

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN  
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDE I

FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE  
SCIENCES, TECHNOLOGIE  
ET GÉOSCIENCES



REPUBLIC OF CAMEROON  
Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE PROGRAMME  
SCIENCE –TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

*DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES*

Laboratoire de Géosciences des Formations Profondes et Applications

*Laboratory of Geosciences of Internal Formations and Applications*

**PÉTROGENÈSE, STRUCTUROGENÈSE ET  
POTENTIALITÉS MÉTALLOGÉNIQUES DES  
FORMATIONS PRÉCAMBRIENNES  
DE NGOURA-COLOMINES:EST-CAMEROUN**

Thèse présentée et soutenue le 23 mars 2021 en vue de l'obtention du grade de  
**Docteur/Ph.D en Sciences de la Terre**

Spécialité Géosciences des Formations Profondes et Applications  
Option Pétrologie et Géologie Structurale

Par

**TAKODJOU WAMBO Jonas Didéro**

Matricule 09X0503

Master ès-Sciences



**Devant le Jury :**

**Président :** NDJIGUI Paul-Désiré, Professeur.,

**Rapporteurs:** NZENTI Jean Paul, Professeur.,

GANNO Sylvestre, Maître de Conférences.,

**Membres :** FOUATEU Rose épouse YONGUE, Professeur.,

NJILAH Issac Konfor, Maître de Conférences.,

GANWA Alembert Alexandre, Maître de Conférences.,

Université de Yaoundé I ;

Université de Ngaoundéré ;

Année académique 2020-2021

UNIVERSITÉ DE YAOUNDE I

FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET  
FORMATION DOCTORALE

SCIENCES – TECHNOLOGIE  
ET GÉOSCIENCES



UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE PROGRAMME

SCIENCES, TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

**LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS  
PROFONDES ET APPLICATIONS**

\*\*\*\*\*

**ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THESE DE  
DOCTORAT/Ph.D**

\*\*\*\*\*

Spécialité : **Pétrologie et Géologie Structurale**

Nom du candidat : **TAKODJOU WAMBO JONAS DIDERO**

Matricule : **09X0503**

Titre de la thèse : « **Pétrogenèse, structurogenèse et potentialités métallogéniques des formations précambriennes de Ngoura-Colomines:Est-Cameroun** »

Date de soutenance : **Mardi le 23 Mars 2021**

Nous, membres du jury, après avoir lu le document qui nous a été présenté ce jour, attestons que le candidat a effectué toutes les corrections conformément aux observations formulées lors de la soutenance.

En foi de quoi, nous lui délivrons cette **Attestation de Correction** pour servir et faire valoir ce que de droit./

Fait à Yaoundé, le **12 mai 2021**

**PRESIDENT**

**NDJIGUI Paul-Désiré**  
*Professeur*

**RAPPORTEURS**

**NZENTI Jean Paul**  
*Professeur*

**GANNO Sylvestre**  
*Maître de Conférences*

**EXAMINATEURS**

**FOUATEU Rose épouse YONGUE**  
*Professeur*

**NJILAH Issac Konfor**  
*Maître de Conférences*

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN  
Paix – Travail – Patrie

UNIVERSITÉ DE YAOUNDE I

FACULTÉ DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE  
SCIENCES, TECHNOLOGIE  
ET GÉOSCIENCES



REPUBLIC OF CAMEROON  
Peace – Work – Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATE PROGRAMME  
SCIENCE –TECHNOLOGY  
AND GEOSCIENCES

DÉPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

*DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES*

Laboratoire de Géosciences des Formations Profondes et Applications

*Laboratory of Geosciences of Internal Formations and Applications*

**PÉTROGENÈSE, STRUCTUROGENÈSE ET  
POTENTIALITÉS MÉTALLOGÉNIQUES DES  
FORMATIONS PRÉCAMBRIENNES  
DE NGOURA-COLOMINES:EST-CAMEROUN**

Thèse présentée et soutenue le 23 mars 2021 en vue de l'obtention du grade de  
**Docteur/Ph.D en Sciences de la Terre**

Spécialité **Géosciences des Formations Profondes et Applications**  
Option **Pétrologie et Géologie Structurale**

Par

**TAKODJOU WAMBO Jonas Didéro**

Matricule **09X0503**

**Master ès-Sciences**

**Devant le Jury :**

**Président :** NDJIGUI Paul-Désiré, Professeur.,

**Rapporteurs:** NZENTI Jean Paul, Professeur.,

GANNO Sylvestre, Maître de Conférences.,

**Membres :** FOUATEU Rose épouse YONGUE, Professeur.,

NJILAH Issac Konfor, Maître de Conférences.,

GANWA Alembert Alexandre, Maître de Conférences.,

Université de Yaoundé I ;

Université de Ngaoundéré ;

Année académique 2020-2021

# DÉDICACE

**A**

**- mon feu père WAMBO Jean Pierre**

**-ma mère KENMOGNIE Cécile**

## REMERCIEMENTS

Quel que soit l'enthousiasme et la détermination, un travail comme celui-ci n'est possible que grâce à la collaboration et au soutien de nombreuses personnes à qui je tiens à adresser toute ma reconnaissance.

Je remercie l'éternel Dieu tout puissant pour avoir jeté un regard compatissant sur ma modeste personne et m'avoir donné le courage, la santé et surtout de m'avoir gardé en vie tout au long de la rédaction de cette Thèse.

J'adresse mes sincères remerciements au Recteur de l'Université de Yaoundé I, Pr Maurice SOSSO et au Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, le Pr Jean Claude TCHOUANKEU.

Je remercie le Professeur Paul Désiré NDJIGUI Chef de Département des Sciences de la Terre qui a su instauré au Département un environnement paisible, stimulateur et d'échange permettant aux étudiants de s'épanouir et de prospérer dans la recherche.

La réalisation de ce travail a bénéficié de la contribution de nombreuses personnes :

- Les Professeurs Jean Paul NZENTI et Sylvestre GANNO, ont guidé mes pas en recherche depuis mon inscription et thèse en 2016 à l'Université de Yaoundé I. C'est grâce à l'intérêt qu'ils ont toujours accordé à mes travaux de recherche, la confiance et le climat de complicité qu'ils ont su instaurer entre nous que j'ai pu aller jusqu'au bout de ce travail.

- Les Professeurs Paul D. ASIMOW du California Institute of Technology (USA) et Amin Beiranvand POUR de l'Université de Terengganu (Malaisie) m'ont respectivement aidés à obtenir les données géochimiques sur roche totale des granitoïdes et enclaves d'amphibolites et initié au traitement des images satellitaires pour la cartographie de l'altération hydrothermale. Tous deux (Américain et Malaisien), malgré leurs nombreuses occupations et la distance qui nous sépare, ont fait preuve d'une collaboration exemplaire. Leurs remarques, leurs critiques et leur compréhension m'ont permis de persévérer malgré les épreuves difficiles. J'ai beaucoup appris d'eux.

J'exprime ma reconnaissance à tous les autres enseignants du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, pour les enseignements et les conseils qu'ils n'ont cessés de nous prodiguer pendant mon parcours universitaire.

J'exprime ma totale reconnaissance à mes parents, mes frères et sœurs pour l'aide et les sacrifices consentis durant toutes les années de préparation de cette thèse.

J'exprime ma gratitude à tous les membres et étudiants du LPGS je pense en particulier aux Professeurs: Timoléon NGNOTUÉ et Boniface KANKEU et aux docteurs: Gus Djibirl KOUANKAP NONO, Evine Laure NJIOSSEU TANKO TCHUIMENI, Cyrille CHEBEU, Jean Lavenir NDEMA MBONGUE, Emmanuel NOMO NEGUE, Victor METANG, Rose NGO BELNOUN, Nchare NZINA, Depesquidoux I TCHAPTCHET, Prince Emilien DANGUENE Y. à mes amis et camarades dudit laboratoire notamment: Didas NKAMENI, Donald FOSSI, Roméo KOUAMEN, Landry SOH TAMEHE, Marvine NZEPANG TANKWA, Hermine MVODO, Philomène NGA, Cyriel MOUDIOH, Brice KAMGUIA, Habib DADJO, Arlette SOH, Guy TAKAM, Joél Steven MBITA, Alex SEPWOOU et Lysiane KOUAYEP pour tous les moments de labeurs que nous avons passés aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire pour la présente Thèse.

Un merci particulier à mes amis de promotion à l'Université de Yaoundé I, je pense ici à: Philippe ESSOMBA, Liliane Madelaine NYASSA, Yves Valentin NZWINDA, Carine NAAH YUH, Joseline JUIANG DIEUGNOU, Traore MAMADOU, Alex Thibault NGUEMSI KOUAJO, Peguy Noel NKOUMEN MEMZOUE, Didier Ngartoizo NOUKOUMON, Felicite AYABA, Lionel TCHAMI NFADA pour les années passées tout au long de notre parcours académique.

L'homme quittera son père et sa mère et s'attachera à une femme et les deux formeront une seule chair. Ma charmante compagne, merci pour l'attention que tu ne cesses de porter à mon égard, ton soutien colossal, ton affection et surtout tes judicieux conseils. C'est une grosse chance, une grande bénédiction et surtout un immense plaisir de t'avoir à mes côtés. Que du bonheur !!!

Ma politesse m'impose d'aviser tous ceux qui de près ou de loin ont contribué à la réalisation de cette Thèse et dont les noms ne sont pas énumérés ici d'être rassurés de ma profonde reconnaissance.

# TABLE DE MATIERES

<b>DÉDICACE</b> .....	<b>i</b>
<b>REMERCIEMENTS</b> .....	<b>ii</b>
<b>TABLE DE MATIERES</b> .....	<b>iv</b>
<b>LISTE DES FIGURES</b> .....	<b>viii</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX</b> .....	<b>xii</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>xiii</b>
<b>LISTE DES ABREVIATIONS</b> .....	<b>xiv</b>
<b>RÉSUMÉ</b> .....	<b>xv</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>xvii</b>
<b>INTRODUCTION GÉNÉRALE</b> .....	<b>1</b>
1. Introduction .....	2
2. Problématique globale et contexte de l'étude.....	2
3. Problèmes spécifiques à la région de Ngoura-Colomines et buts de l'étude .....	3
4. Structure de la thèse .....	5
<b>CHAPITRE I. CADRE NATUREL</b> .....	<b>7</b>
I.1- CADRE GÉOGRAPHIQUE .....	8
I.1.1- Localisation.....	8
I.1.2- Climat .....	9
I.1.3- Géomorphologie .....	10
I.1.3.1- Orographie .....	10
I.1.3.2- Hydrographie .....	10
I.1.4- Végétation et faune .....	10
I.1.5- Géographie économique et humaine. ....	11
I.2- CADRE GÉOLOGIQUE.....	11
I.2.1. Domaine cratonique .....	11
I.2.2- La Chaîne Panafricaine Nord Équatoriale (CPNE) .....	13
I.3- TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LA RÉGION DE NGOURA-COLOMINES.....	18
<b>CHAPITRE II. MATÉRIEL ET MÉTHODES</b> .....	<b>20</b>
INTRODUCTION.....	21
II.1- SUR LE TERRAIN .....	21
II.2- EN LABORATOIRE .....	22
II.2.1- Confection et observation des lames minces.....	23
II.2.2-Méthodes géochimiques .....	23
II.2.3- Méthodes de télédétection .....	24
II.2.3.1- Cartographie des accidents tectoniques régionaux.....	24
II.2.3.2- Cartographie des altérations hydrothermales .....	28
II.2.4 Méthodes d'analyse géostatistique .....	34
II.2.4.1- Traitement des données .....	35
II.2.4.2- Analyse SIG .....	37
<b>CHAPITRE III. INVENTAIRE LITHOLOGIQUE ET ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE</b> .....	<b>38</b>

