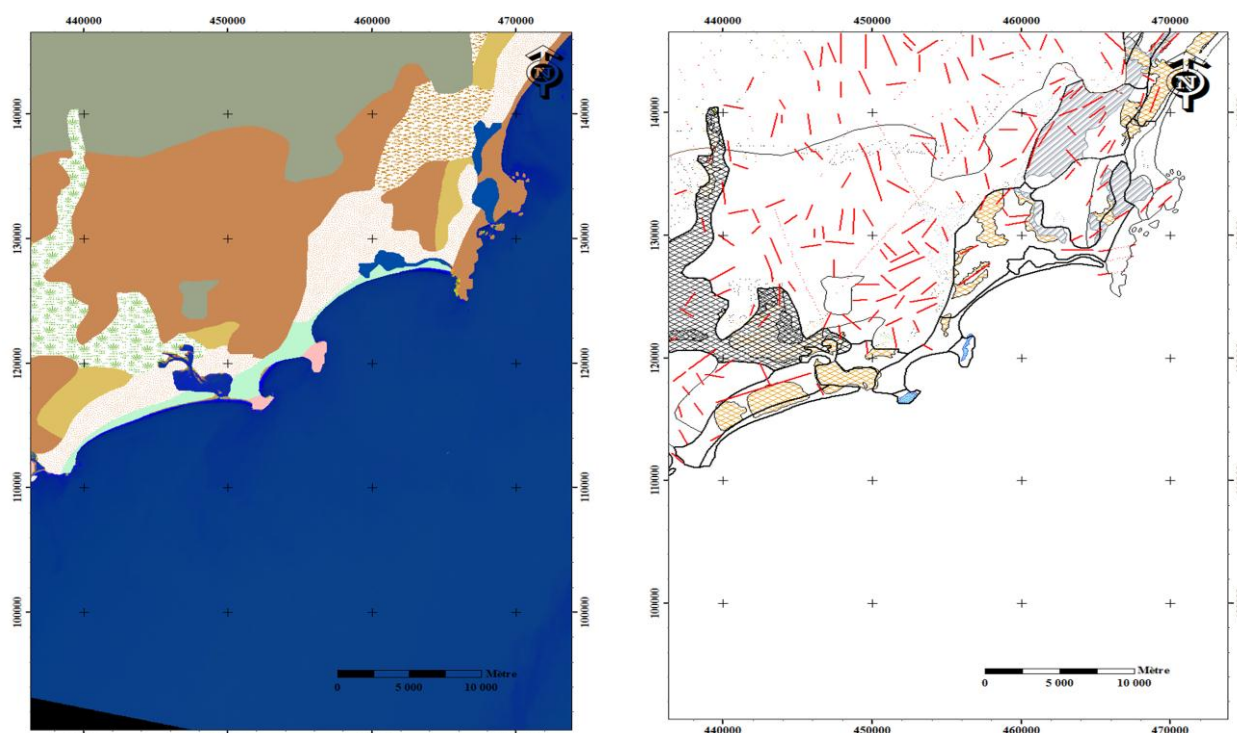
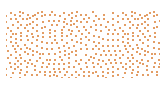
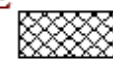
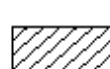


Figure 48: Nouvelle carte lithologique et carte linéamentaire.

LITHOLOGIQUES

	Alluvions anciennes		Dunes moyennes
	Alluvions, Sables		Granites et Charnockites anosyens
	Sables blancs		Charnockites Syénitiques
	Dunes Vives		Leptynites à cordiérite de Fort-Dauphin
	Dunes anciennes		Grès versicolores à stratifications entrecroisées, Grès argileux, Argiles, Kaolinite (contact socle), Marnes à bois silicifiés (Maj)
	Lac et Rivières		
	Faïlles	✓	Du point de vue géochimique :

ZONES D'ANOMALIE

	Zone d'anomalie en Plomb		Zone d'anomalie en Manganèse et Zinc
	Zone d'anomalie en W,Mo		Zone d'anomalie en Uranium
	Zone d'anomalie en Yttrium		

Dans la zone de Fort Dauphin, on observe que les anomalies des éléments U, Pb, Mn, Mo, W et Y se regroupent presque toute la partie de la Région, entre les failles et au niveau des sables. L'U, Y et le Pb se répartissent dans différentes formations de la zone. Cela se présente comme suit : dans la granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaines anosyennes et sur les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite). Des anomalies de Mn, du Mo, de W, de V et de Zn se trouvent dans les parties Centrales .et le périphérique de la zone d'étude.

✓ **Quant au point de vue de la méthode magnétique :**

L'Uranium et le Plomb se trouvent dans la majeure partie de la Région d'étude et surtout sur les parties Ouest, Sud et .Nord Est Tandis que l'Y et les autres éléments se trouvent dans la partie centrale de la région de Fort Dauphin.

Ainsi :

- ❖ La granite et le charnockite de la chaîne anosyenne contient de toute les minerais magnetiques;

- ❖ la granite calco- alcalin porphyroïde et charnockite des chaines anosyennes renferment les éléments radioactifs (U, etc.) et ainsi que du Pb dans la partie des couches d'Antsokoamiary: Gneiss rubanés à cordiérite (graphite) quartzites, pyroxénites et les couches de Fort-Dauphin: Leptynites homogènes à cordiérite, almandin (biotite);

- ❖ Les minerais de Mn, de Mo, de V, d'Y peuvent-être contenus dans le néogène: argile bariolées, sables argileux, Sables éoliens et sable provenant de la dégradation des bancs de quartzites.

- ✓ Les zones structurales renferment les éléments radioactifs ainsi des minerais de terres rares tels que le Nb.

La forte teneur de ces éléments présente d'avantage au niveau de ces zones indiquées ci-dessus. Ces zones sont alors intéressantes à exploiter car on y trouve les anomalies en Pb, U, Mo, Mn, Zn, etc. qui sont supérieures au Clarke de ces éléments.

La figure 49 ci-après montre la synthèse des résultats géochimiques, géophysiques et Structuraux.

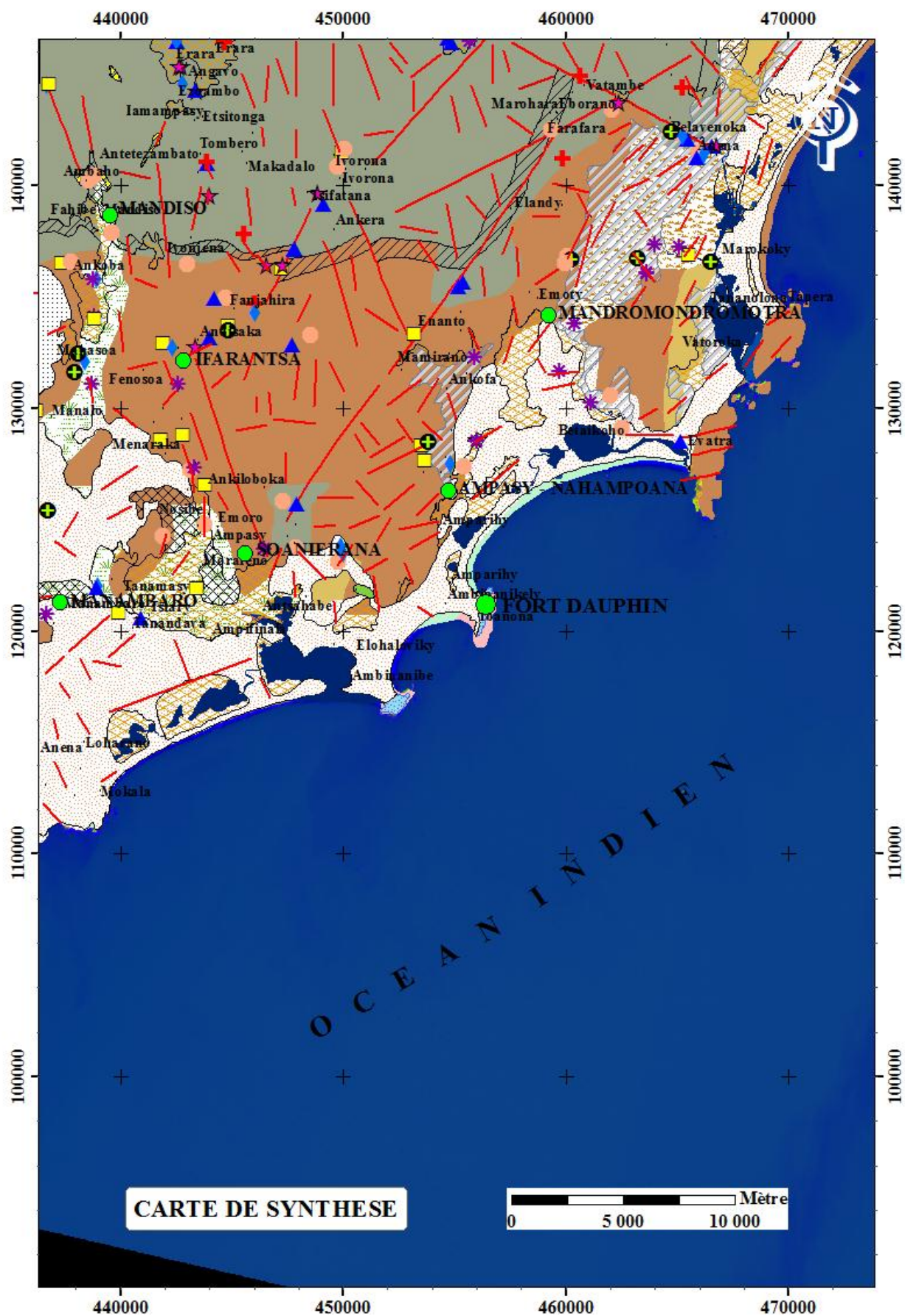


Figure 49: Carte de synthèse des résultats géologiques, géochimiques, géophysiques et structurales.

Sources: Carte topographique au 1/100 000 NO62 –BD 100 FTM – Données Satellite
LandSat7 TM+ n°158/077.