INTRODUCTION.....	39
III.1- ENSEMBLE MAGMATIQUE.....	40
III.1.1- Granites.....	40
III.1.1.1- Granites à biotite et à grains grossiers.....	41
III.1.1.2- Granites à biotite et à grains moyens ( <i>Ech. NDA1</i> ).....	43
III.1.1.3 - Granites leucocrates à grains grossiers.....	45
III.1.1.4- Granites roses à tendance pegmatitique.....	47
III.1.2- Granodiorite ( <i>Ech. BOJI</i> ).....	49
III.2- ENSEMBLE MÉTAMORPHIQUE.....	50
III.2.1- Gneiss à biotite et à amphibole.....	51
III.2.2- Amphibolites.....	52
III.2.3- Mylonites ( <i>Ech. TAG2</i> ).....	54
III.3- ENSEMBLE DES ROCHES FILONIENNES.....	57
III.3.1- Filons de pegmatite et d'aplite.....	57
III.3.2- Veines de quartz.....	57
CONCLUSION.....	60
<b>CHAPITRE IV. ANALYSE DE LA DÉFORMATION DANS LES DIFFÉRENTS</b>	
<b>ENSEMBLES LITHOLOGIQUES.....</b>	<b>61</b>
IV.1- ANALYSE MORPHO-STRUCTURALE.....	62
IV.1.1- Analyse de la carte topographique.....	62
IV.1.1.1- Orographie.....	62
IV.1.1.2- Hydrographie.....	66
IV.1.2- Analyse des images satellitaires.....	69
IV.1.2.1 Données utilisées.....	69
IV.1.2.2- Cartographie des linéaments.....	70
IV.1.2.3- Signification structurale et analyse statistique des linéaments.....	74
IV.2- ANALYSE STRUCTURALE.....	77
IV.2.1- Première phase de déformation $D_1$ .....	77
IV.2.1.1- Structures planaires.....	77
IV.2.1.2- Structures linéaires.....	79
IV.2.1.3- Structures de volume.....	79
IV.2.1.3.1- Structures plicatives.....	79
IV.2.1.3.2- Boudins $B_1$ .....	80
IV.2.2- Deuxième phase de déformation $D_2$ .....	80
IV.2.2.1- Schistosité $S_2$ .....	81
IV.2.2.2- Cisaillement $C_2$ .....	81
IV.2.2.3- Structures linéaires: Linéation d'étirement minéral $Le_2$ .....	81
IV.2.2.4- Structures plicatives.....	83
IV.2.3- Troisième phase de déformation $D_3$ .....	84
IV.2.3.1- Plissements $P_3$ .....	84
IV.2.3.2- Cisaillements $C_3$ .....	85
IV.2.4- Quatrième phase de déformation $D_4$ .....	85
IV.2.4.1- Fractures $F_4$ .....	86
IV.2.4.2 - Diaclases.....	86
IV.2.4.3- Filons et veines de quartz minéralisées.....	88
IV.3- ANALYSE MICROSTRUCTURALE.....	89
IV.3.1- Microstructures de déformation à l'état magmatique.....	89
IV.3.2- Microstructures de déformation à l'état sub-magmatique.....	89
IV.3.3- Microstructures de déformation à l'état solide.....	90
CONCLUSION.....	93

<b>CHAPITRE V. ETUDE GÉOCHIMIQUE.....</b>	<b>94</b>
INTRODUCTION.....	95
V.1- ENSEMBLE MAGMATIQUE.....	95
V.1.1- Granites .....	95
V.1.1.1- Éléments majeurs .....	95
V.1.1.2- Éléments en trace .....	96
V.1.1.3- Terres rares.....	98
V.1.2- Granodiorites.....	99
V.1.2.1- Éléments majeurs.....	99
V.1.2.2- Éléments en trace .....	101
V.1.2.3- Terres rares.....	101
V.1.3- Adamellites .....	101
V.1.3.1- Éléments majeurs.....	101
V.1.3.2- Éléments en trace .....	102
V.1.3.3- Terres rares.....	102
V.1.4- Tonalites.....	102
V.1.4.1- Éléments majeurs.....	102
V.1.4.2- Éléments en trace .....	102
V.1.4.3- Terres rares.....	104
V.2- ENSEMBLE MÉTAMORPHIQUE.....	104
V.2.1- Éléments majeurs .....	104
V.2.2- Éléments en trace .....	108
V.2.3- Terres rares.....	108
CONCLUSION .....	112
<b>CHAPITRE VI. POTENTIALITÉS MÉTALLOGÉNIQUES .....</b>	<b>113</b>
<b>DE NGOURA-COLOMINES.....</b>	<b>113</b>
INTRODUCTION.....	114
VI.1 ANALYSE GÉOSTATISTIQUE PAR KRIGEAGE .....	114
VI.1.1 Description des puits .....	114
VI.1.2 Étude pétrographique des fonds de batées .....	115
VI.1.3. Morphologie des grains d'or.....	118
VI.1.4 Analyse géostatistique des données de terrain.....	121
VI.1.4.1-Teneur en or.....	121
VI.1.4.2-Épaisseurs de la couche minéralisée et du stérile .....	125
VI.1.5- Analyse des données SIG .....	127
VI.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALTÉRATION HYDROTHERMALE .....	129
VI.2.1 Analyse par télédétection .....	129
VI.2.1.1 Caractéristiques des images utilisées .....	129
VI.2.1.2 Analyse en Composantes Principale (ACP).....	131
VI.2.1.2 Analyse en Composante Indépendante (ACI).....	141
VI.2.1.3 Analyse des rapports et combinaisons de bandes .....	146
VI.3 PÉTROGRAPHIE ET MINÉRALOGIE DE LA MINÉRALISATION AURIFÈRE.....	151
VI.3.1 Minéralisation aurifère et altération hydrothermale associée .....	151
VI.3.1.1 Style de minéralisation.....	151
VI.3.1.2 Description de l'altération hydrothermale .....	151
VI.3.2 Minéralogie d'altération par DRX .....	156
CONCLUSION .....	160

<b>CHAPITRE VII. INTERPRETATION-DISCUSSION ET CORRELATIONS REGIONALES .....</b>	<b>161</b>
INTRODUCTION.....	162
VII.1- PÉTROGENÈSE .....	162
VII.1.1- Pétrographie et caractères géochimiques.....	162
VII.1.1.1- Ensemble magmatique.....	162
VII.1.1.2- Ensemble métamorphique .....	165
VII.1. 2- Contexte géotectonique .....	166
VII. 2- STRUCTUROGENÈSE .....	168
VII. 2.1- Géomorphologie structurale .....	168
VII. 2.2- Analyse structurale .....	169
VII.2.2.1 Evolution tectonique .....	169
VII.2.2.2 Cinématique de la zone de cisaillement de Ngoura-Colomines .....	172
VII.2.2.3 Modèle tectonique.....	173
VII. 3- POTENTIALITÉS MÉTALLOGÉNIQUES.....	174
VII.3.1- Morphologie des grains d'or et implications sur la source .....	174
VII.3.2- Facteurs contrôlant la distribution spatiale de la minéralisation aurifère alluvionnaire .....	175
VII.3.3- Altération hydrothermale associée à la minéralisation aurifère en surface .....	176
VII.4- CORRÉLATIONS RÉGIONALES.....	179
<b>CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES .....</b>	<b>181</b>
<b>RÉFÉRENCES .....</b>	<b>185</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>200</b>

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1.1.</b> Localisation du secteur d'étude .....	8
<b>Figure 1.2.</b> Diagramme ombrothermique de la région de l'Est-Cameroun.....	9
<b>Figure 1.3:</b> Carte géologique du Sud-ouest Cameroun .....	12
<b>Figure 1.4.</b> Carte de reconstitution des domaines panafricains NE brésilien et Ouest africain montrant la continuité entre les chaînes de Sergipano et Nord Équatoriale.....	14
<b>Figure 1.5.</b> Carte géologique du Cameroun montrant la localisation du secteur Ngoura-Colomines et les principaux domaines lithotectoniques .....	16
<b>Figure 3.1.</b> Carte d'échantillonnage .....	39
<b>Figure 3.2.</b> Principaux modes d'affleurement de l'ensemble magmatique.....	40
<b>Figure 3.3.</b> Caractères pétrographiques des granites à biotite et à grains grossiers de Ngogon-goubou, Kpangara-Kadei, Madoubal, Boden et Ndembara. ....	42
<b>Figure 3.4.</b> Caractères pétrographiques des granites à biotite et à grains moyens de Ndembara.. ....	44
<b>Figure 3.5.</b> Caractères pétrographiques des granites leucocrates à grains grossiers de Tapondo.....	46
<b>Figure 3.6.</b> Caractères pétrographiques des granites roses à tendance pegmatitique de Tingou et Ndembara.....	48
<b>Figure 3.7</b> Caractères pétrographiques des granodiorites de Yangosso, Ngoura et de Ndembara. ....	50
<b>Figure 3.8.</b> Caractères pétrographiques des gneiss à biotite et à amphibole de Ngogon-goubou et de Ndembara.....	52
<b>Figure 3.9.</b> Caractères pétrographiques des amphibolites de Ngogon-goubou et de Ndembara. ....	54
<b>Figure 3.10.</b> Caractères pétrographiques des mylonites de Madubal, Colomines et de Boden. ....	56
<b>Figure 3.11.</b> Caractères pétrographiques des roches filoniennes de la zone d'étude.. ....	58
<b>Figure 3.12.</b> Carte géologique de la zone d'étude d'après Gazel et Gérard, 1954.....	59
<b>Figure 3.13.</b> Carte géologique de la zone d'étude (modifiée de Gazel et Gérard, 1954).....	59
<b>Figure 4.1.</b> Modèle numérique de terrain extrait de la carte topographique du secteur Ngoura-Colomines et digitalisée à partir des feuillets topographiques de Batouri et Bétaré-Oya .....	63
<b>Figure 4.2.</b> Carte des unités géomorphologiques du secteur d'étude, extraite de l'image SRTM.....	64
<b>Figure 4.3.</b> Carte orographique du secteur d'étude, extraite de l'image SRTM .....	64
<b>Figure 4.4.</b> Profils topographiques suivant les traits de coupe AB, CD, EF .....	65
<b>Figure 4.5.</b> Carte des lignes de crêtes du secteur d'étude.....	65
<b>Figure 4.6.</b> Rosace directionnelle des lignes de crête.....	66
<b>Figure 4.7.</b> Carte du réseau hydrographique hiérarchisée dans le secteur exploré.....	67
<b>Figure 4.8.</b> Rosace directionnelle des ordres de cours d'eaux .....	67

<b>Figure 4.9.</b> Carte des linéaments hydrographiques .....	68
<b>Figure 4.10.</b> Rosace directionnelle des linéaments hydrographiques.....	68
<b>Figure 4.11.</b> Image en composition colorée RVB 754 de la zone explorée. ....	71
<b>Figure 4.12.</b> Image Landsat-7 ETM+ filtrée par la méthode Sobel 7-7 suivant les quatre directions principales .....	73
<b>Figure 4.13.</b> Carte de synthèse des linéaments .....	74
<b>Figure 4.14.</b> Carte structurale de la région de Ngoura-Colomines établie à partir de l'analyse des images ETM+ de Landsat-7. ....	75
<b>Figure 4.15.</b> A) Carte des linéaments rehaussés par le filtrage de Sobel et gradient ; B) Rosaces directionnelles .....	76
<b>Figure 4.16.</b> Quelques éléments structuraux de la phase D <sub>1</sub> .....	78
<b>Figure 4.17.</b> Diagrammes stéréographiques de la S <sub>1</sub> . ....	79
<b>Figure 4.18.</b> Quelques éléments structuraux de la phase D <sub>2</sub> . ....	82
<b>Figure 4.19.</b> Diagrammes cyclographiques de la schistosité mylonitique S <sub>2</sub> sur les affleurements de Yangosso et Ndembera (a), Ngogon-goubou (b) Boden et Colomines (c). ....	83
<b>Figure 4.20.</b> Autres éléments structuraux de la phase D <sub>2</sub> .....	84
<b>Figure 4.21.</b> Plis P <sub>3</sub> observés dans les enclaves d'amphibolite de Ndembara .....	85
<b>Figure 4.22.</b> Quelques éléments structuraux des phases D <sub>3</sub> et D <sub>4</sub> .....	86
<b>Figure 4.23.</b> Quelques diaclases F <sub>4</sub> simples (b - c) et conjuguées (a et d). ....	87
<b>Figure 4.24.</b> Rosace de directions des joints secs dans les secteurs de Ndembara (a), de Yangosso (b) et de Ngogon-goubou (c). ....	87
<b>Figure 4.25.</b> Autres éléments structuraux de la phase D <sub>4</sub> .....	88
<b>Figure 4.26.</b> Quelques marqueurs de la déformation de l'état magmatique.....	88
<b>Figure 4.27.</b> Quelques marqueurs de la déformation de l'état sub-magmatique.....	90
<b>Figure 4.28.</b> Les marqueurs de la déformation de l'état solide.. ....	91
<b>Figure 4.29.</b> Autres marqueurs de la déformation de l'état solide. ....	92
<b>Figure 5.1.</b> a) Localisation des granitoïdes de Ngoura-Colomines dans le diagramme millicationique .....	96
<b>Figure 5.2.</b> Diagrammes de variation de quelques éléments majeurs en fonction de SiO <sub>2</sub> des granitoïdes de Ngoura-Colomines. ....	97
<b>Figure 5.3.</b> a) Diagramme de variation de K <sub>2</sub> O en fonction de SiO <sub>2</sub> et b) Diagramme molaire A/NK en fonction de A/CNK .....	98
<b>Figure 5.4.</b> Diagramme de Harker de quelques éléments compatibles et incompatibles des granitoïdes de Ngoura-Colomines. ....	99
<b>Figure 5.5.</b> Diagrammes de Harker des quelques éléments de transition des granitoïdes de Ngoura-Colomines. ....	100
<b>Figure 5.6.</b> Spectres des terres rares et multi-éléments des granitoïdes de Ngoura-Colomines. ....	103
<b>Figure 5.7.</b> Position des amphibolites de Ngoura-Colomines dans le diagramme triangulaire de De la Roche.....	107

<b>Figure 5.8.</b> Position des amphibolites de Ngoura-Colomines dans le diagramme des silico-aluminates.....	107
<b>Figure 5.9.</b> a) Diagramme Na <sub>2</sub> O en fonction K <sub>2</sub> O de discrimination des ignées et sédimentaires et b) Position des metabasites de Ngoura-Colomines dans le diagramme AFM .....	108
<b>Figure 5.10.</b> Diagrammes de variation de quelques éléments majeurs des amphibolites en fonction de MgO.....	109
<b>Figure 5.11.</b> Diagrammes de variation de quelques éléments traces en fonction de MgO des metabasites de Ngoura-Colomines. ....	110
<b>Figure 5.12.</b> Spectres des terres rares et multi-éléments des amphibolites de Ngoura-Colomines.....	111
<b>Figure 6.1.</b> Sites d'exploitation artisanale d'or montrant des puits d'échantillonnage à Colomines (A) et le long de la rive de la rivière Kadei.....	115
<b>Figure 6.2.</b> Aspect microscopique des minéraux lourds de Colomines. ....	116
<b>Figure 6.3.</b> Aspect microscopique des minéraux lourds de Madubal.....	117
<b>Figure 6.4.</b> Aspects microscopiques des minéraux lourds de Tassongo et Boutou.....	118
<b>Figure 6.5.</b> Aspect microscopique des minéraux lourds de Garoua-Colomines. ....	118
<b>Figure 6.6.</b> Caractéristiques morphologiques et distribution des grains d'or. ....	119
<b>Figure 6.7.</b> Caractéristiques morphologiques des grains d'or des puits de Garoua et Trou du rat.....	120
<b>Figure 6.8.</b> Histogrammes et distribution spatiale des teneurs de la minéralisation aurifère dans la région de Ngoura-Colomines. ....	122
<b>Figure 6.9.</b> Variogramme de la distribution spatiale des teneurs en or dans le secteur Ngoura-Colomines.....	123
<b>Figure 6.10.</b> Carte des iso-teneurs en or obtenue par krigeage ordinaire. ....	124
<b>Figure 6.11.</b> Carte des iso-épaisseurs de gravier minéralisé obtenue par krigeage. ....	125
<b>Figure 6.12.</b> Carte des iso-épaisseurs de stérile obtenue par krigeage. ....	126
<b>Figure 6.13.</b> Diagrammes binaires de l'épaisseur des couches minéralisées et stériles en fonction de la teneur en or .....	126
<b>Figure 6.14.</b> Superposition des teneurs en or sur la carte des pentes. ....	127
<b>Figure 6.15.</b> Carte du réseau hydrographique montrant l'emplacement des puits d'exploration et leurs teneurs en or.....	128
<b>Figure 6.16.</b> Images en CP dérivées des données d'ACP de Landsat-8 couvrant la zone d'étude.....	133
<b>Figure 6.17.</b> Carte en compositions colorées RVB des images en CP5, CP6 et CP7 de l'ACP Landsat-8. ....	135
<b>Figure 6.18.</b> Images en CP dérivées de la transformation d'ACP de l'image ASTER de la zone d'étude. ....	138
<b>Figure 6.19.</b> Composition colorée en RVB des composants CP4, CP6 et CP7 de l'ACP dans le visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (VNIR-SWIR) d'ASTER. ....	140
<b>Figure 6.20.</b> Images en CI dérivées de la transformation par l'ACI des données Landsat-8 couvrant la zone d'étude. ....	142

<b>Figure 6.21.</b> Diagrammes de dispersion 2D pour les bandes en CI et CP de Landsat-8 utilisés dans cette étude.....	143
<b>Figure 6.22.</b> Carte en composition colorée RVB des images Landsat-8 en CI5, CI3 et CI2 de la zone d'étude. ....	145
<b>Figure 6.23.</b> Rapport et combinaison de bandes Landsat-8 de la zone d'étude. Des pseudo-couleurs en rampe ont été appliquées à chaque image. ....	147
<b>Figure 6.24.</b> Image de combinaison de couleurs RVB de la zone d'étude utilisant les ratios et les combinaisons de bandes Landsat-8.....	149
<b>Figure 6.25.</b> Rapports et combinaisons de bandes ASTER de la zone d'étude. ....	150
<b>Figure 6.26.</b> Évidences de terrain de la minéralisation aurifère et de l'altération hydrothermale associée. ....	152
<b>Figure 6.27.</b> Aspects microscopiques des granites à mégacristaux de feldspath de Kpangara Kadei, Granites à biotite de Madubal et des granites à biotite de Boben. ....	153
<b>Figure 6.28.</b> Profil d'altération type des sites miniers de la zone Colomines montrant des halos d'altération hydrothermale. ....	154
<b>Figure 6.29.</b> Aspects microscopiques des granodiorites de Ngoura, des veines de quartz ± calcite minéralisées, des granites à biotite de Ngoura et Granites à biotite de Yangamo.....	155
<b>Figure 6.30.</b> Séquence paragénétique d'altération dans le district aurifère de Ngoura-Colomines.....	156
<b>Figure 6.31.</b> Diffractogrammes des rayons X sur poudre d'échantillons représentatifs de roches altérées et de roches non altérées, comparés aux spectres de référence de minéraux clés.....	157
<b>Figure 6.32.</b> Spectres de réflectance de laboratoire de roches altérées et saines.....	159
<b>Figure 7.1.</b> a) Diagramme de variation de $K_2O$ en fonction de $SiO_2$ . b) Diagramme de classification des granites de Frost montrant le caractère magnésien à ferrifère des granitoïdes du domaine centre de la CPNE et ceux de Ngoura-Colomines; c) Diagramme molaire A/NK en fonction de A/CNK montrant le caractère métallumineux à hyperalumineux des granitoïdes du domaine centre de CPNE et ceux de Ngoura-Colomines. ....	164
<b>Figure 7.2.</b> Position des granitoïdes du domaine centre de la CPNE et ceux de Ngoura-Colomines dans le diagramme $(Al_2O_3/FeO_t+MgO)$ en fonction de $(Al_2O_3/FeO_t+MgO)$ .....	165
<b>Figure 7.3.</b> Diagramme géotectonique discriminant pour les granitoïdes du domaine centre de CPNE et ceux de Ngoura-Colomines .....	167
<b>Figure 7.4.</b> Diagramme géotectonique $R_2$ en fonction de $R_1$ de Bachelor et Bowden pour les granitoïdes de Ngoura-Colomines.....	167
<b>Figure 7.5.</b> Esquisse morpho-structurale de Ngoura-Colomines.....	169
<b>Figure 7.6.</b> Carte litho-tectoniques de la région de Ngoura-Colomines.....	171
<b>Figure 7.7.</b> Superposition du modèle numérique, du modèle de drainage, de la teneur en or et de la lithologie de la région de Colomines. ....	176
<b>Figure 7.8.</b> Carte de prospectivité à l'échelle régionale de la zone d'étude dérivée de couches thématiques d'altération de Landsat-8 .....	179

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.1.</b> Relevés climatiques moyens de Bertoua pour une période de 112 ans (1901 – 2019).....	9
<b>Tableau 2.1.</b> Matrice de corrélation des bandes brutes de l’image Landsat ETM+ utilisée ...	25
<b>Tableau 2.2.</b> Matrices des filtres Sobel 7×7 et gradient de Yésou et al. ....	28
<b>Tableau 3.1.</b> Caractéristiques pétrographiques des formations géologiques du secteur de Ngoura-Colomines.....	59
<b>Tableau 4.1.</b> Récapitulatif des directions d’écoulement des cours d’eau d’ordre 1, 2, 3 et 4	69
<b>Tableau 4.2.</b> Caractéristiques des bandes Landsat 7 ETM+ utilisées. ....	70
<b>Tableau 4.3.</b> Répartition des éléments structuraux par phase de déformation	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
<b>Tableau 5.1 :</b> Compositions chimiques et rapports inter-éléments des échantillons représentatifs des granitoïdes de Ngoura-Colomines.....	105
<b>Tableau 5.2 :</b> Compositions chimiques des échantillons représentatifs des amphibolites de Ngoura-Colomines. ....	111
<b>Tableau 6.1.</b> Caractéristiques techniques du satellite Landsat-8.....	129
<b>Tableau 6.2.</b> Caractéristiques techniques des données ASTER.....	130
<b>Tableau 6.3.</b> Facteurs statistiques de l’ACP pour les bandes du visible et proche infrarouge, de l’infrarouge à onde courte et de l’infrarouge thermique (VNIR+SWIR+TIR) de Landsat-8.....	132
<b>Tableau 6.4.</b> Facteurs statistiques de l’ACP pour les bandes du visible et proche infrarouge, de l’infrarouge à onde courte (VNIR + SWIR) de l’image ASTER.....	137
<b>Tableau 6.5.</b> Facteurs statistiques PCA pour les bandes TIR d'ASTER.....	141

**ANNEXES**

**ANNEXE I.** Données de terrain collectées dans la région de Ngoura-Colomines..... 200

**ANNEXE II.** Articles tirés de la Thèse ..... 204

## LISTE DES ABBREVIATIONS

**ABBREVIATIONS DES MINERAUX:** Recommandations de l'UISG, Sous commission de la Systématique des roches métamorphiques: version Web 01.02.07, Jaakko Siivola et Rolf Schmid.

<b>Aln</b>	Allanite
<b>Amp</b>	Amphibole
<b>Bt</b>	Biotite
<b>Cal</b>	Calcite
<b>Cb</b>	Carbonate
<b>Chl</b>	Chlorite
<b>Cpx</b>	Clinopyroxène
<b>Px</b>	Pyroxène
<b>Ep</b>	Epidote
<b>Grt</b>	Grenat
<b>Kfs</b>	Feldspath potassique
<b>Ms</b>	Muscovite
<b>Myr</b>	Myrmékite
<b>Ol</b>	Olivine
<b>Op</b>	Opaque
<b>Pl</b>	Plagioclase
<b>Qtz</b>	Quartz
<b>Ttn</b>	Titanite (Sphène)
<b>Zrn</b>	Zircon

### AUTRES ABBREVIATIONS

<b>CCC</b>	Cisaillement Centre Camerounais
<b>CPNE</b>	Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale
<b>CPTS</b>	Chaîne Panafricaine Trans-saharienne
<b>HFSE</b>	High Field Strength Element (Element à fort potentiel ionique)
<b>HREE</b>	Heavy Rare Earth Element (Terres Rares Lourdes)
<b>LREE</b>	Light Rare Earth Element (Terres Rares Légères)
<b>Ma</b>	Millions d'années
<b>REE</b>	Rare Earth Element (Terres Rares)
<b>Rb/Sr</b>	Rubidium/Strontium
<b>Sm/Nd</b>	Samarium/Néodyme
<b>U/Pb</b>	Uranium/Plomb

**RÉSUMÉ**

Le présent travail porte sur la pétrogenèse, structurogenèse et potentialités métallogéniques des formations précambriennes de Ngoura-Colomines. Il vise essentiellement à déterminer le contexte géodynamique et le modèle génétique des granites aurifères du secteur et ainsi à contribuer à une compréhension plus globale de l'évolution tectonique de la CPNE et des minéralisations aurifères associées aux zones de cisaillement panafricaines. Cette région est constituée de roches plutoniques et métamorphiques. Les roches plutoniques sont principalement des granitoïdes syn-tectoniques notamment granites, granodiorites, adamellites et tonalites, les roches métamorphiques étant les gneiss à biotite et à amphibole, les amphibolites et les mylonites. Les assemblages minéralogiques Hbl + Pl + Qtz + Kfs + Bt ± Chl dans les amphibolites et Qtz + Kfs + Pl + Hbl + Bt ± Spn dans les gneiss à biotite et à amphibole montrent que le paroxysme du métamorphisme est du faciès amphibolite. Les roches plutoniques ont une texture grenue à grenue porphyroïde avec un assemblage minéralogique principalement à Qtz + Kfs + Pl + Bt. L'analyse structurale a permis de mettre en évidence une chronologie à quatre (04) phases de déformation dont une phase D<sub>1</sub> de tectonique compressive, une phase D<sub>2</sub> de tectonique transcurente en transpression, une phase D<sub>3</sub> de superposition tectonique et une dernière phase de déformation D<sub>4</sub> dite de tectonique cassante. En outre, l'approche structurale a permis la mise en évidence d'une zone de cisaillement ductilo-fragile dextre d'envergure régionale globalement orientée NE-SW. Ces éléments structuraux mettent en évidence l'évolution de la déformation depuis la phase magmatique jusqu'à la phase post-magmatique en contexte de cisaillement. Les roches plutoniques de Ngoura-Colomines sont hyperalumineuses de type-I et appartiennent aux séries calco-alcalines hyperpotassiques et shoshonitiques. Leurs caractères chimiques sont semblables à ceux des séries calco-alcalines hyperpotassiques des domaines orogéniques. Les spectres des terres rares normalisés par rapport à la chondrite sont fractionnés dans l'ensemble, avec des anomalies positives en Ce et négatives en Eu. Les roches métamorphiques de Ngoura-Colomines ont une origine ignée avec comme protolites probables les basaltes. Leurs rapports Cr/Th nuls ainsi que les rapports Th/La faibles (0,08-0,11), sont caractéristiques des roches volcaniques. Les spectres des terres rares de ces roches sont plats et très peu fractionnés, avec un enrichissement presque dans les mêmes proportions en LREE et HREE et des anomalies négatives en Ce. Plusieurs zones à potentialités aurifères avérées généralement associées à l'altération hydrothermale de minéraux de fer, minéraux

argileux et de silicification ont été identifiées dans le secteur de Ngoura-Colomines. Ces zones ont une relation spatiale étroite avec les sites miniers et zones d'indices aurifères connus. Il s'agit du prospect de Ngoura-Colomines et des prospects de Yangamo-Ndatanga et Taparé-Tapondo, qui sont des cibles d'exploration totalement nouvelles. La minéralisation aurifère dans le secteur Ngoura-Colomines aurait une double origine, la première syn-génétique intimement lié à la séricitisation des plagioclases des massifs granitiques et la seconde contrôlée par des veines à quartz dominant, sulfures et calcites. La zone de cisaillement ductilo-fragile orientées NNE-SSW à E-W qui traverse la zone d'étude contrôle ladite minéralisation le long des meso-fractures et veines de quartz.