LEGENDE

● Chef lieu Communes

● Chef lieu District

 Lac et Rivières

 Failles

INDICES

 Mn

 Mo

 Pb

 W

 U

 V

 Y

 Zn

LITHOLOGIQUES

 Alluvions anciennes

 Alluvions, Sables

 Sables blancs

 Dunes Vives

 Dunes anciennes

 Dunes moyennes

 Granites et Charnockites anosyens

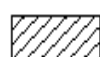
 Charnockites Syénitiques

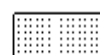
 Leptynites à cordiérite de Fort-Dauphin

 Grès versicolores à stratifications entrecroisées,
Grès argileux, Argiles, Kaolinite (contact socle),
Marnes à bois silicifiés (Maj)

ZONES D'ANOMALIE

 Zone d'anomalie en Plomb

 Zone d'anomalie en W, Mo

 Zone d'anomalie en Yttrium

 Zone d'anomalie en Manganèse et Zinc

 Zone d'anomalie en Uranium

CONCLUSION GENERALE

Au point de vue applicatif, l'étude statistique des éléments géochimique détermine et caractérise le processus chimique, mécanique et minéralogique qui changent les compositions des min provoquant ainsi leur différenciation, servait pour l'indentification des bonnes corrélations entre les divers éléments.

La réalisation des cartes d'isoteneurs permet de localiser géographiquement les anomalies géochimiques, les mettre en évidence et les corrélér avec l'environnement géologique. On a vu que les anomalies en manganèse, en molybdène, en plomb, tungstène, en uranium, en vanadium, en yttrium et en zinc dans cette zone seront exploitables.

L'étude que nous avons effectuée nous a permis de tester l'utilisation de traitements d'images Landsat 7 ETM + pour la cartographie de la région de Fort Dauphin qui est située en domaine aride. Ces traitements ont été utilisés afin de voir s'ils permettent une discrimination des lithologies de la zone d'étude et pour la réalisation de cartes linéamentaires. Les résultats obtenus ont été confrontés aux données de terrain et bibliographiques (la carte géologique au 1/100.000).

L'étude de la méthode aéromagnétique consiste à enregistrer les anomalies du champ magnétique terrestre à bord d'un aéronef. Les anomalies enregistrées durant le vol ne sont pas verticales à leur source dans le sous-sol. L'application du filtre de réduction aux pôles permet de corriger ces erreurs. Le filtre de la dérivée verticale est ensuite appliqué à la carte réduite aux pôles pour détecter les divers linéaments présents sur la carte.

Enfin une carte géologique a été obtenue par la superposition des résultats des analyses lithologiques (composition colorées, rapport de bandes, ACP) et structurale (filtres directionnels). Cette carte est un complément à la carte géologique déjà existante.

A l'issue de ce travail, nous avons réalisé une base de données géologique sous SIG. Cette base de données nous a permis de gérer de nombreuses informations disponibles sur la partie Sud de Madagascar (cartes géologiques et topographiques, réseau hydrographique), et de créer de nouvelles cartes par analyses: d'images satellite, d'images topographiques, de données géochimiques et de données géophysiques. Nous pouvons ainsi (i) éditer de nouvelles cartes géologiques et (ii), croiser des informations géologiques spécifiques individualisées.

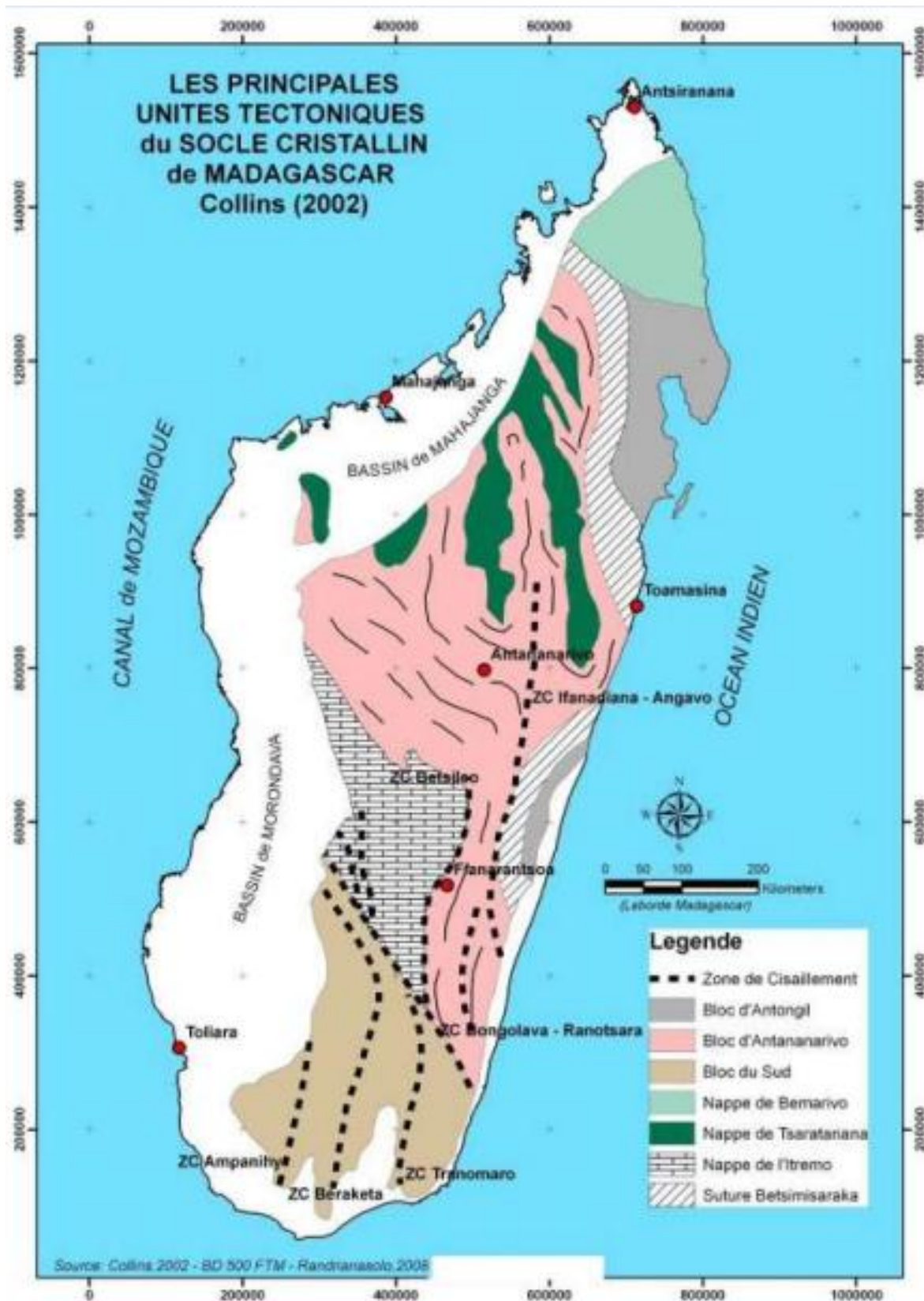
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- [01] BARANOV V. et NAUDY H., 1964. Numerical calculations of the reduction to the magnetic pole.
- [02] BAZOT G., 1975. Les formations précambriennes du Sud Est de Madagascar et leurs minéralisations. 29p.
- [03] BESAIRIE H., 1948. Recherches géologiques à Madagascar, deuxième suite, l'extrême Sud et le Sud Sud-Est. *Mém. Hors. Série. Serv. Géol. Mad. Tananarive*.
- [04] BESAIRIE H., 1970. Sur les prétendus conglomérats du système du graphite. *Arch. Serv. Géol. Tananarive., A.1119*.
- [05] BHATTACHARYA, 1965. Two dimensional harmonic analysis as a tool for magnetic interpretation. *Geophysics* 30
- [06] BOURGEAT F., SOURDAT M., TRICARD J. Pédogenèse et morphogenèse d'après des exemples de Madagascar. *Mad. Rev. Géol.* n° 35 Juillet-Décembre 1979 P.P 9.
- [07] CHANTRAINE J., 1970. Schéma géologique du Centre Sud de Madagascar. *Rap. Ann. Serv. Géol. Mad. Tananarive., pp, 65-70*.
- [08] COULIBALY Lacina, 1996. Interprétation structurale des linéaments par traitement d'image satellitaire. 101p.
- [09] CREAM ou CENTRE DE RECHERCHES, D'ETUDES ET D'APPUI A L'ANALYSE ECONOMIQUE À MADAGASCAR, 2013. Monographie de la Région ANOSY. 203p.
- [10] de la ROCHE H., 1958.- Etude géologique de l'extrême Sud-Est de Madagascar (Zone d'intensité métamorphique élevée). *Serv. Géol. Mad. Tananarive*.
- [11] DELUBAC G., RAKOTONANAHARY R., RANTOANINA, 1962. Etude géologique et prospection des feuilles Tananarive Manjakandriana au 1/100.000. Rapport de fin de campagne 1962, Service Géologique.
- [12] DIDIER L., LEO O., 1983 Télédétection : techniques et applications cartographiques ". Edition FORHOM.
- [13] FAURE Sébastien, 2009. Identification des linéaments géophysiques et leur relation avec la minéralisation. 107p.
- [14] IMESSAOUDENE Narimene, 2012. Utilisation de la télédétection pour la cartographie géologique du Massif des Eglab et de sa bordure sédimentaire (Sud-Ouest algérien). Mémoire. Master en Géologie de l'Ingénieur. Université FERHAT ABBAS - SETIF 68p.