Les données pétrologiques, structurales, géochimiques et métallogéniques montrent que la zone de cisaillement de Ngoura-Colomines correspond à une zone tectonique de collision oblique continent-continent impliquant le craton du Congo/Sao Francisco Craton et le Bloc Est Saharien, les minéralisations aurifères associées étant intimement liées à la genèse des granitoïdes et aux phases ultimes de déformation. Ces résultats sont en accord avec les précédentes hypothèses formulées pour la géodynamique du domaine centre de la CPNE au Cameroun.

**Mots-clés:** Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale; Zone de Cisaillement; Collision oblique; Tectonique transcurrente en transpression; Granites syntectoniques; Minéralisation aurifère.

## ABSTRACT

The present work concerns petrogenesis, structurogenesis and metallogenic potentialities of the Precambrian formations of Ngoura-Colomines. It essentially aims to determine the geodynamic context and the genetic model of the auriferous granites of the sector and thus to contribute to a more global understanding of the tectonic evolution of the North Equatorial Pan African Fold Belt (NEPFB) and the gold mineralizations associated with the pan-African shear zones. This region is made up of plutonic and metamorphic rocks. Plutonic rocks are mainly syn-tectonic granitoids that is granites, granodiorites, adamellites and tonalites, metamorphic rocks being biotite and amphibole gneisses, amphibolites and mylonites. The mineralogical assemblages Hbl + Pl + Qtz + Kfs + Bt  $\pm$  Chl in amphibolites and Qtz + Kfs + Pl + Hbl + Bt  $\pm$  Spn in biotite and amphibole gneisses show that the paroxysm of metamorphism is up to amphibolite facies. The plutonic rocks have granular to porphyritic textures with a mineralogical assemblage mainly made up of Qtz + Kfs + Pl + Bt. The structural analysis allowed to highlight a deformation chronology with four (04) phases that is D<sub>1</sub> of compressive tectonics, D<sub>2</sub> of transcurrent tectonics in transpression, D<sub>3</sub> of tectonic superposition and the later D<sub>4</sub> called brittle tectonics. In addition, the structural approach allowed the identification of a dextral ductile to fragile shear zone at regional scale generally oriented NE-SW. These structural elements highlight the evolution of the deformation from the magmatic phase to the post-magmatic phase in shear context. The plutonic rocks of Ngoura-Colomines are peraluminous type-I and belong to both calc-alkaline hyperpotassic series and shoshonitic series. Their chemical characters are similar to those of the hyperpotassic calc-alkaline series of the orogenic domains. The rare earth spectra normalized with respect to chondrite are split overall, with positive anomalies in Ce and negative in Eu. The metamorphic rocks of Ngoura-Colomines have an igneous origin with basalts as probable protolith. Their insignificant Cr/Th ratios as well as the weak Th/La ratios (0.08-0.11), are characteristic of volcanic rocks. The rare earth spectra of these rocks are flat and very little fractionated, with an enrichment almost in the same proportions in LREE and HREE and negative anomalies in Ce. Several zones with proven gold potential generally associated with hydrothermal alteration of iron oxide/hydroxide minerals, clay minerals and silicification have been identified in the Ngoura-Colomines sector. These areas have a close spatial relationship with known mining areas and gold occurrences. These are the Ngoura-Colomines prospect and the Yangamo-Ndatanga and Taparé-Tapondo prospects, which are

completely new exploration targets. Gold mineralization in the Ngoura-Colomines sector has a double origin, sometimes disseminated in the granite massifs, sometimes intimately linked to the dominant quartz, sulphide and calcite vein systems. The ductile-fragile shear zone oriented NNE-SSW to E-W which crosses the study area controls the said mineralization along meso-fractures and quartz veins.

Petrological, structural, geochemical and metallogenic data show that the Ngoura-Colomines shear zone corresponds to a tectonic zone of oblique continent-continent collision involving the Congo craton/Sao Francisco Craton and the Saharian East Block, the associated gold mineralization being intimately linked to the genesis of granitoids and to the final stages of deformation. These results are in agreement with the previous hypothesis formulated for the geodynamics of the central domain of the North Equatorial Pan African Fold Belt (NEPFB) in Cameroon.

**Keywords:** North Equatorial Pan-African Fold Belt; Shear Zone; Oblique collision; Transcurrent tectonics in transpression; Syntectonic granites; Gold mineralization.

# INTRODUCTION GÉNÉRALE

*«Si vos rêves ne vous font pas peur, c'est qu'ils ne sont pas assez grands.»*  
- Ellen Johnson Sirleaf

## 1. Introduction

Le Précambrien, ère géologique la plus ancienne (0,54 Ga – ~4,5 Ga), constitue l'essentiel du substratum géologique Camerounais où il se compose de deux principales entités lithostructurales que sont : la Chaîne Panafricaine Nord Équatoriale (CPNE ; Almeida et al., 1981; Nzenti et al., 1988, 1994; Davison et Reginaldo, 1989; Ngnotué et al., 2000; Brito de Neves et al., 2001) ou Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale (CPAC ; Penaye et al., 1993; Toteu et al., 2001; 2004) et le domaine cratonique caractérisé par le complexe du Ntem d'âge paléoprotérozoïque à archéen (Maurizot et al., 1986 ; Pouclet et al., 2007 ; Tchameni et al., 2001 ; Shang et al., 2010). L'évolution tectono-métamorphique de la CPNE a fait l'objet de plusieurs travaux à l'issue desquels divers modèles géodynamiques ont été proposés. De nos jours, au moins cinq modèles ont été envisagés. Il s'agit entre autres : (i) du modèle de multiples collisions (Toteu et al., 1991) qui présente deux zones de sutures subméridiennes. La première de direction N-S, matérialisée par l'existence d'un complexe ophiolitique au SE-Aïr (Niger) et la deuxième orientée NE-SW, marquée par une anomalie gravimétrique lourde enregistrée dans la région de Massenya-Ounianga au Tchad; (ii) du modèle des rifts continentaux (Castaing et al., 1993; 1994) qui suggère la formation des rifts continentaux bordant le craton de São-Francisco/Congo (rift de Sergipano-Poli et rift centrafricain), et le craton Ouest-africain (rift du Hoggar et de l'Adar des Iforos); (iii) du modèle de chaîne intra-cratonique avec vergence sud (Nzenti et al., 1988; 1994 ; 1999) entre le craton du Congo au Sud et le métacraton saharien (Black et Liégeois, 1993 ; Abdelsalam et al., 2002 ; Liégeois et al., 2013) au Nord; (iv) du modèle du double poinçonnement (Ngako, 1999 ; Ngako et al., 2008) qui propose une évolution géodynamique distincte du système dahomeyen en Afrique central et enfin (v) du modèle de tectonique transpressive (Kankeu et al., 2009, 2012, 2017 ; Ganno et al., 2010, 2016) qui suggère une collision entre les cratons de São Francisco (Congo) et le bloc Est Saharien en contexte transpressif dextre.

Cette diversité de modèles géodynamiques montre que l'évolution tectonique de la CPNE n'est pas encore comprise dans le détail. Une meilleure compréhension de l'évolution géodynamique de la chaîne au Cameroun passera nécessairement par l'étude des secteurs clés, notamment l'étude du domaine central car celui-ci constitue la transition entre craton du Congo et le domaine Néoprotérozoïque.

## 2. Problématique globale et contexte de l'étude

Contrairement au domaine cratonique, la Chaîne Panafricaine Nord Équatoriale au Cameroun est particulièrement documentée et les multiples modèles géodynamiques proposés

montrent que son évolution tectonique ne fait pas encore l'unanimité. De plus, le domaine central de la CPNE fait encore l'objet d'une divergence d'opinion sur le calage et la chronologie des évènements structuraux panafricains, leurs morphologies et la cinématique des phases de déformation. C'est ainsi qu'une évolution à trois (03) phases de déformation accompagnée des recristallisations métamorphiques dans les faciès amphibolite et granulite a été proposée par certains (e.g. Nzenti et al., 1994, 1999, 2006, 2007, 2011; Nguessi et al., 1997; Abaga et al., 1999; Ngnotué et al., 2000; Tagne-Kamga 2003; Nzolang et al., 2003; Tanko Njiosseu et al., 2005 et Ganwa et al., 2008); tandis que les travaux un peu plus récents prônent une chronologie à quatre (04) phases de déformation (Ganno et al., 2010, 2016 ; Kouankap Nono, 2011 ; Takodjou Wambo et al., 2016 ; Saha Fouotsa et al., 2018). Ainsi donc, des points d'ombres demeurent non seulement sur le nombre de phase des déformations panafricaines à l'échelle régionale et l'expression géométrique de chacune de ces phases dans les ensembles géologiques concernés, mais aussi sur les âges des dites déformations. Ce qui limite la compréhension globale de l'évolution tectono-métamorphique de la CPNE.

De plus, bien que les différents modèles géodynamiques suscités aient en commun intégrer les principales zones de cisaillement et qui d'ailleurs dans certains cas sont des cisaillements de type or, très peu de travaux associent l'évolution tectonique aux potentialités métallogéniques. En effet, les minéralisations aurifères pour ne citer que celles-ci ont été signalées dans les formations protérozoïques d'Afrique où elles forment deux types de gisements: (i) les gisements primaires, rencontrés dans les zones de cisaillement et contenus dans les filons et veines de quartz ; et (ii) les placers ou gisements secondaires, issus de l'altération des gisements primaires (Milési et al., 1989).

Ainsi, pour une compréhension plus complète de la Chaîne Panafricaine au Cameroun, il serait indispensable, en plus des données disponibles de la dite chaîne, d'adopter une approche pluridisciplinaire incluant non seulement des études pétrologiques et structurales minutieuses mais aussi des études métallogéniques détaillées afin d'établir le lien qui existerait entre les minéralisations aurifères et l'évolution tectonique de la CPNE.

### **3. Problèmes spécifiques à la région de Ngoura-Colomines et buts de l'étude**

Au Cameroun, les indices de minéralisation aurifère sont signalés dans les régions du Sud, de l'Adamaoua et de l'Est. Dans cette dernière région, les minéralisations aurifères sont encaissées dans les granitoïdes notamment les pegmatites, les granites alcalins et les orthogneiss où elles sont concentrées dans des filons et veines de quartz (Suh et al., 2006 ;

Omang et al., 2015; Asaah et al., 2015, Takodjou Wambo et al., 2018 ; Pepogo Man-mvele et al., 2019). La pétrogenèse des roches encaissantes des minéralisations en or dans le district aurifère de l'Est-Cameroun n'est pas encore étudiée en détails malgré quelques travaux pionniers de Kankeu et al. (2009) et Assah et al. (2015). Le secteur de Ngoura-Colomines qui intègre ce district est connu pour ses gisements de placer à or exploités depuis des décennies, d'abord de manière artisanale par les populations locales, et tout récemment, l'on assiste à des exploitations semi-mécanisées par des compagnies minières. L'abondance de ce métal précieux à certains emplacements privilégiés dudit secteur suscite plusieurs interrogations, notamment les facteurs géologiques à l'origine de la répartition de l'or dans les différents sites, ensuite les types pétrographiques qui contrôlent la minéralisation primaire. Cependant, la zone de provenance de cet or reste encore mal circonscrite car les études réalisées jusqu'à lors se sont focalisés sur la caractérisation micro-géochimique (incluant les inclusions fluides) des grains d'or (Suh et al., 2006, Nih Fon et al., 2012, Asaah et al., 2015, Vishiti et al., 2015, Omang et al., 2015). Il n'existe donc pas de travaux qui examinent le contexte géologique de mise en place de ces minéralisations à travers les modèles génétiques et la nature de l'encaissant qui serait dans ce cas précis des granitoïdes syn- à post-tectoniques. Par conséquent, le secteur Ngoura-Colomines représente une portion clé du domaine central de la CPNE car il offre la possibilité d'effectuer l'étude couplée évolution géotectonique et minéralisations aurifères associées.