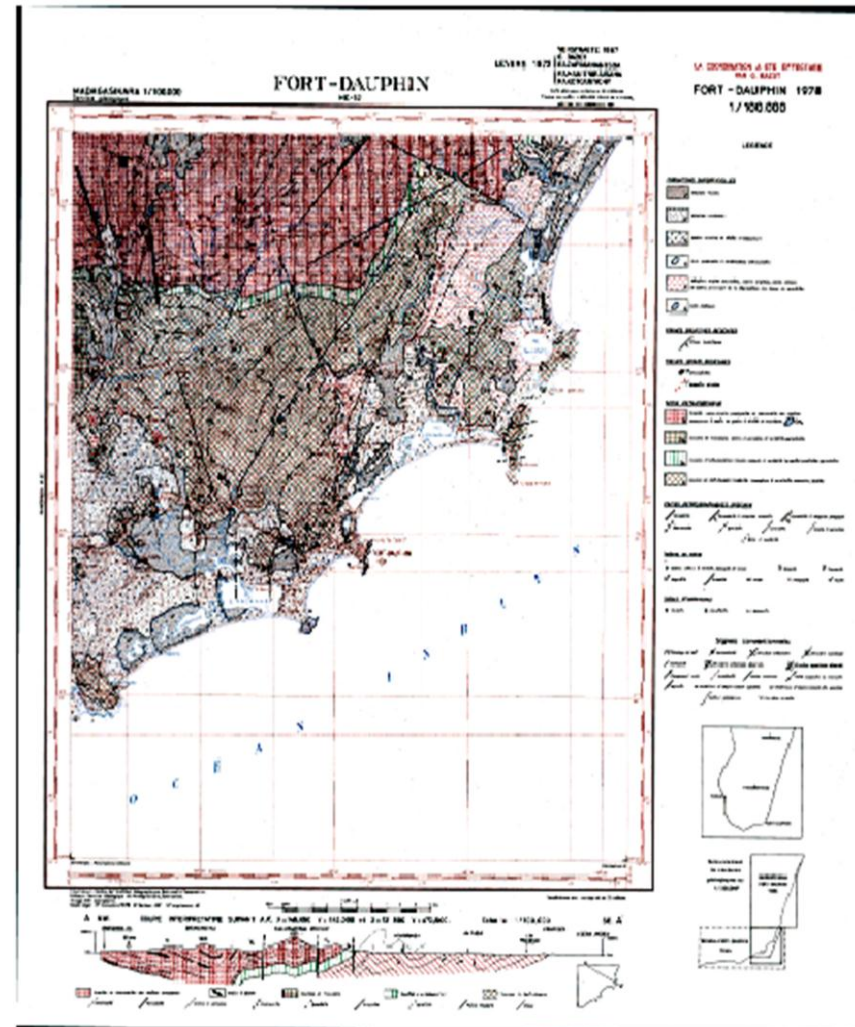
- [15] RANDRIAMBOAVONJY J.C., 1996. Etude de pédopaysage dans les quatre zones tests, série n° 3. Edition Ecole Supérieure des sciences Agronomiques, Département eau et forêt. 177p.
- [16] MAJMUNDAR Hasmukhrai M., 1961. Contribution à l'étude minéralogique et géochimique des pyroxènes et des micas dans les pyroxénites à phlogopite et dans les charnockites du Sud-Est de Madagascar .130p.
- [17] MALDAGUE M., 1998 Cours ESSA Forêt chap 5 : Ressources et fonction de la Forêt.
- [18] MANDIMBIHARISON A. J., 1999. Cours télédétection, cinquième année ESPA.
- [19] RAKOTONIRINA Riana Herintsoa, 2015. Mise en évidence des minéralisations en beryl, monazite et corindon dans la Région d'ampandradava, feuille J60 par méthode géochimique et géophysique. Mémoire D.E.A, ESPA. 96p.
- [20] RANDRIANASOLO Elisa B., 2009. NOUVELLE METHODE DE CARTOGRAPHIE SUR LE SOCLE PROTEROZOIQUE SUD DE MADAGASCAR. 307p.
- [21] RATEFIARIMINO A., 2008. Potentiel de minéralisation des domaines miniers de la société Mines Tany Hafa (MHT) (Région de Zazafotsy-Sahambano-Ranotsara au de Madagascar Fascicule2 : Modélisation géologique des différents de minéralisation, 36p.
- [22] RATEFIARIMINO A., 2008. Potentiel de minéralisation des domaines miniers de la société Mines Tany Hafa (MTH) (Région de Zazafotsy-Sahambano-Ranotsara au de Madagascar Fascicule2 : Modélisation géologique des différents de minéralisation, 16p.
- [23] RATSIVALAKA S., 1985. Recherche sur le climat de Tolagnaro. Revue GEOGRAPHIQUE N°46. p 51.
- [24] RAZAFINIPARANY A., 1969. Les charnockites du socle précambrien de Madagascar. Thèse Cermont-Ferrand. 27p.
- [25] SCANVIC J.Y. BRGM 1983. Utilisation de la Télédétection dans les sciences de la Terre. 183p.
- [26] SHOOT, 2009. La géophysique pour les géologues. Tome 2 : méthode de prospection magnétique. 210p.
- [27] TAKEUCHI S., 2012. Geochemical Survey Draft Final report. Japan International Cooperation Agency (JICA), Ministry of Mines and Hydrocarbures (MMH).26p.
- [28] Windley B., Razafimparany A., Razakamanana T., Ackermant D., 1994. Tectonic framework of the Precambrian of Madagascar and its Gondwana connections a review and reappraisal. Springer, 18p.

ANNEXES

ANNEXE 1 : socle cristallin de Madagascar par Collins, source Collins 2002-BD 500 FTM-Randrianasolo 2008.



ANNEXE 2 : Carte géologique et carte topographique de la feuille NO62.



ANNEXE 3 : Données climatologiques décennales pour la Région de fort- dauphin:**TEMPERATURE MINIMALE:****Température moyenne mensuelle :**

	jan	Fev	mars	Avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	dec
2003	24.1	23.8	22.8	22.0	19.0	17.6	16.4	16.0	-	19.4	19.6	20.8
2004	23.3	22.4	22.1	20.9	19.2	17.1	16.9	17.9	17.9	-	21.1	21.8
2005	22.9	22.4	21.3	21.4	18.9	16.3	15.7	17.7	17.0	19.7	20.3	22.3
2006	24.2	24.3	23.2	21.7	18.9	16.7	16.2	16.1	18.0	19.8	21.1	21.1
2007	22.9	23.1	22.5	21.1	19.1	16.8	14.1	16.0	17.6	19.5	20.9	22.7
2008	23.3	22.7	-	21.6	17.8	15.9	16.5	15.5	17.6	19.0	20.6	22.6
2009	23.4	21.6	22.4	21.0	18.4	17.4	17.4	18.0	17.9	19.9	20.4	22.0
2010	22.9	23.9	21.9	21.3	19.3	17.6	16.5	17.8	18.3	20.4	20.7	21.6
2011	23.4	23.4	23.0	20.7	19.1	16.9	15.6	15.4	17.6	19.1	21.3	22.4
2012	22.9	23.1	22.1	20.6	18.4	18.5	16.0	16.4	16.4	18.9	19.8	21.6

Température Absolue :

	Jan	Fev	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	Dec
2003	21.2	22.4	20.3	17.2	16.0	14.6	11.6	13.0	-	16.0	15.8	16.6
2004	21.0	19.9	17.3	18.0	14.3	12.9	11.8	13.5	14.5	-	18.1	19.4
2005	20.7	18.7	18.0	17.1	16.6	11.7	9.3	13.5	11.6	14.6	15.6	18.0
2006	22.0	20.9	17.6	18.3	15.1	12.0	12.0	11.4	14.5	15.1	18.0	16.0
2007	21.4	21.2	18.5	17.9	13.6	11.5	9.0	13.0	14.6	16.1	16.0	19.0
2008	19.9	20.9	-	18.4	11.9	12.4	12.0	10.8	12.4	15.5	18.1	20.0
2009	19.4	20.0	20.0	16.4	13.0	13.0	13.0	14.0	12.5	17.1	14.9	18.2
2010	18.9	21.0	17.9	19.0	15.7	13.0	11.8	13.6	13.0	17.0	17.8	19.0
2011	20.3	21.4	18.3	18.0	15.8	13.0	11.8	10.7	13.0	16.2	17.4	20.1
2012	21.0	21.7	18.6	18.1	14.8	14.0	12.0	13.0	10.8	15.8	17.7	18.5

TEMPERATURE MAXIMALE :**Température moyenne mensuelle :**

	Jan	Fev	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	Dec
2003	30.8	31.2	29.5	29.1	26.6	25.0	24.9	24.4	-	27.0	27.2	27.7
2004	30.2	28.7	29.1	27.8	26.0	24.9	24.4	26.1	25.4	28.0	27.8	28.3
2005	29.2	28.6	28.9	27.9	26.0	25.6	24.2	25.1	26.4	27.8	28.1	29.4
2006	32.4	31.9	30.8	27.1	26.2	24.2	24.5	24.0	27.8	27.4	29.0	28.7
2007	29.0	29.7	30.5	29.7	27.6	25.5	24.5	23.3	25.5	28.3	29.1	31.6
2008	30.6	29.9	-	29.0	27.5	24.1	23.6	23.4	25.5	27.2	28.3	30.3
2009	29.7	27.4	28.7	27.5	24.8	24.8	24.1	25.3	26.7	26.3	28.7	28.9
2010	30.4	30.8	29.1	28.3	25.5	24.5	24.8	25.3	27.2	28.4	27.3	28.5
2011	31.0	30.7	30.0	28.0	27.6	25.1	24.6	25.5	26.4	28.4	30.3	31.3
2012	30.5	31.1	31.3	29.1	2.9	27.4	25.5	26.6	26.4	27.4	26.8	29.6

Température Absolue :