Les études menées dans le cadre de la présente thèse ont pour objectif principal de déterminer le contexte géodynamique et le modèle génétique des granites aurifères du secteur Ngoura-Colomines en vue de contribuer à une compréhension plus globale de l'évolution tectonique de la CPNE et des minéralisations aurifères associées aux zones de cisaillement panafricains. Pour ce faire, il est indispensable d'adopter une approche pluridisciplinaire combinant la pétrogenèse, la tectonique et la métallogénie :

- **sur le plan pétrogénétique** : il est question de connaître la nature, les types pétrographiques, l'origine et les sources des formations géologiques identifiées dans le secteur, déterminer leurs conditions d'évolution tectono-métamorphique, leurs paléoenvironnements et les mécanismes possibles de leurs mises en place;

- **sur le plan tectonique** : des études structurales approfondies sont nécessaires pour non seulement caractériser les différentes phases de déformation, mais aussi de relever celles qui contrôleraient la minéralisation dans la zone d'étude. Une bonne chronologie des événements structuraux et la détermination de la cinématique de ceux-ci sont essentielles pour

caractériser les différentes étapes d'évolution de la déformation dans la région et la corréler aux autres parties de la chaîne.

- **sur le plan métallogénique** : dans l'optique de circonscrire les sites potentiels pour l'exploration des minéralisations primaires et d'évaluer le contrôle structural des minéralisations, les travaux de cartographie des altérations hydrothermales, de géostatistique minière et d'analyse structurale des zones de cisaillement seront menées.

Notre étude vise principalement à :

- réaliser un inventaire lithologique et une étude pétrographique dans le but d'établir une carte géologique détaillée;

- effectuer des analyses géométrique, chronologique et cinématique de la déformation qui a affectée les principaux ensembles lithologiques pour l'élaboration d'une carte litho-structurale précise du secteur d'étude;

- réaliser une étude géochimique sur roche totale en vue de la détermination de l'origine, de la nature des protolites (cas des roches métamorphiques) et du contexte géotectonique de mise en places des différentes lithologies ;

- reconstituer l'évolution tectono-métamorphique de la région de Ngoura-Colomines et déterminer les structures contrôlant les minéralisations aurifère du secteur;

- enfin, relever la disposition structurale du secteur Ngoura-Colomines par rapport au domaine central de la CPNE.

La présente thèse a pour domaine scientifique principal la pétrologie et la géologie structurale, pour domaines scientifiques secondaires la métallogénie et télédétection.

#### **4. Structure de la thèse**

Le travail effectué se présente en sept chapitres, outre l'introduction et la conclusion générale.

- le chapitre 1 (*Cadre Naturel*) présente le secteur d'étude dans son cadre géographique et géologique;

- le chapitre 2 (*Matériel et méthodes*) donne les matériels et techniques utilisés pour l'acquisition des données aussi bien sur le terrain qu'en laboratoire;

- le chapitre 3 traite de *l'inventaire lithologique et la caractérisation pétrographique* des différentes formations recensées au cours de ce travail;

- le chapitre 4 (*Analyse de la déformation dans les différents ensembles lithologiques*) intègre les aspects mégascopiques, mésoscopiques et microscopiques de la déformation en se focalisant sur la géométrie, la cinématique et la chronologie des éléments structuraux;

- le chapitre 5 porte sur *les caractères géochimiques, la nature des protolites et le paléo-environnement* ;

- le chapitre 6 traite des potentialités métallogéniques des différentes formations géologiques du secteur étudié. Ce chapitre intègre les données provenant de 72 puits d'exploration du secteur d'étude et une approche de cartographie par télédétection de l'altération hydrothermale associée à la minéralisation aurifère en surface ;

- le chapitre 7 est consacré à l'interprétation - discussion et aux corrélations régionales.

Le travail s'achève par une conclusion générale où nous rappelons les principaux résultats obtenus et nous formulons des perspectives.

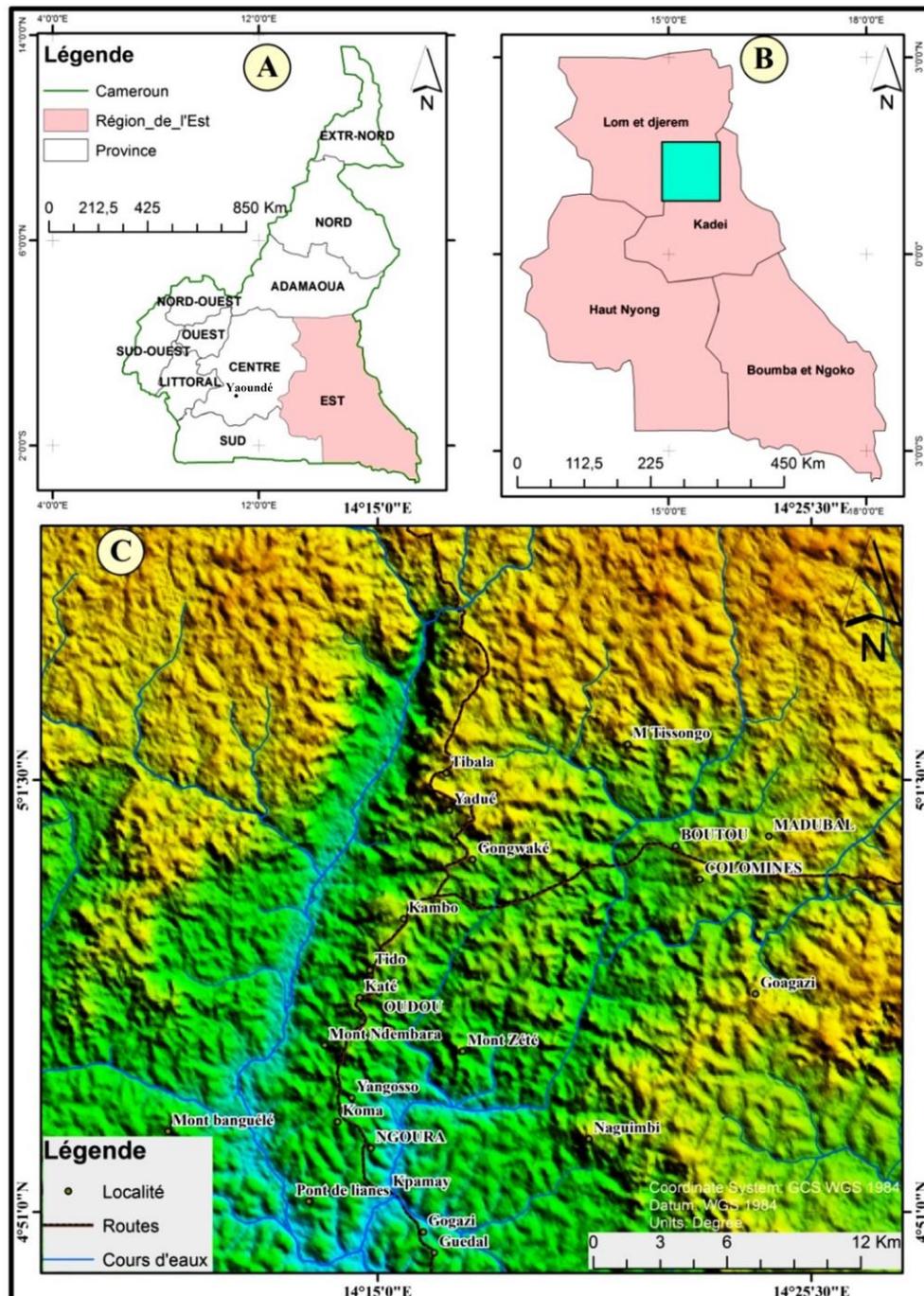
**CHAPITRE I.**  
**CADRE NATUREL**

*«Il faut toujours viser la lune, car même en cas d'échec, on atterrit dans les étoiles.»*  
- Oscar Wilde

## I.1- CADRE GÉOGRAPHIQUE

### I.1.1- Localisation

Le secteur Ngoura-Colomines est situé en sandwich entre les départements du Lom et Djerem et la Kadei de la région de l'Est-Cameroun. Ngoura-Colomines est situé à environ 350 km à vol d'oiseau au Nord-Est de la métropole Yaoundé et s'étend entre les latitudes 4°50'02'' et 5°03'33''N et les longitudes 14°08'23'' et 14°25'02''E (Fig. 1.1).



**Figure 1.1.** Localisation du secteur d'étude : A) Carte administrative du Cameroun ; B) Carte administrative de la région de l'Est ; C) Modèle Numérique de Terrain (MNT) du secteur d'étude (Extrait de l'image SRTM de Ngoura-Colomines)

## I.1.2- Climat

Le climat de la région de l'Est est humide, subéquatorial et grandement influencé par la forêt du Congo, mais il change rapidement à un climat guinéen sec de type savane, ce qui en fait de la région de l'Est une zone de transition climatique (Tsaléfac, 2007). Le pic de pluviométrie est habituellement en octobre quand les précipitations atteignent 271 mm (tableau 1.1), la moyenne annuelle des précipitations est de 1490,7 mm et la température moyenne de 24,3°C (Tsaléfac, 2007). En général, le climat du secteur Ngoura-Colomines est marqué par deux saisons (Olivry, 1986; Suchel, 1987) comme le montre le diagramme ombrothermique (Bagnouls et Gaussen, 1957) de la Figure 1.2 :

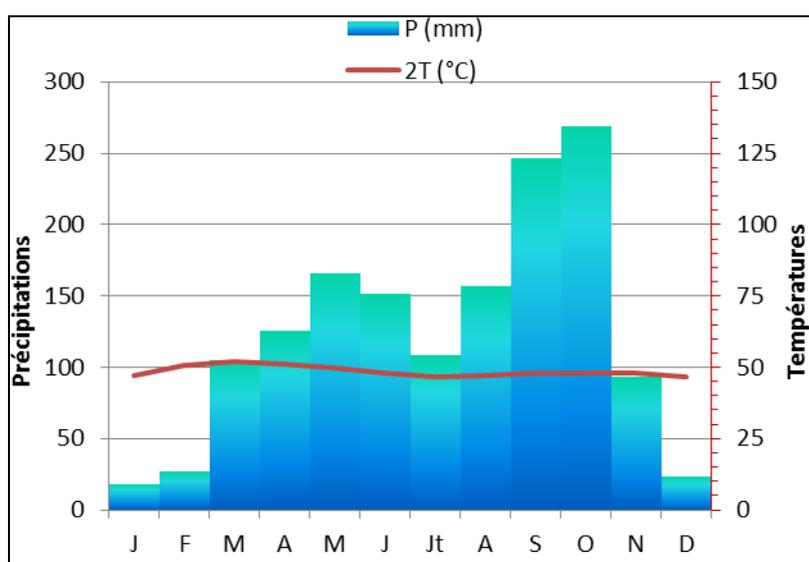
- une grande saison des pluies (avril – octobre);
- une grande saison sèche (novembre – mars).

Une migration annuelle N-S de la zone de convergence intertropicale (ZCIT) influence la variation des saisons. Zone définie comme étant le front de rencontre de l'harmattan NE et de la Mousson SW (Tsaléfac, 2007).

**Tableau 1.1.** Relevés climatiques moyens de Bertoua pour une période de 118 ans (1901 – 2019).

Mois	J	F	M	A	M	J	Jt	A	S	O	N	D
<b>Précipitations (mm)</b>	17,7	27,4	105,2	125,8	166,3	151,6	108,2	157,1	246,8	268,6	93	23
<b>Températures (°C)</b>	47,2	50,8	51,8	51,2	49,8	48,2	46,6	47	47,8	48,2	48,2	46,8

Source : <http://www.weatherbase.com> (consulté le 02/12/2019 à 21h)



**Figure 1.2.** Diagramme ombrothermique de la région de l'Est-Cameroun.

### **I.1.3- Géomorphologie**

#### ***I.1.3.1- Orographie***

L'esquisse géomorphologique du Cameroun élaborée par [Segalen \(1967\)](#) et [Kamgang Kabeyene \(1998\)](#) permet de distinguer quatre grandes unités morphologiques caractéristiques à savoir : (i) les régions de basses altitudes ; (ii) les reliefs intermédiaires ; (iii) la surface d'aplanissement au plateau Sud- Camerounais et (iv) les haut reliefs (montagnes). Le secteur Ngoura-Colomines appartient au plateau Sud-Camerounais caractérisé par des altitudes qui varient entre 550 et 850 m. Cette zone est constituée de petites collines occasionnellement interrompues par des corps de base de hauteurs résiduelles. Ces collines résultent généralement de l'érosion qui, dans la plus part des cas se termine dans les vallées; ces dernières ayant un système de drainage dendritique avec des rivières secondaires.

#### ***I.1.3.2- Hydrographie***

Ngoura-Colomines est drainé par le fleuve *Oudou*, principal affluent hydrique du bassin versant de la Kadei qui, avec le bassin de la Ngoko (constitué du *Dja* et de la *Boumba*) forment le grand bassin hydrographique du Congo. La *Ngoko*, prend sa source au sud d'Abong-Mbang. Elle suit la direction NW-SE pour confluer avec la *Sangha* en territoire congolais. La *Kadei* ou *Kadey*, ou encore *Kadé* quant à elle est une rivière de savane qui prend sa source dans la région de Belokota en République Centrafricaine (RCA), plus exactement dans les environs de la localité de Garoua Boulai. Conservant une direction Nord-Sud, elle se grossit de la *Doumé* (à 50 km à l'aval de Batouri), puis de la *Boumbé*, suivant une direction Ouest-Est et finit par rejoindre la *Mambéré* pour former la *Sangha Mbaéré* en territoire centrafricain. Il est important de noter que, dans sa partie nord, où se trouve la zone d'étude, la *Kadei* est alimentée par un bassin versant de superficie 8974 km<sup>2</sup> ([Olivry, 1986](#)).

### **I.1.4- Végétation et faune**

Le secteur d'étude Ngoura-Colomines est couvert par des savanes arborées qui alternent avec des savanes arbustives et quelques galeries forestières le long des cours d'eau. Les espèces herbacées dominantes sont *Pennisetum purpureum*, *Hypanthia rufa*, *Chromolaena odorata* (*Bocassa*), *Mimosa sp* et de nombreuses graminées. Les prairies marécageuses sont surtout colonisées par les *Marantacées*.

La faune sauvage du secteur d'étude est très pauvre. Les rares espèces rencontrées sont entre autre les rongeurs (*Aulacodes*, *Cricétomes*, *Atherurus*), les antilopes (*Céphalophes*), les serpents boa, et quelques hippopotames dans la zone de Lala.

### **I.1.5- Géographie économique et humaine.**

D'après les informations recueillies à la sous-préfecture de Batouri en 2017, la population est estimée à environ 27000 âmes. Elle est essentiellement autochtone, composée des *Baya* qui constituent plus de 50%. Les peuples allochtones sont représentés ici par les *Bororo* (40%) et les *Haoussa* (autour de 10%). L'on retrouve néanmoins une autre minorité venue des diverses régions du Cameroun et des pays étrangers, principalement des asiatiques (chinois), ceci à cause de l'implantation de nombreuses compagnies minières.

Les principaux secteurs d'activités dans cette région sont : le commerce, l'exploitation artisanale du bois et de l'or. Cette dernière étant l'activité prépondérante, malgré le fait qu'elle soit pratiquée principalement de manière artisanale. L'agriculture et l'élevage ne sont pas en reste et intéressent surtout les populations qui ne s'adonnent pas à l'orpaillage. L'on y cultive les produits alimentaires consommés localement comme le manioc et maïs. L'élevage du petit bétail y est aussi pratiqué.

La ville de Batouri qui contient le secteur Ngoura-Colomines abrite plusieurs services administratifs, notamment la sous-préfecture, la mairie et une brigade de gendarmerie. Les fonctions administratives sont principalement occupées par les allogènes.

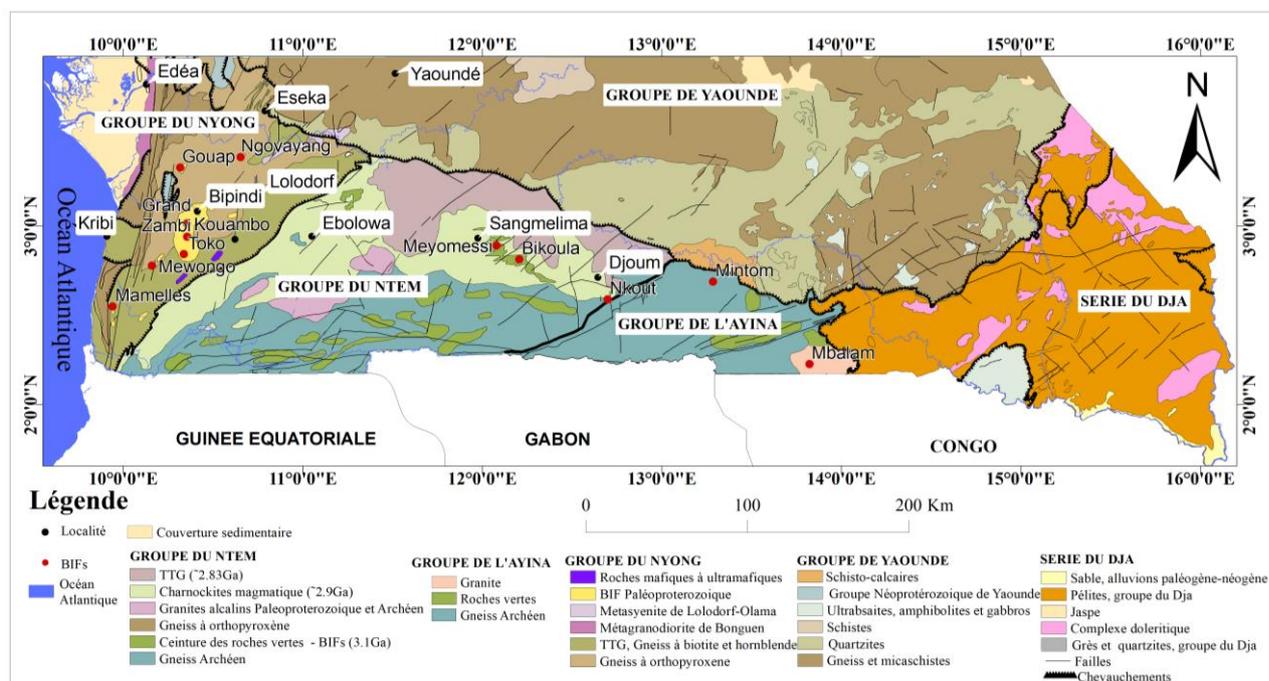
## **I.2- CADRE GÉOLOGIQUE**

Le socle précambrien du Cameroun comprend deux grandes unités litho-structurales qui sont la Chaîne Panafricaine Nord Équatoriale (CPNE) et le domaine cratonique ou Complexe du Ntem d'âge archéen à paléoprotérozoïque. Ce paragraphe présente l'état de connaissances sur ces deux domaines géologiques.

### **I.2.1. Domaine cratonique**

Le craton du Congo est une large masse subcirculaire d'une superficie d'environ 5711000 Km<sup>2</sup> avec un diamètre de 2500 km qui couvre le Congo, l'Angola en passant par le Gabon, la Zambie, la RDC, la RCA, le Soudan, l'Ouganda, la Guinée Équatoriale et une partie du Cameroun. (Ledru et al., 1994; Shang et al., 2007; 2010). Ce dernier se serait formé au Protérozoïque inférieur (2,05 Ga) à la suite de la collision du craton du Congo et celui de

São Francisco du NE du Brésil (Toteu et al., 1994; Feybesse et al., 1998, Neves et al., 2006). La bordure Nord-Ouest du craton du Congo est connue au Cameroun sous l'appellation « Complexe du Ntem » (Maurizot et al., 1986; Toteu et al., 1994 ; Pouclet et al., 2007). Ce complexe est subdivisé en deux grands groupes à savoir le groupe Néoarchéen – Paléoprotérozoïque du Nyong et le groupe Archéen du Ntem (Fig. 1.3).



**Figure 1.3:** Carte géologique du Sud-ouest Cameroun (adapté d'après Maurizot et al., 1986 ; Feybesse et al., 1998 ; Pouclet et al., 2007 ; Shang et al., 2010).

### (i) Le groupe du Nyong

Ce groupe se définit comme un ensemble de roches métasédimentaires et métaplutoniques mises en place au cours d'un événement tectono-métamorphique de haut degré vers 2050 Ma (Toteu et al., 1994; Ndema et al., 2014). Il repose sur le craton du Congo comme une nappe éburnéenne (Feybesse, 1987; Toteu et al., 1994) comprenant à la fois: (i) les matériaux archéens d'origine volcano-sédimentaire (2500–2900 Ma ; âges U-Pb sur zircon détritique; Pouclet et al., 2007) constituées de granulites associées aux formations ferrifères rubanées ou BIFs; de plutonites (TTG (tonalite, trondhjémite et granodiorite), charnockites, dolérites, syénites alcalines) et de roches vertes (serpentinites, écloïtes, epidotites) (Lerouge et al., 2006 ; Ndema et al., 2014 ; Ganno et al., 2017 ; Loose et Schenk, 2018 ; Bouyo Houketchang et al., 2019 ; Nga Essomba et al., 2020); (ii) les matériaux paléoprotérozoïques (2050Ma: âges U-Pb sur zircon et Sm–Nd, Toteu et al., 1994 ) correspondant à la mise en place de certains massifs granitiques et syénitiques; (iii) et de formations néoprotérozoïques datées à  $626 \pm 26$  Ma (âge U-Pb zircon) qui correspondent à l'évènement métamorphique

panafricain ayant affecté les formations de ce groupe (Toteu et al., 1994, 2001; Pouclet et al., 2007).

Le groupe du Nyong porte l'enpreinte de trois phases de déformation auxquelles s'associe un métamorphisme polycyclique datés à 2050 Ma (âge U-Pb sur zircon) avec des termes paroxismaux de faciès granulite et soulignés dans la partie ouest du groupe par des recristallisations panafricaines (~ 600 Ma) (Nédeléc et al., 1993 ; Lerouge et al., 2006 ; Ndema, 2016 ; Ganno et al., 2017 ; Soh Tamehe et al., 2019).

### **(ii) Le groupe du Ntem**

Le groupe du Ntem se caractérise par deux cycles orogéniques:

(1) le cycle orogénique archéen qui est marqué par la mise en place entre 3600 et 3300 Ma des protolites des roches vertes, suivie par l'intrusion de TTG (tonalite, trondhjémite, granodiorite) entre 2900 et 2800 Ma (âge U/Pb sur zircon ; Toteu et al., 1994 ; Shang, 2001). Ce cycle s'achève par l'intrusion entre 2600 et 2500 Ma (âges U-Pb sur zircon) de granitoïdes anatectiques de nature potassique (Feybesse et al., 1987; Toteu et al., 1994, 2004; Shang et al., 2010).

(2) une évolution paléoprotérozoïque ou cycle éburnéen. Ce dernier comporte trois étapes successives à savoir: (i) un épisode magmatique caractérisé par l'intrusion des syénites alcalines autour de 2300 Ma (âge Pb-Pb sur zircon; Tchameni, 2001), (ii) une deuxième phase marquée par mise en place des dolérites vers 2100 Ma (âge Sm-Nd; Tchameni, 1997) et enfin (iii) un épisode métamorphique allant des faciès amphibolites aux granulites vers 2050 Ma. Ce cycle s'achève par des événements thermiques et hydrothermaux autour de 1800 Ma (ages U-Pb sur zircon: Van Schmus et Toteu, 1992; Toteu et al., 1994; Tchameni et Nsifa, 1998; Tchameni et al., 2001; Shang et al., 2007).

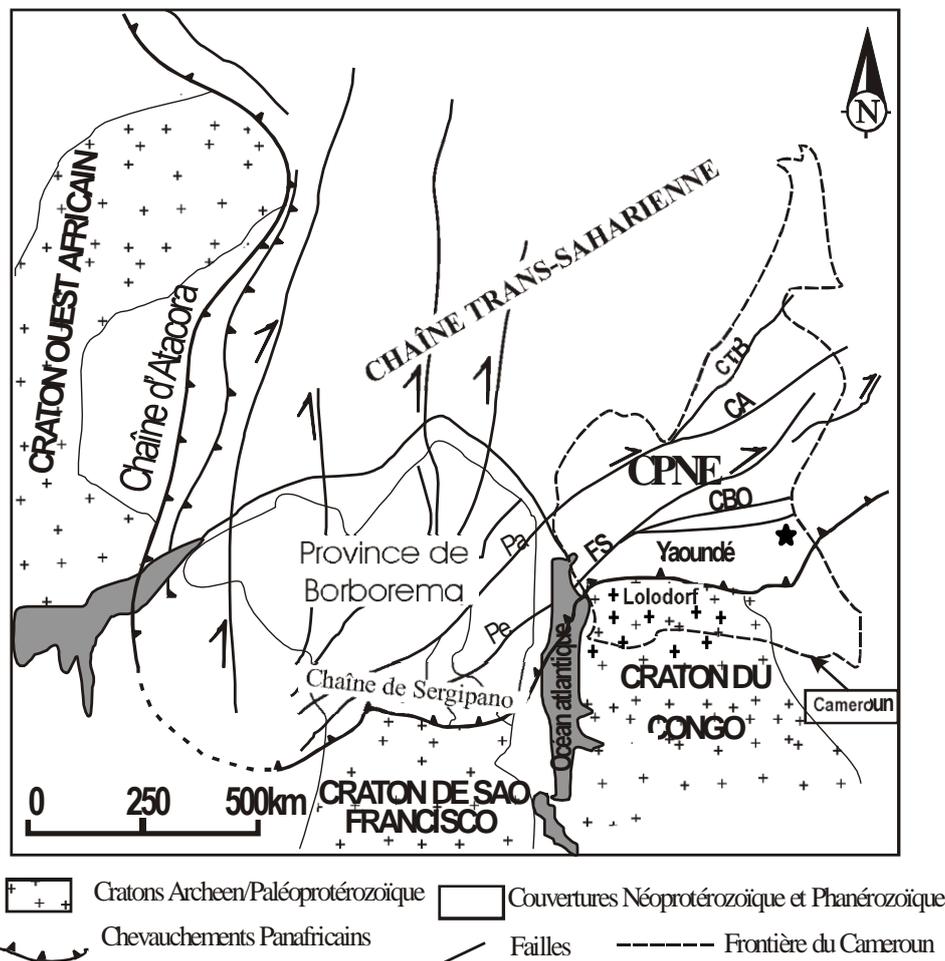
Les travaux récents de géochronologie U-Pb sur zircon et d'isotopie Hf-O sur le groupe du Ntem ont montré que les charnockites ont cristallisés a 2,92 Ga tandis que les trondhjémites et les protolites des amphibolites ont cristallisé de façon contemporaine, autour de 2,86 et 2,87 Ga (Li et al., 2016).