	Jan	Fev	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	Dec
2003	34.7	34.0	31.6	32.3	30.0	28.6	26.8	28.0	-	29.9	31.1	30.9
2004	32.4	32.8	31.0	31.5	29.6	28.8	27.6	29.8	29.6	30.9	30.6	32.0
2005	32.2	32.2	31.8	30.9	31.0	29.4	26.7	29.4	33.0	32.2	33.0	34.2
2006	34.5	34.5	33.7	30.7	28.6	27.4	27.2	27.3	30.8	31.8	32.0	31.6
2007	32.1	34.9	35.0	37.2	32.6	27.7	27.9	28.4	29.0	31.4	32.1	36.0
2008	33.3	33.1	-	31.2	30.5	29.3	26.7	26.0	28.1	30.0	31.1	34.0
2009	33.1	31.1	30.4	30.0	29.8	27.8	28.0	29.4	31.2	31.4	32.4	33.0
2010	33.8	34.2	32.9	31.5	29.4	26.8	26.8	27.8	30.1	31.3	32.2	32.5
2011	33.8	32.6	33.1	31.8	29.5	28.8	28.8	30.0	30.5	31.0	35.0	34.2
2012	33.9	34.2	34.6	32.0	29.9	29.0	28.9	28.4	31.5	32.1	33.0	32.5

PLUVIOMÉTRIE:

	Jan	Fev	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	Dec
2003	158.7	86.5	45.3	149.6	93.7	181.2	48.1	142.4	24.9	70.6	289.9	241.8
2004	241.6	169.4	210.2	96.6	232.8	88.3	218.3	6.5	166.3	175.7	158.9	165.6
2005	276.2	153.7	190.7	218.2	64.4	29.9	30.3	149.1	35.0	55.6	62.3	105.0
2006	106.5	16.0	65.4	201.7	306.5	182.5	66.6	42.5	19.9	50.1	12.8	79.7
2007	372.3	105.7	72.5	13.9	115.9	29.5	32.1	183.5	16.9	130.9	212.7	65.4
2008	298.5	226.5	105.7	22.8	36.6	155.6	171.6	103.8	49.3	11.9	66.4	79.6
2009	197.2	332.0	112.3	104.3	106.1	83.4	330.2	40.2	27.1	262.4	112.9	133.6
2010	214.9	130.2	98.5	207.3	293.9	163.7	50.9	42.2	2.0	18.5	68.3	136.2
2011	203.6	184.2	242.8	97.7	85.0	116.0	78.4	50.8	78.8	58.4	18.0	89.2
2012	375.4	66.7	107.8	49.7	177.0	0.6	82.3	38.4	33.3	34.8	187.0	151.6

EVAPORATION :

	Jan	Fev	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	Dec
2003	170.9	170.3	184.3	119.6	142.2	111.5	125.9	121.6	173.0	158.0	130.1	123.5
2004	121.7	107.6	134.7	145.4	102.1	100.7	115.3	211.4	177.1	159.9	114.0	104.0
2005	106.5	117.5	127.5	97.8	119.0	111.0	138.1	129.9	145.3	176.7	194.2	152.4
2006	228.0	181.7	175.2	94.3	118.5	121.8	164.2	158.6	128.3	173.7	181.6	173.5
2007	95.2	154.4	165.1	122.9	31.8	142.2	157.4	133.0	176.1	188.7	176.3	277.3
2008	134.8	115.3	152.9	156.4	110.1	104.4	127.8	170.9	186.7	216.1	180.0	197.9
2009	144.6	80.5	122.1	87.4	131.9	148.6	124.8	154.9	174.1	151.1	96.1	183.2
2010	118.2	95.3	93.5	68.8	46.0	84.0	85.9	103.0	184.2	224.0	172.1	134.5
2011	140.9	148.4	132.6	138.7	128.0	116.6	134.6	163.8	185.5	216.0	170.7	130.2
2012	132.3	142.3	136.3	129.7	115.2	149.5	125.5	126.3	149.4	155.0	123.1	164.3

CALCUL DES VARIATIONS DE LA PRECIPITATION ET DE L'EVAPORATION :

Précipitation annuelle:

C'est la somme des douze précipitations mensuelles de l'année considérée: Exemple de calcul: pour l'année 2003

DONNEES : Précipitation en mm

	Jan	Fev	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	Dec
2003	158.7	86.5	45.5	149.6	93.7	181.2	48.1	142.4	24.9	70.6	289.9	241.8

Précipitation annuelle = $158.7 + 86.5 + 45.3 + 149.6 + 93.7 + 181.2 + 48.1 + 142.4 + 24.9 + 70.6 + 289.9 + 241.8 = 1532,7\text{mm}$

✓ Précipitations maximale et minimale:

Ce sont les valeurs extrêmes respectives de la pluviométrie pendant l'année considérée.

✓ Evaporations maximale et minimale:

De même que dans le cas de la précipitation

✓ Evaporation annuelle:

Relever les valeurs de l'évaporation mensuelle de l'année et en faisant leur somme. On obtient l'évaporation annuelle. Exemple; Pour l'année 2003.

DONNEES: évaporation en mm

	Jan	Fev	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	Dec
2003	170.9	170.3	184.3	119.6	144.2	111.5	125.9	121.6	173.0	158.0	130.1	123.5

Evaporation annuelle= $170.9 + 170.3 + 184,3 + 119,6 + 144,2 + 111.5 + 125,9 + 121.6 + 173,0 + 158,0 + 130,1 + 123,5 = 1732,9\text{mm}$

✓ La précipitation et l'évaporation moyennes mensuelles sont les moyennes arithmétiques des dix valeurs pour chaque mois considéré.

Résultats du calcul :

	jan	fev	mars	avril	mai	juin	juillet	août	sept	oct	nov	Dec
Précipitation en mm	224.5	141.1	125.1	116.2	151.2	103.1	110.9	80.6	45.3	86.9	118.9	124.8
Moyenne mensuelle												
Evaporation en mm	158.7	86.5	45.5	149.6	93.7	181.2	48.1	142.4	24.9	70.6	289.9	241.8
Moyenne mensuelle												

LE BILAN HYDRIQUE :

Le bilan hydrique B est obtenu en faisant soustraire la précipitation P par l'évaporation E.

$$B = P - E$$

La précipitation P et l'évaporation E sont respectivement les moyennes arithmétiques des précipitations annuelles et des évaporations annuelles.

Exemple de calcul :

Pannuelle (mm)= 1469,8mm

Eannuelle (mm)= 16979mm

B= 1469,8- 16979,9= -228mm

Mode d'obtention des chiffres dans le tableau 1

Pour chaque année, trier les valeurs extrêmes respectivement de la température maximale et de la température minimale parmi les douze mois, en utilisant les températures moyennes mensuelles.

Puis, la température moyenne annuelle est la moitié de la somme des deux températures maximale moyenne et minimale moyenne en l'année considérée. ·

Et l'écart moyen de température est la différence entre la température maximale moyenne et la température minimale moyenne, tandis que l'écart absolu est la soustraction de la température maximale absolue par la température minimale absolue.

Exemple de calcul:

Pour l'année 2003

✓ Température moyenne mensuelle : -T° max = 31,2 °C

-T° min = 16,0°C

T° moyenne annuelle= 1/2 (T° max moyenne + T° min moyenne)

APPLICATION NUMERIQUE

T° moyenne annuelle= 1/2 (31,2+ 16,0)= 23,6°C

✓ Ecart moyen de T°= T° max – T° min= **15,2°C**

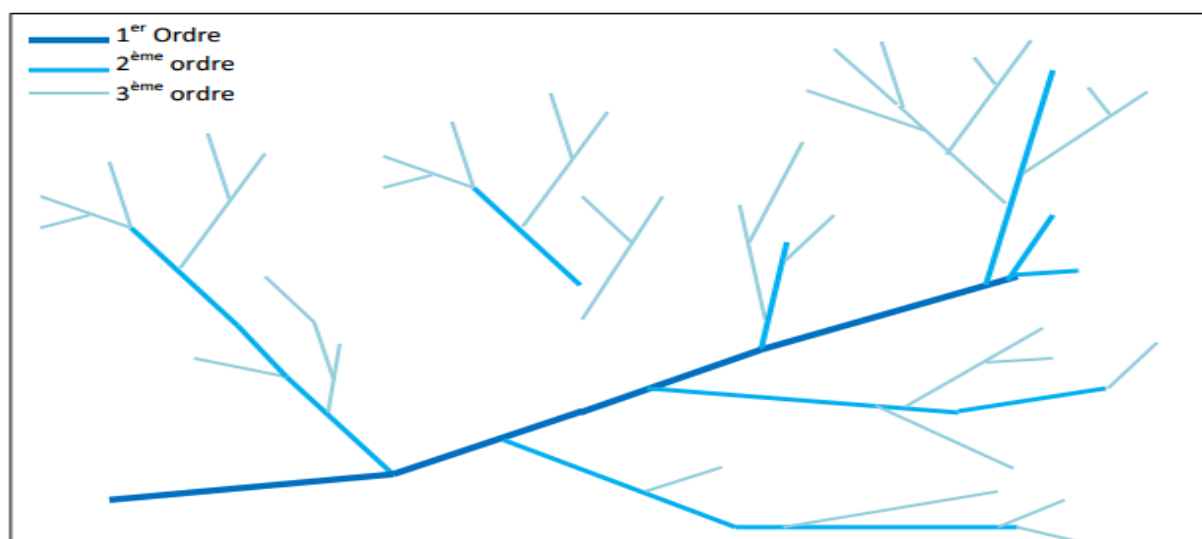
✓ Température absolue mensuelle : - T° max= 34,7°C

- T° min= 11,6°C

✓ Ecart absolu de T°= T° max – T° min= **23,1°C.**

ANNEXE 4 : Sélection du site de prélèvement. Ordre de classification des ruisseaux selon Strahler's.

Généralement, les échantillons seront prélevés dans un ruisseau du 2^{ème} ou 3^{ème} ordre selon la méthode de Strahler's (Johnson,C.C, Ridgway,J,2004). Ce point n'est qu'un guide pour nous car il indique l'endroit idéal pour le prélèvement des sédiments.