### **I.2.2- La Chaîne Panafricaine Nord Équatoriale (CPNE)**

Au Cameroun, la chaîne neoprotérozoïque encore appelée chaîne des oubanguides (Poidevin, 1983 ; Trompette, 1994), Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale (Nzenti et al., 1988; Davison et Reginaldo, 1989), ou encore Chaîne Panafricaine d'Afrique Centrale (Penaye

*et al.*,1993 ; Toteu *et al.*, 2001; 2004), appartient à la ceinture orogénique d’Afrique centrale (Trompette, 1997). C’est une mégachaîne d’orientation globale E-W, limitée à l’Ouest par la Chaîne Panafricaine Trans-Saharienne et au Sud par le craton de Congo. Son prolongement au Sud-Ouest correspond à la chaîne de Sergipano au Nord-Est du Brésil (Fig. 1.4); l’ensemble formant la chaîne panafricano-brésilienne (Almeida *et al.*, 1981; Castaing *et al.*, 1993 ; Neves *et al.*, 2002).

La CPNE résulte de l’orogénèse Néoprotérozoïque (Nzenti *et al.*, 1988) et la situation du Cameroun au sein de cette chaîne est très importante parce qu’il constitue le lien entre la chaîne d’Afrique de l’Ouest, d’Afrique centrale et du NE du Brésil (Kankeu *et al.*,2009; Ganno *et al.*, 2010, 2016).



**Figure 1.4.** Carte de reconstitution des domaines panafricains NE brésilien et Ouest africain montrant la continuité entre les chaînes de Sergipano et Nord Équatoriale (d'après Castaing *et al.*, 1993, modifié). CA: Cisaillement de l’Adamaoua; CTB: Cisaillement de Tchollire-Banyo; FS: Faille de la Sanaga ; CBO : Cisaillement de Betare-Oya ; Pa: cisaillement de Patos; Pe: Cisaillement de Pernambuco.

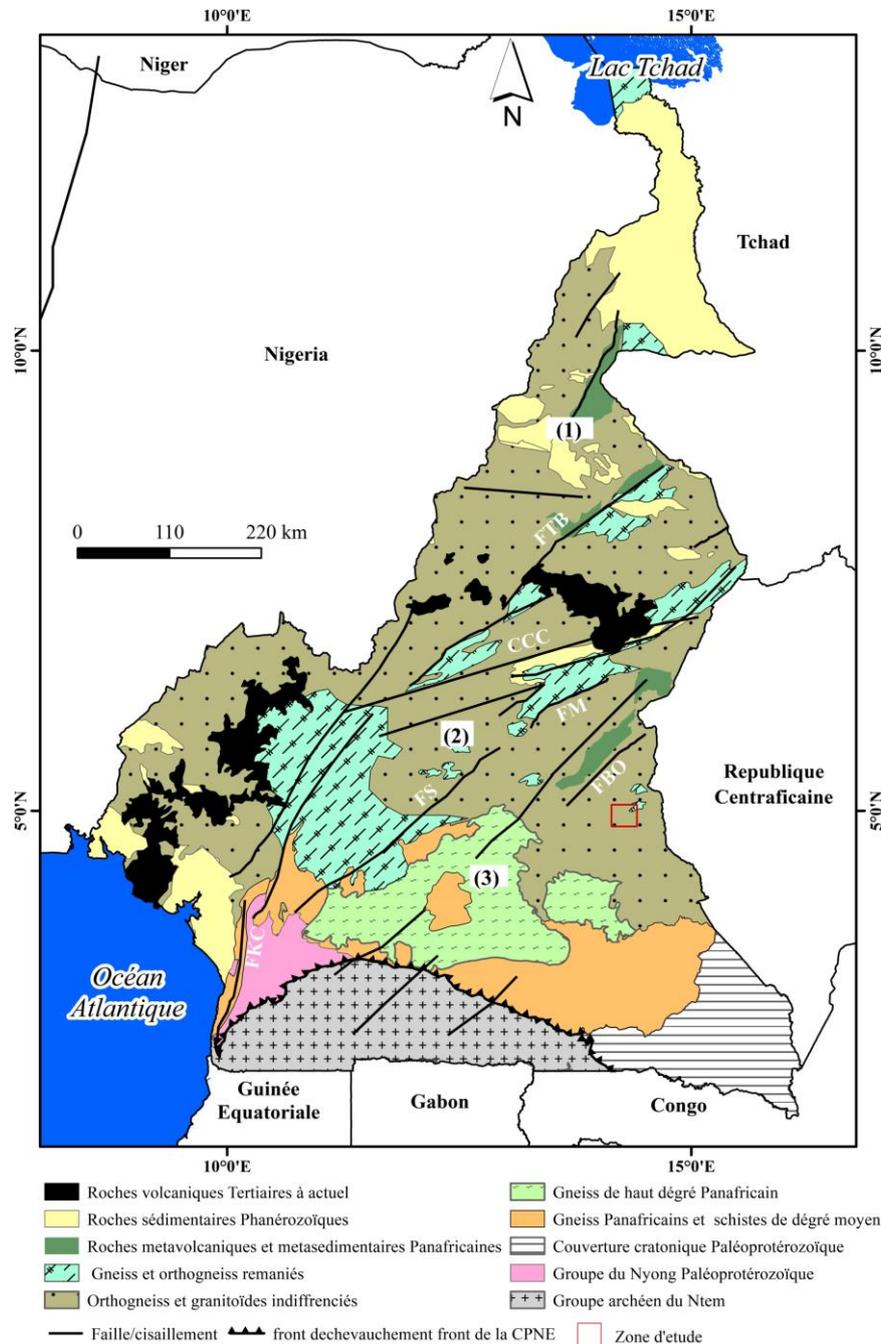
Au Cameroun, la CPNE comprend trois (03) domaines géodynamiques distincts (Fig. 1.5) qui sont du Nord au Sud: le domaine Nord, le domaine Central et le domaine Sud (Nzenti et al., 1992).

**1- Le domaine Nord Cameroun** est limité au Sud par l'accident de l'Adamaoua et qui s'étend jusqu'à l'Extrême-Nord du pays. Ce domaine est caractérisé sur le plan orogénique par une évolution polyphasée (trois phases de déformations) et polycyclique (Toteu et al., 1987; Penaye et al., 1988; Nzenti et al., 1992; 1999). Il est constitué de volcanites associées aux séries métasédimentaires de Poli correspondant à une extension, aux metabasites et orthogneiss calco-alcalins appartenant à une épisode d'accrétion (Toteu et al., 1987). Les données sur les régions du Buffle noir et Mbé au SE de Poli montrent que les formations du domaine Nord ont subi une évolution structurale marquée par trois (03) phases de déformations

Les travaux récents de Bouyo Houketchang et al. (2013, 2015, 2016) mettent en évidence dans les secteurs de Tcholliré-Banyo, Rey Bouba de Sinasi des granulites qui s'individualisent en métapelites et metabasites. Ces granulites ont recristallisé sous des conditions de pression et température très élevées ( $P = 13-14\text{Kbar}$  ;  $800-900^\circ\text{C}$ ). Ces auteurs mettent également en évidence la ceinture de roches vertes de nature calco-alcaline datée à 670 Ma (âge U- Pb sur zircon).

**2- Le domaine Centre Cameroun** (auquel appartient notre secteur d'étude), intermédiaire entre les domaines Nord et Sud, est un vaste domaine qui s'étend du Nord de Bafia au Sud de Poli (Fig. 1.5). Il est essentiellement marqué par : (i) de nombreux plutons syntectoniques hyperpotassiques à affinité calco-alcaline et d'âge panafricain, dans un encaissant fortement métamorphique formé de gneiss de haut degré et d'amphibolites d'âge archéen à paléoproterozoïque (Nzenti et al., 1994; Nzolang et al., 2003; Nguessi et al., 1997; Tagne Kamga et al., 1999, 2003; Tanko Njiosseu et al., 2005; Njanko et al., 2006; Nzenti et al., 2006; Ganwa et al., 2008; Kouankap Nono et al., 2010; Nzina Ncharé et al., 2010; Chebeu et al., 2011). et (ii) des granulites d'âge paléoproterozoïque et archéen (Nzenti et al., 1998; Tanko Njiosseu et al., 2005 ; Ganwa et al., 2008, 2016; Kouankap Nono, 2011, Tchakounté et al., 2018). Ces formations sont affectées par quatre (04) principales phases de déformation (Ganno et al., 2010, Kouankap Nono, 2011 et Saha Fouotsa et al., 2018) accompagnées de grands décrochements à savoir: le cisaillement centre camerounais (C.C.C), la faille de Fouban-Tibati-Banyo (FFTB) qui est un accident transcurrent ductile (Nzenti et al., 1988; Ngako et al., 1991 ; 2003, Nomo Nogue et al., 2017), la faille de Bétaré-Oya (FBO) qui est un

accident ductilo-fragile (Kankeu et al., 2008, 2010) et la faille de la Sanaga (FS) qui est un accident fragile (Dumont, 1986). De nombreux auteurs (Toteu et al., 2001, 2004, 2006a; Van Schmus et al., 2008; Ganwa et al., 2016 et Nomo Negue et al., 2017) considèrent le cisaillement de Tibati-Banyo/Tcholliré-Banyo comme une discontinuité majeure qui sépare le domaine Nord du domaine central.



**Figure 1.5.** Carte géologique du Cameroun (Kankeu et al., 2017) montrant la localisation de la zone d'étude et les principaux domaines lithotectoniques: (1) domaine sud ; (2) domaine centre ; (3) domaine nord. CCC : Cisaillement Centre Camerounais ; FS : Faille de la Sanaga; FTB: Faille de Tibati–Banyo; FTB: Faille de Bétaré-Oya; FM: Faille de Meiganga;

Les travaux de [Nzenti et al. \(1994, 1998, 2007\)](#); [Tanko Njiosseu et al. \(2005\)](#) et [Ganwa et al. \(2008, 2016\)](#) montrent la présence dans le domaine centre, des gneiss de haut degré, d'âge archéen (2551Ma) et paléoprotérozoïque (2100 Ma) intrudés par des plutonites néoprotérozoïques ( $550 \pm 50$  Ma) syn-tectoniques. Ceci indique d'après ces auteurs que ce domaine est un domaine ancien continental pro-parte d'âge archéen (2925 Ma) repris au panafricain.

[Tchakounté et al. \(2017\)](#) à partir des âges U-Pb sur zircon montrent que les protolites de certains orthogneiss de la limite entre le domaine Nord et le domaine Sud (Adamaoua-Yadé) se seraient mis en place au cours de trois périodes distinctes: (1) la suite TTG dans la localité de Makénéne date de 3,0 – 2,5 Ga, elle a été affectée par une fusion partielle à 2,08-2,07 Ga durant l'orogénèse éburnéenne, et par un événement magmatique avec empreinte du métamorphisme à 0,64-0,61 Ga au cours de l'orogénèse panafricaine; (2) les orthogneiss dioritiques de Maham se sont mis en place à 2,07 Ga et ont été remaniés à 0,62–0,61 Ga; (3) les orthogneiss granitiques plus jeunes des localités de Bafia, Bep, et Ngaa-Bapé s'intrudent à 0,64-0,63 Ga.

**3- Le domaine sud** est essentiellement représenté par le groupe de Yaoundé qui est limité dans sa partie australe par le craton de Congo. Le groupe de Yaoundé comprend les séries de Yaoundé au centre, de Mbalmayo-Bengbis-Ayos au sud, de Yokadouma à l'est et de Bafia au nord. Deux grands ensembles lithologiques sont définis à l'échelle régionale: un ensemble faiblement métamorphisé composé de schistes et de quartzites (les séries de Ayos-Mbalmayo-Bengbis et Yokadouma) et un ensemble de haut degré métamorphique, composé de gneiss, de migmatites, de micaschistes, d'amphibolites et de roches à silicates calciques (séries de Yaoundé, de Ntui-Betamba et de Bafia). Ces deux grands ensembles lithologiques sont intrudés par des diorites et des granodiorites et ont subi un métamorphisme de haute pression et haute température ( $T = 750^{\circ}\text{C}-800^{\circ}\text{C}$ ,  $P=0,9-1,3\text{GPa}$ ; [Nzenti et al., 1988](#)) à  $620 \pm 10$  Ma (âge U-Pb sur zircon ; [Penaye et al., 1993](#)), à 616 Ma (âge U-Pb sur zircon et Sm-Nd; [Toteu et al., 1994](#)) et/ou entre  $613 \pm 33$  Ma et  $586 \pm 15$  Ma (âge Th-U-Pb sur monazite; [Owona et al., 2011a](#)).