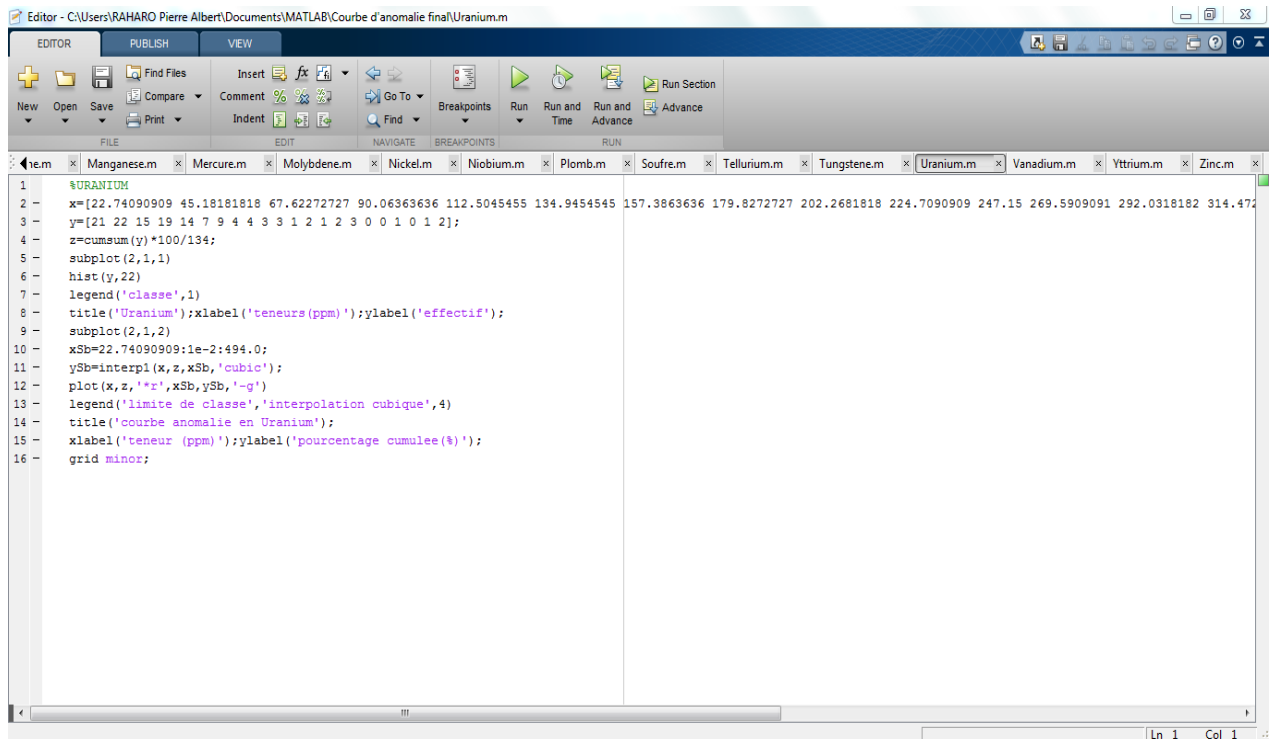


ANNEXE 5: Introduction à la prospection géochimique des gîtes métallifères par

Eléments	Teneur moyenne dans la croûte continentale (ppm ou g/t)
Antimoine (Sb)	1
Cérium (Ce)	46
Cuivre (Cu)	70
Lanthane (La)	18
Mercure (Hg)	0,5
Manganèse (Mn)	1000
Molybdène (Mo)	15
Nickel (Ni)	80
Niobium (Nb)	24
Plomb (Pb)	16
Soufre (S)	520
Tellurium (Te)	0,002
Tungstène (W)	69
Uranium (U)	4
Vanadium (V)	150
Yttrium (Y)	28
Zinc (Zn)	132

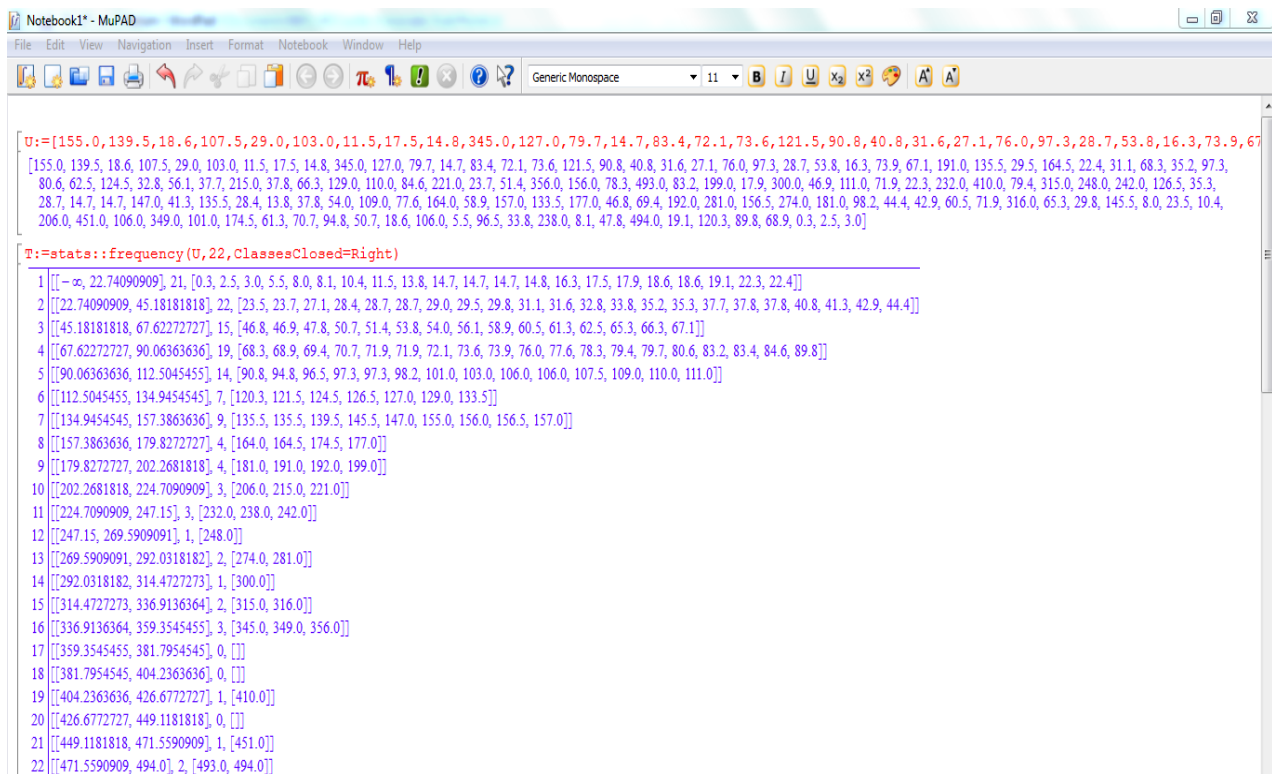
GRANNER 1973 .Edit MASON. CLARKE DES SELON BRIAN MASON.

ANNEXE 6 : Algorithme pour le traçage de la courbe de fréquences cumulées exemple pour l'Uranium.



```
1 %URANIUM
2 x=[22.74090909 45.18181818 67.62272727 90.06363636 112.5045455 134.9454545 157.3863636 179.8272727 202.2681818 224.7090909 247.15 269.5909091 292.0318182 314.4727273];
3 y=[21 22 15 19 14 7 9 4 4 3 3 1 2 1 2 3 0 0 1 0 1 2];
4 z=cumsum(y)*100/134;
5 subplot(2,1,1)
6 hist(y,22)
7 legend('classe',1)
8 title('Uranium');xlabel('teneurs(ppm)');ylabel('effectif');
9 subplot(2,1,2)
10 xSb=22.74090909:1e-2:494.0;
11 ySb=interp(x,z,xSb,'cubic');
12 plot(x,z,'r',xSb,ySb,'-g')
13 legend('limite de classe','interpolation cubique',4)
14 title('courbe anomalie en Uranium');
15 xlabel('teneur (ppm)');ylabel('pourcentage cumulee(%)');
16 grid minor;
```

ANNEXES 7 : Algorithme de détermination de classes et fréquences dans le cas de distribution lognormale ex pour l'Uranium



```
1 U:=[155.0,139.5,18.6,107.5,29.0,103.0,11.5,17.5,14.8,345.0,127.0,79.7,14.7,83.4,72.1,73.6,121.5,90.8,40.8,31.6,27.1,76.0,97.3,28.7,53.8,16.3,73.9,67.1,155.0,139.5,18.6,107.5,29.0,103.0,11.5,17.5,14.8,345.0,127.0,79.7,14.7,83.4,72.1,73.6,121.5,90.8,40.8,31.6,27.1,76.0,97.3,28.7,53.8,16.3,73.9,67.1,191.0,135.5,29.5,164.5,22.4,31.1,68.3,35.2,97.3,80.6,62.5,124.5,32.8,56.1,37.7,215.0,37.8,66.3,129.0,110.0,84.6,221.0,23.7,51.4,356.0,156.0,78.3,493.0,83.2,199.0,17.9,300.0,46.9,111.0,71.9,22.3,232.0,410.0,79.4,315.0,248.0,242.0,126.5,35.3,28.7,14.7,14.7,147.0,41.3,135.5,28.4,13.8,37.8,54.0,109.0,77.6,164.0,58.9,157.0,133.5,177.0,46.8,69.4,192.0,281.0,156.5,274.0,181.0,98.2,44.4,42.9,60.5,71.9,316.0,65.3,29.8,145.5,8.0,23.5,10.4,206.0,451.0,106.0,349.0,101.0,174.5,61.3,70.7,94.8,50.7,18.6,106.0,5.5,96.5,33.8,238.0,8.1,47.8,494.0,19.1,120.3,89.8,68.9,0.3,2.5,3.0]
2 T:=stats::frequency(U,22,ClassesClosed=Right)
3 [[-∞, 22.74090909], 21, [0.3, 2.5, 3.0, 5.5, 8.0, 8.1, 10.4, 11.5, 13.8, 14.7, 14.7, 14.7, 14.8, 16.3, 17.5, 17.9, 18.6, 18.6, 19.1, 22.3, 22.4]]
4 [[22.74090909, 45.18181818], 22, [23.5, 23.7, 27.1, 28.4, 28.7, 28.7, 29.0, 29.5, 29.8, 31.1, 31.6, 32.8, 33.8, 35.2, 35.3, 37.7, 37.8, 37.8, 40.8, 41.3, 42.9, 44.4]]
5 [[45.18181818, 67.62272727], 15, [46.8, 46.9, 47.8, 50.7, 51.4, 53.8, 54.0, 56.1, 58.9, 60.5, 61.3, 62.5, 65.3, 66.3, 67.1]]
6 [[67.62272727, 90.06363636], 19, [68.3, 68.9, 69.4, 70.7, 71.9, 71.9, 72.1, 73.6, 73.9, 76.0, 77.6, 78.3, 79.4, 79.7, 80.6, 83.2, 83.4, 84.6, 89.8]]
7 [[90.06363636, 112.5045455], 14, [90.8, 94.8, 96.5, 97.3, 97.3, 98.2, 101.0, 103.0, 106.0, 106.0, 107.5, 109.0, 110.0, 111.0]]
8 [[112.5045455, 134.9454545], 7, [120.3, 121.5, 124.5, 126.5, 127.0, 129.0, 133.5]]
9 [[134.9454545, 157.3863636], 9, [135.5, 135.5, 139.5, 145.5, 147.0, 155.0, 156.0, 156.5, 157.0]]
10 [[157.3863636, 179.8272727], 4, [164.0, 164.5, 174.5, 177.0]]
11 [[179.8272727, 202.2681818], 4, [181.0, 191.0, 192.0, 199.0]]
12 [[202.2681818, 224.7090909], 3, [206.0, 215.0, 221.0]]
13 [[224.7090909, 247.15], 3, [232.0, 238.0, 242.0]]
14 [[247.15, 269.5909091], 1, [248.0]]
15 [[269.5909091, 292.0318182], 2, [274.0, 281.0]]
16 [[292.0318182, 314.4727273], 1, [300.0]]
17 [[314.4727273, 336.9136364], 2, [315.0, 316.0]]
18 [[336.9136364, 359.3545455], 3, [345.0, 349.0, 356.0]]
19 [[359.3545455, 381.7954545], 0, []]
20 [[381.7954545, 404.2363636], 0, []]
21 [[404.2363636, 426.6772727], 1, [410.0]]
22 [[426.6772727, 449.1181818], 0, []]
23 [[449.1181818, 471.5590909], 1, [451.0]]
24 [[471.5590909, 494.0], 2, [493.0, 494.0]]
```

```
TheFrequencies=map(T,op,2)
```

```

1 21
2 22
3 15
4 19
5 14
6 7
7 9
8 4
9 4
10 3
TheFrequencies = 11 3
12 1
13 2
14 1
15 2
16 3
17 0
18 0
19 1
20 0
21 1
22 2

```

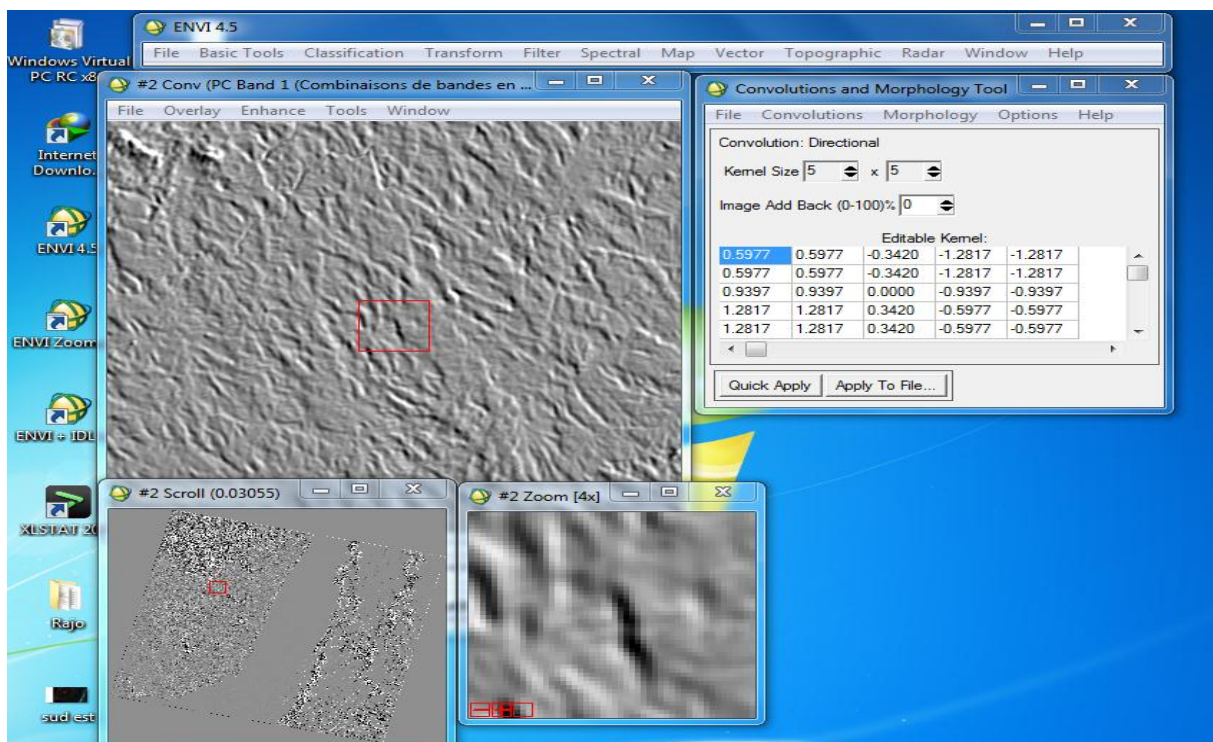
```
TheClasses=map(T,op,1)
```

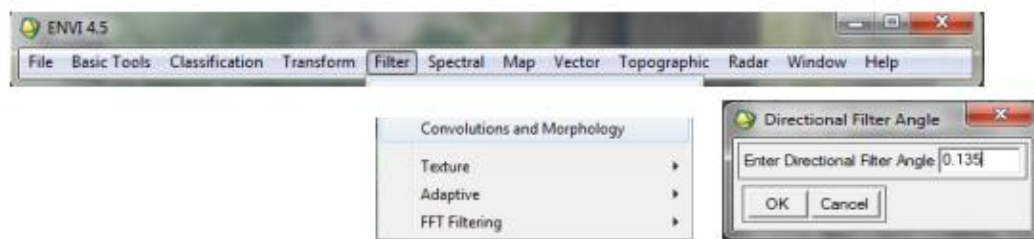
```

1 [-∞, 22.74090909]
2 [22.74090909, 45.18181818]
3 [45.18181818, 67.62272727]
4 [67.62272727, 90.06363636]
5 [90.06363636, 112.5045455]
6 [112.5045455, 134.9454545]
7 [134.9454545, 157.3863636]
8 [157.3863636, 179.8272727]
9 [179.8272727, 202.2681818]
10 [202.2681818, 224.7090909]
TheClasses = 11 [224.7090909, 247.15]
12 [247.15, 269.5909091]
13 [269.5909091, 292.0318182]
14 [292.0318182, 314.4727273]
15 [314.4727273, 336.9136364]
16 [336.9136364, 359.3545455]
17 [359.3545455, 381.7954545]
18 [381.7954545, 404.2363636]
19 [404.2363636, 426.6772727]
20 [426.6772727, 449.1181818]
21 [449.1181818, 471.5590909]
22 [471.5590909, 494.0]

```

ANNEXE 8 : Interface d'utilisation du filtre





(a)

(b)

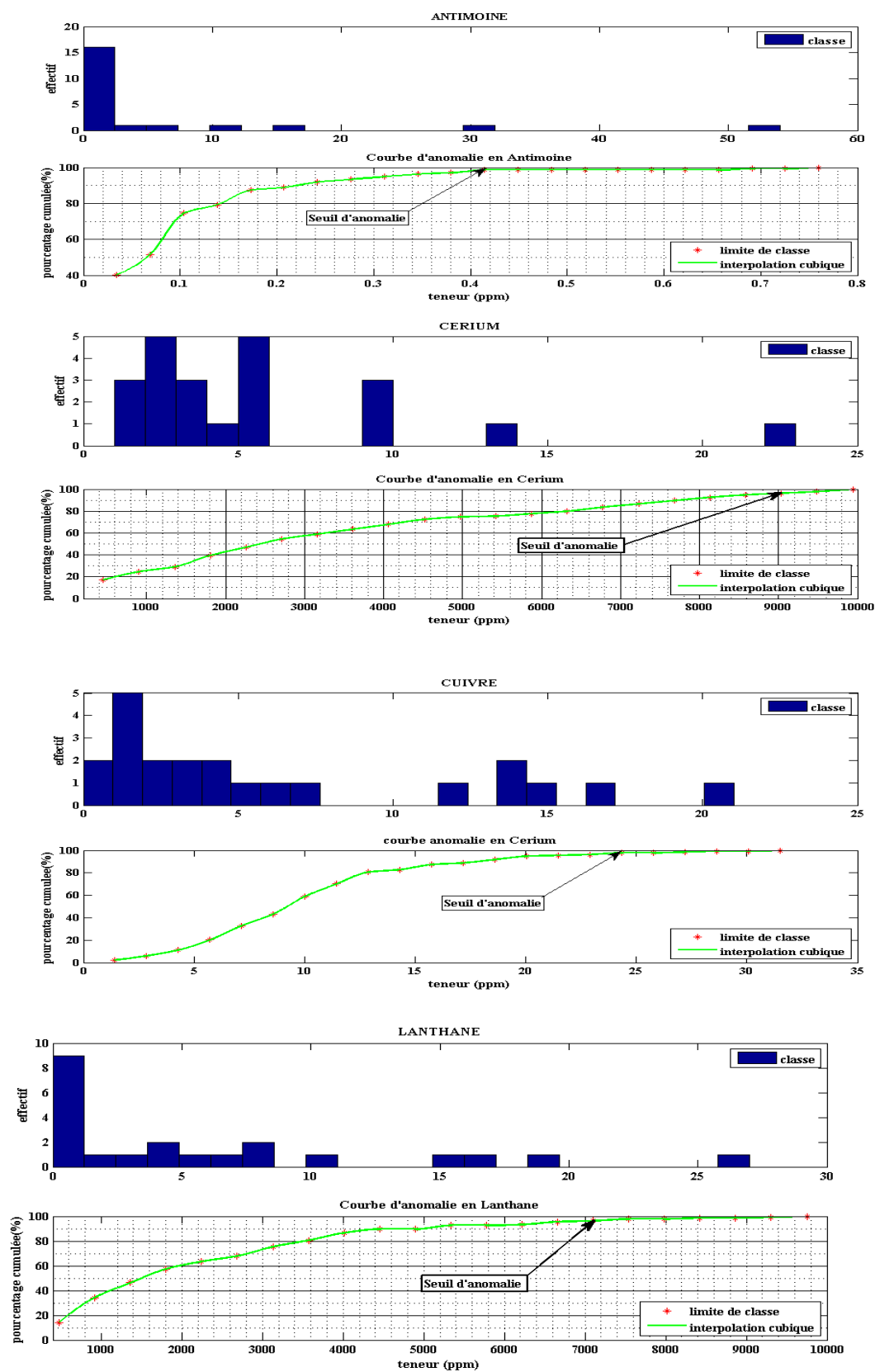
Utilisation du filtrage :

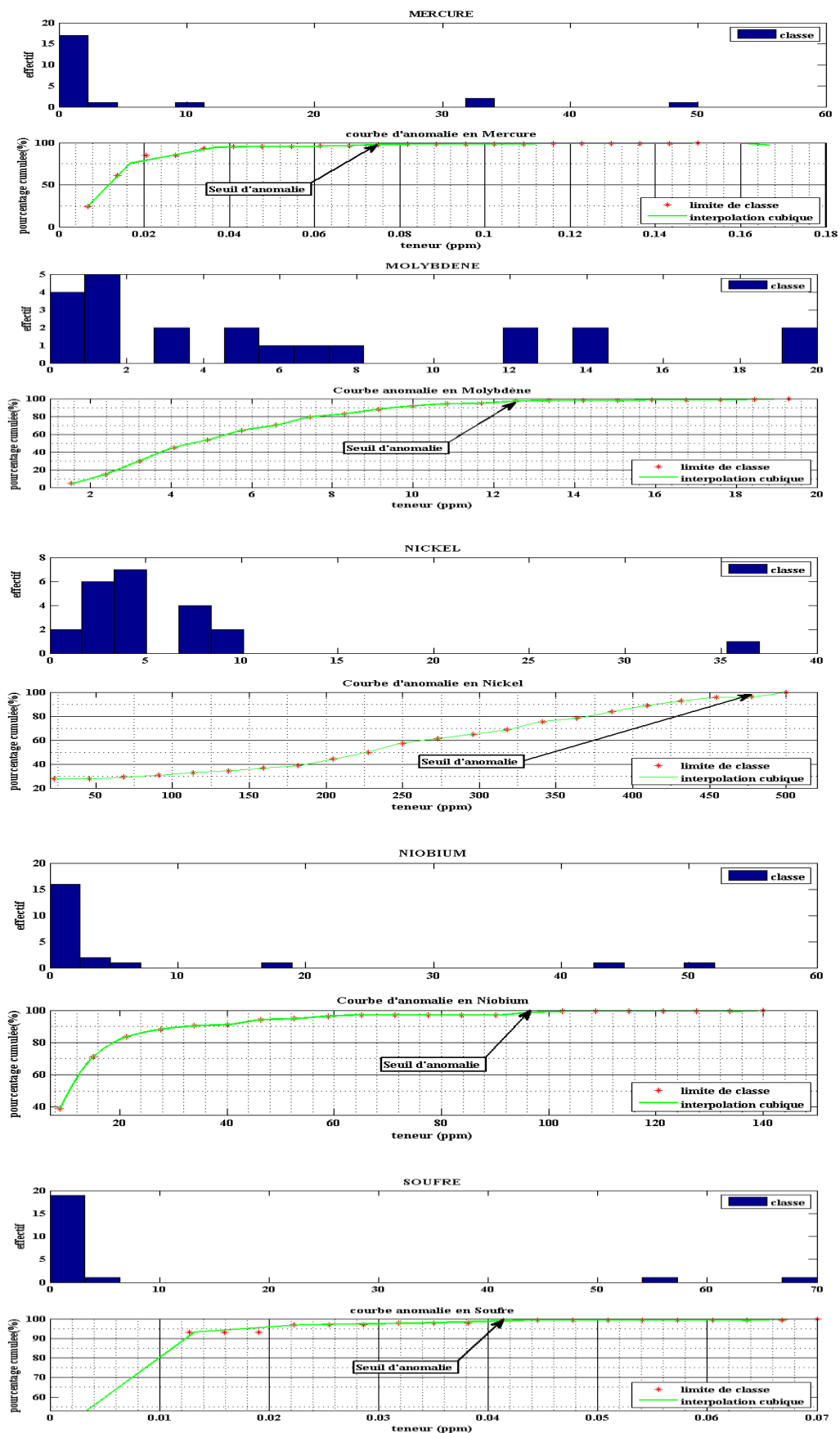
- (a) choix d'une fonction de convolution,
- (b) choix du type de filtre et de l'angle de balayage dans le cas d'un filtre directionnel.

ANNEXES 9: Photo du Seuil déversoir Rio Tinto QMM SA.



ANNEXES 10: Courbe de fréquence cumulée des éléments Sb, Ce, Cu, La, Hg, .Ni, Nb, Te et S.





ANNEXE 11 : Courbes d'Isoteneurs en Sb, Ce, Cu, La, Hg, .Ni, Nb, Te et S.

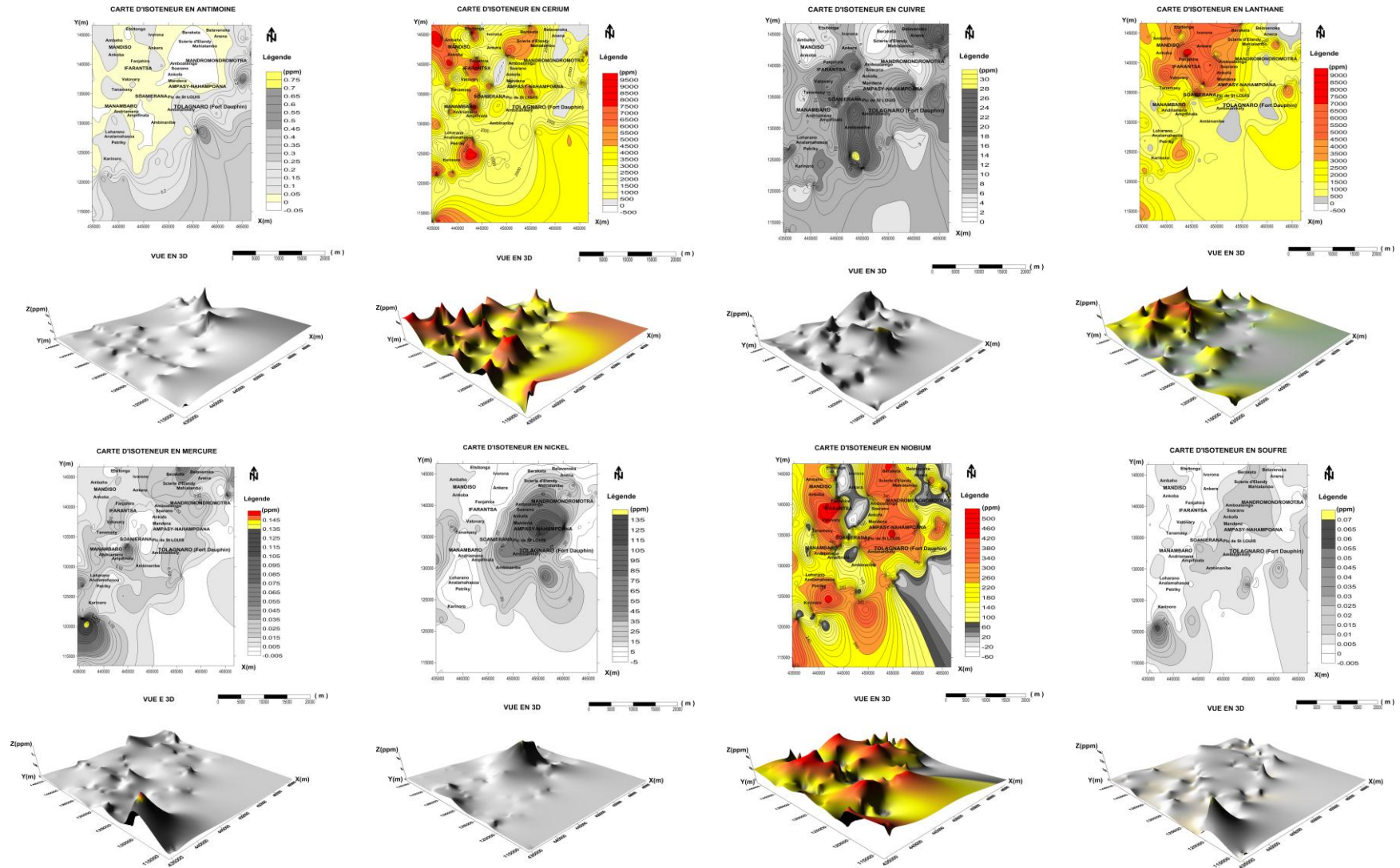


TABLE DES MATIERES

REMERCIEMENTS.....	i
SOMMAIRE	iii
LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES.....	v
LISTE DES TABLEAUX	viii
LISTE DES FIGURES.....	ix
INTRODUCTION.....	1
PARTIE I: GENERALITES SUR LA ZONE D'ETUDE	
CHAPITRE I. MONOGRAPHIE DE LA REGION D'ETUDE	2
I.1. LOCALISATION DE LA ZONE D'ETUDE	2
I.1.1. LA REGION ANOSY	2
I.1.2. LE DISTRICT DE TOLAGNARO	2
I.1.3. LA ZONE D'ETUDE (feuille NO62).....	2
I.2. GEOMORPHOLOGIE ET TOPOGRAPHIE	6
I.3. CLIMATOLOGIE	6
I.3.1. TEMPERATURE (T)	6
I.3.2. PRECIPITATION (P).....	6
I.3.3. EVAPORATION (E).....	6
I.3.4. BILAN HYDRIQUE (B)	7
I.3.5 - LE VENT.....	9
I.3.6. FONCTIONNEMENT DES SYSTEMES HYDROLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES	9
I.3.6.1. Bassin hydrographique de la rivière Lanirano	11
I.3.6.2. Bassin hydrographique de la rivière Mandromodromotra.....	11
I.3.6.3. Qualité des eaux de surface	13
I.3.6.4. Qualité des eaux souterraines	13
I.3.7. FLORES EXISTANTES	14
I.3.8. CARTE D'OCCUPATION DU SOL DE LA REGION D'ETUDE:	15
I.3.9. ESPECES ET HABITATS FAUNIQUES	16
I.3.10. ECOSYSTEME AQUATIQUE	18
I.4. CADRE GEOLOGIQUE DE LA REGION	18
I.5. CONTEXTE SOCIO-ECONOMIQUE	19
I.5.1. CONSTATATION DU MILIEU HUMAIN	19
I.5.1.1. Population et constat démographique	19

I.5.1.2. Groupe ethnique de la population	19
I.5.1.3. Activité culturelle	20
I.5.1.4. Religions	20
I.5.1.5. Education et santé.....	20
I.5.1.6 Approvisionnement en eau potable et en électricité	21
I.5.2. ACTIVITE DE LA POPULATION ET TYPE D'OCCUPATION DU SOL	21
I.5.2.1. L'agriculture.....	21
I.5.2.2. L'élevage.....	22
I.5.2.3. La Pêches.....	22
I.5.2.4. Le tourisme.....	22
I.5.2.5. L'industrie de transformation et artisanat.....	22
I.5.2.6. Bois, charbon de bois et la Tavy	23
I.5.3. LE TRANSPORT	23
I.5.3.1. Le transport terrestre	23
I.5.3.2 Le transport aérien.....	23
I.5.3.3. Le transport Maritime.....	23
I.5.4. RESEAUX DE TELECOMMUNICATIONS	24
I.5.5. INFORMATION ET COMMUNICATION	24
CHAPITRE II. APERCU DU CADRE GEOLOGIQUE	25
II.1. GEOLOGIE DE MADAGASCAR.....	25
II.1.1. EVOLUTION DES CONCEPTS GEOLOGIQUES DU SOCLE PRECAMBRIEN DE MADAGASCAR.....	25
II.1.1.1. D'après Henri BESAIRIE (1948 et 1971)	25
II.1.1.2. D'après G.HOTTIN (1976-1978)	28
II.1.1.3. D'après COLLINS A. et B. WINDLEY, 2000 et 2002	31
II.1.2. LA COUVERTURE SEDIMENTAIRE	37
II.1.2.1. Le KARROO	37
II.1.2.2. Le POSTKARROO.....	38
II.2. GEOLOGIE DU SUD DE MADAGASCAR.....	41
II.3. GEOLOGIE DE LA ZONE NO62.....	43
PARTIE II: MATERIELS ET METHODOLOGIES	
CHAPITRE III. MATERIELS.....	46
III.1 LES LOGICIELS	46
III.2 LES DONNEES UTILISEES	46
III.2.1. DONNEES IMAGES	46

III.2.2. DONNEES CARTOGRAPHIQUES	47
III.2.2.1. Cartes géologiques et Cartes topographiques	47
III.2.2.2. Base de données 100 et 500.....	47
III.2.3 DONNEES GEOCHIMIQUES	47
III.2.4. DONNEES GEOPHYSIQUES	50
III.2.4.1. Données de télédétection	50
III.2.4.2. Données magnétique	50
CHAPITRE IV. METHODOLOGIE	51
IV.1. TRAITEMENT DES DONNEES GEOCHIMIQUES :	52
IV.1.1. Analyse univariable.....	53
IV.1.2. Analyse à variable multiple.....	64
IV.2. METHODOLOGIE POUR LES TRAITEMENTS ET EXPLOITATION DES DONNÉES DE LA TELEDETECTION.	65
IV.2.1. TRAITEMENTS DES IMAGES ETM+ DE LANDSAT-7	65
IV.2.1.1. Affichage en fausses couleurs : composition colorée	67
IV.2.1.2. Délimitation de la lithologie:.....	67
IV.2.2. TRAITEMENTS DES DONNEES AEROMAGNETIQUES	70
IV.2.4. CARTE D'OCCUPATION DU SOL	72
PARTIE III: RESULTATS ET INTERPRETATIONS	
CHAPITRE V : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DU TRAITEMENT DES DONNEES GEOCHIMIQUES	73
V.1. ANALYSE UNIVARIABLE.....	73
V.2. ANALYSE A VARIABLE MULTIPLE	75
V.3. LA CARTOGRAPHIE GEOCHIMIQUE (COURBE D'ISOTENEUR).....	79
V.3.1. LE MANGANESE	80
V.3.2. LE MOLYBDENE	81
V.3.3. LE PLOMB	82
V.3.4. LE TUNGSTENE.....	83
V.3.5 L'URANIUM	84
V.3.6. LE VANADIUM.....	85
V.3.7. L'YTTRIUM	86
V.3.8. LE ZINC.....	87
V.4.CARTE GEOLOGIQUE ET ELABORATION DES CARTES DES INDICES :	90
V.4.1. CARTES DES ECHATILLONS A VALEUR ANOMALES	90
V.4.5. INTERPRETATION DES CARTES DES INDICES	94

V.4.5.1. Pour les indices en très fortes corrélations	94
V.4.5.2. Pour les indices en fortes corrélations	94
CHAPITRE VI : RESULTATS ET INTERPRETATIONS DU TRAITEMENT DES DONNEES GEOPHYSIQUES	96
VI.1. RESULTATS DU TRAITEMENT DES IMAGES SATELLITALES DE « FORT DAUPHIN » ET INTERPRETATIONS	96
VI.1.1 LES TRAITEMENTS DES IMAGES SATELLITALES SOUS ERDAS 2011 ET ENVI 4.5.	96
VI.1.1.1. Résultats du traitement en fausses couleurs (compositions colorées):.....	96
VI.1.1.3. Résultats du traitement par band ratios :	101
VI.1.1.4. Résultats du traitement par filtrage	103
VI.1.2. CARTOGRAPHIE LINEAMENTAIRE :	104
VI.1.3. ORIENTATION ANALYSE STATISTIQUE DE LA CARTE LINEAMENTAIRE	106
VI.1.3.1. Résultats du traitement avec ARCGIS 10 :	106
VI.1.3.2. La rosace de direction tracée avec le logiciel Rose.net Analyse statistique de la carte linéamentaire :	108
VI.2. RESULTATS D'ANALYSE DE DONNEES AEROMAGNETIQUES	109
VI.2.1.LE CHAMP MAGNETIQUE TOTAL :	109
VI.2.2. REDUCTION AUX POLES:.....	110
VI.2.3. LA DERIVATION VERTICALE:	111
VI.1.3. CARTOGRAPHIE SOUS SIG	115
CONCLUSION GENERALE	120
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	121
ANNEXES.....	1
TABLE DES MATIERES	

ANALYSES ET TRAITEMENTS DES DONNEES GEOLOGIQUES EN VUE D'ELABORATION DES CARTES DES INDICES ET STRUCTURALES CAS DE LA REGION FORT DAUPHIN : SUD-EST DE MADAGASCAR

Auteur : RAHARO Pierre Albert

E-mail : rpierrealbert@yahoo.com

Tel : 0345565338

Nombre des pages : 122

Nombre des figures : 49

Nombre de tableaux : 29

Nombre des annexes : 11



RESUME

Afin d'intégrer et de traiter ces données géologiques provenant de ces sources différentes, il est nécessaire de disposer d'un système d'information géographique.

Dans ce travail, après études des dernières données géologiques de la région de Fort Dauphin, nous avons pu établir que la zone abrite divers minerais encore inexploités.

Du point de vue géochimique, Selon l'analyse de données à partir de l'applications et de logiciels spécifiques en découlent l'hypothèse de présence de minerais contenant de manganèse, de molybdène, du plomb, de tellurium, de tungstène, d'uranium de vanadium, d'yttrium et de zinc dans des proportions considérables ; mais aussi l'existence d'autres éléments d'intérêts économiques.

L'utilisation des méthodes géophysique aéromagnétique et la radiométrie au sol nous a permis d'étudier l'anomalie magnétique des éléments géochimiques dans la région de Fort Dauphin.

Ceci conduit à dire que la feuille NO62 est une zone riche en ressources minérales, et se trouve être un réservoir exploitable à forte potentialité économique, au niveau d'exploitation minière.

Mots Clés : Fort Dauphin, Système d'Information Géographique, aéromagnétique.

ABSTRACT

In order to integrate and to treat these geological data coming from these different sources, it's necessary to have a geographical information system.

In this work, after study of the last geological data of Fort Dauphin region, we could establish that the zone shelters various even untapped ores.

Of one point of view geochemical, these analyses of data from applications and specific software ensue the hypothesis of presence of ores containing for example: the Manganese, the Molybdenum, Lead, the Tellurium, the Tungsten, the uranium, the Vanadium, the Yttrium and the Zinc in considerable proportions, for example of it; but also the existence of other elements of economic interests.

The use of the methods geophysics aero aeromagnetic and the radiometry to soil allowed us to study the magnetic anomaly of the elements geochemical in region of Fort Dauphin.

It lead to say that the NO62 leaf is a zone rich in ores of economic interests, and be to be an exploitable reservoir to strong economic potentiality, to the level of mining exploitation.

Key words: Fort Dauphin, Geographical information System, aeromagnetic.