[Ngnotué et al. \(2012\)](#) révèlent l'existence dans la série de Yaoundé d'un nouvel événement métamorphique d'âge Tonien à Sténien (911 Ma à 1122 Ma ; âge U-Pb sur zircon des métapélites) interprété comme le début du métamorphisme dans la série de Yaoundé. Les formations du Sud ont subi ici une évolution polyphasée et monocyclique ([Nzenti et al., 1988, 1998](#); [Ngnotué et al., 2000](#)). Les travaux récents de [Mvondo et al. \(2007\)](#), [Mvondo Ondo](#)

(2009), Owona et al. (2011a, 2011b) et Metang (2015) mettent en évidence quatre (04) phases de déformation dans ce domaine.

En résumé, la CPNE est faite de formations panafricaines (granitoïdes calco-alcalin et alcalin) comportant des formations juvéniles néoproterozoïques et des formations archéennes et paléoproterozoïques recyclées (Nzolang et al., 2005; Nzenti et al., 2011; Tanko Njiosseu et al., 2005; Ganwa et al., 2008; 2016, 2018 ; Tchakounté et al., 2018). Elle s'intègre dans un modèle tectonique transpressif au cours de la convergence oblique entre le craton du Congo/São Francisco et le bloc Est Saharien (Kankeu et al., 2009; Ganno, 2010; Ganno et al., 2010, 2016 ; Nomo Negue et al., 2017).

### **I.3- TRAVAUX ANTÉRIEURS SUR LA RÉGION DE NGOURA-COLOMINES**

Les différents travaux réalisés dans la région de l'Est mettent en évidence deux principales formations à savoir les formations magmatiques d'une part et les formations métamorphiques d'autre part. Les formations magmatiques ici sont essentiellement constituées de granitoïdes. Ce sont des intrusions, notamment de granites syntectoniques anciens, de granites syntectoniques tardifs et de granites post-tectoniques (Gazel et Gérard, 1954, Gérard, 1952). Ces granitoïdes comprennent les granites à mégacristaux de feldspath alcalin, les syeno-monzogranites, les tonalites et les granodiorites (Asaah et al., 2015). Les monzogranites et les granodiorites ont cristallisés a 619 Ma et 624Ma respectivement (Asaah et al., 2015). Les formations métamorphiques quant à elles, regroupent deux grands ensembles, dont le complexe de base et la série épi-métamorphique : (i) le complexe de base est essentiellement composé d'orthogneiss et de migmatites à biotite et/ou à amphibole qui passent progressivement aux anatexites (Regnoul, 1986). Ces roches seraient le résultat d'un métamorphisme ayant affecté des dépôts sédimentaires, probablement d'origine marine (Gazel et Gérard, 1954); (ii) la série épi-métamorphique représentée ici par les formations volcano-sédimentaires forme une bande orientée NE-SW dans la vallée du Lom, d'où l'appellation de "série du Lom". Elle couvre une superficie d'environ 2 500 km<sup>2</sup>, du Centre Est du Cameroun jusqu'en Centrafrique. La Série du Lom a une forme sigmoïde de 200 km de long et 10 à 30 km de large (Regnoul, 1986 ; Soba, 1989). D'après Eno Belinga (1984), les dépôts sédimentaires de cette série sont d'origine continentale, constitués de sables, d'argiles, de marnes et d'arkoses. Ces sédiments ont été transformés en schistes (séritoschistes, choritoschistes, schistes graphiteux, schistes à grenat) et en quartzites (quartzites grossiers conglomératiques, quartzites à grain moyen, quartzites à grain fin). La série du Lom repose en

discordance structurale sur le complexe de base remobilisé au Panafricain (Soba, 1989 ; Kankeu et al., 2009).

Les travaux récents (Kankeu, 2008 et Kankeu et al., 2009) à la suite de ceux de Soba (1989) mettent en évidence l'existence au Sud dans la région de Garga-Sarali et au Nord de Bétaré-Oya des terrains granitiques, des gneiss para- et ortho dérivés et des unités volcano-sédimentaires confinées dans la vallée du Lom. Ces roches ont été affectées par un métamorphisme de degré faible à moyen et portent l'empreinte de trois (03) phases de déformation dont la première D<sub>1</sub> précoce telle que définie par Soba (1989) est mal connue, car les structures associées ont été oblitérées et transposées par la phase D<sub>2</sub>. La deuxième phase D<sub>2</sub> crée la structure régionale caractérisée par la S<sub>2</sub>. Cette S<sub>2</sub> est orientée NE-SW dans la zone mylonitique et NE-SW à WNW-SSE dans les gneiss et les migmatites avec des pendages soit vers le NW, soit vers le SE. La phase D<sub>3</sub> est caractérisée par des zones de déformation intense mylonitique qui déterminent des surfaces de cisaillement.

L'étude géochronologique (U/Pb sur zircon) montre que cette série est d'âge protérozoïque supérieur et que les granites d'anatexie sont datés à 614 et 621 Ma. Les données isotopiques Sm-Nd montrent que les schistes sont constitués de matériaux provenant du démantèlement d'un vieux socle et volcanites mises en place vers 700Ma (Soba, 1989).

Les travaux de Suh et al. (2006) ; Nih Fon et al. (2012) et Takodjou Wambo et al. (2016) mettent en évidence à Batouri, l'existence d'un socle essentiellement gneissique avec des intrusions de granitoïdes syn- à post-tectoniques. Ces formations portent l'empreinte de trois phases de déformation, dont la première D<sub>1</sub> précoce est caractérisée par une foliation S<sub>1</sub>, des plis P<sub>1</sub> et des boudins B<sub>1</sub>. La deuxième phase D<sub>2</sub> se caractérise non seulement par des filons d'aplite et de pegmatite qui sont sécants sur la foliation pour certains et boudinés et étirés pour d'autres ; mais aussi des plis P<sub>2</sub> et des structures S-C. La phase D<sub>3</sub> est caractérisée par des fractures et des filons.

## **CHAPITRE II.**

# **MATÉRIEL ET MÉTHODES**

*« Nous sommes ce que nous pensons. Avec nos pensées, nous bâtissons notre monde. »*  
-Bouddha

## **INTRODUCTION**

L'atteinte des objectifs fixés dans le cadre de ce travail passe par l'adoption d'une méthodologie rigoureuse et un matériel adéquat. Pour ce faire, nous avons opté pour l'approche classique en géosciences, qui débute avec les études de terrain et se poursuit par les analyses de laboratoire. Ce chapitre présente le matériel et les différentes techniques utilisées qui sont cependant fonction de l'étape de travail.

### **II.1- SUR LE TERRAIN**

Les géosciences tirent leur fondement de l'observation, l'analyse et l'interprétation des matériaux géologiques. Afin de s'assurer des meilleures interprétations, ces matériaux doivent tout d'abord être étudiés dans leur environnement naturel c'est-à-dire sur le terrain. C'est ainsi que dans le cadre de la présente thèse, des campagnes de terrain de durée moyenne un mois, ont été effectuées annuellement entre 2015 et 2018, en compagnie de mes directeurs de thèse et des camarades de promotion. Durant ces campagnes d'observation, nous avons réalisé des coupes le long desquelles nous avons inventorié les différents types lithologiques ainsi que les structures associées, établi les cartes d'échantillonnage et les cartes litho-structurales. Pour mener à bien les travaux de terrain, nous avons procédé de la manière suivante:

(i) tout d'abord nous avons parcouru la zone d'étude de bout en bout à la recherche des affleurements représentatifs sur lesquels les informations utiles dans le cadre de notre projet ont été récoltées ;

(ii) une fois répertorié, les prises de vue ont été faites sur différents angles de sorte à avoir une vue complète (3D) des mesures et des orientations des structures sur lesdits affleurements;

(iii) ensuite les mesures structurales ont été collectées sur les différents sites d'affleurement. Ces mesures tiennent essentiellement compte de l'orientation des différents éléments structuraux et en se servant des marqueurs de la déformation nous avons proposé un ordre chronologique relative de mise en place de différentes structures ;

(iv) puis, les échantillons sains ont été caractérisés in-situ avant d'être prélevé avec soin et étiqueter sans ambiguïté en fonction des variations locales des types pétrographiques. Au total 140 échantillons représentatifs de roche ont été récoltés.

(v) enfin, le dernier volet des campagnes de terrain a consisté en la collecte des informations minières dans les sites d'orpaillage. À cet effet, 73 puits d'exploration ont été

investigués et les paramètres retenus sont : l'épaisseur du stérile, l'épaisseur du gravier minéralisé et la teneur en or de ce gravier.

La réalisation de ces travaux a nécessité des moyens matériels appropriés tels que:

(1) **les cartes topographiques** ont permis entre autres de localiser le secteur d'étude par ses coordonnées géographiques et à apprécier l'orographie ainsi que le réseau routier. Ces cartes ont aussi servi au report des informations géologiques et au tracé des itinéraires;

(2) **la boussole** munie du clinomètre a été utilisée aussi bien pour prélever les échantillons orientés que pour la prise des mesures des différents éléments structuraux ;

(3) **le GPS (Global Positioning System)** Sur le terrain, nous avons relevé les coordonnées GPS de chaque point d'affleurement, ce qui a facilité la projection desdits points sur la carte topographique en vue d'établir la carte géologique ;

(4) **la loupe de minéralogiste ou loupe de terrain** a servi au grossissement des minéraux afin de faciliter leur identification;

(5) **la masse et le marteau du géologue** ont été utilisés pour prélever les échantillons frais pour la confection des lames minces d'une part et les analyses géochimiques d'autre part ;

(6) **l'appareil de photos numériques** a servi aux prises de vue des affleurements et des éléments structuraux. Il faut indiquer ici qu'un objet de dimension standard (stylo, marteau, pièce de monnaie, ...) a été utilisé pour servir d'échelle à chaque prise de vue ;

(7) **le marqueur indélébile, carnet de terrain et le sac du géologue:** l'étiquetage des différents échantillons a été fait à l'aide d'un marqueur à encre indélébile. Les observations de terrain ont été consignées dans le carnet de terrain. Les sacs à dos adaptés au transport des matériaux lourds ont été utilisés pour transporter les échantillons ;

(8) **un équipement vestimentaire** approprié connu sous le nom de EPI (équipement de protection individuelle) a également été nécessaire pour mener à bien nos campagnes de terrain.

## **II.2- EN LABORATOIRE**

Les méthodes de laboratoire varient ici en fonction de l'objectif à atteindre et comprennent essentiellement de la confection et l'observation des lames minces, les études microstructurales, les analyses géochimiques sur roche totale. De plus, nous avons utilisé des

techniques modernes de géomatique (traitement des images satellites notamment Landsat-7 ETM<sup>+</sup>, Landsat-8 et ASTER à l'aide des logiciels SIG (Système d'Information Géologique) et de géostatistique minière par krigeage. Les projections stéréographiques illustrées dans le chapitre dédié à l'analyse structurale sont construites dans l'hémisphère inférieur du canevas de Schmidt.

### **II.2.1- Confection et observation des lames minces**

L'étude pétrographique a commencé sur le terrain par la reconnaissance macroscopique des minéraux et la récolte des échantillons de roche. Elle s'est poursuivie au laboratoire avec la confection et l'observation des lames minces. Cette opération s'effectue étape par étape du sciage des blocs pour obtenir des sucres, le collage des sucres sur les lames porte-objet, la réduction de la taille des sucres par rodage et la rectification et obtention des lames standards (épaisseur : 30  $\mu\text{m}$ ) et polies (épaisseur : 10  $\mu\text{m}$ ). Au total, 57 lames minces ont été confectionnées sur les 140 échantillons récoltés, dont 17 au Laboratoire de Traitement des Minerais (LTM) de l'Institut de Recherches Géologique et Minière (IRGM) à Nkolbisson-Yaoundé et 40 à la Division des Sciences Géologiques et Planétaires de l'Institut Technologique de Californie aux États Unis d'Amérique. Les lames minces de minéraux lourds (10) ont été aussi confectionnées au Laboratoire de Géosciences des Formations Superficielles du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, suivant la méthode de [Parfenoff et al. \(1970\)](#) et [Rossoni-Notter et al. \(2017\)](#).

Les études pétrographiques de ces lames se sont déroulées au Laboratoire de Géosciences des Formations Profondes et Applications du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I à l'aide du microscope optique binoculaire de marque Optic Ivymen System. Les microphotographies en lumière naturelle, polarisée et analysée et en lumière réfléchie ont été réalisées à l'Institut Technologique de Californie.

### **II.2.2-Méthodes géochimiques**

Au terme des observations pétrographiques, vingt et trois (23) échantillons frais ont été sélectionnés et expédiés à l'Institut Technologique de Californie (USA) pour les analyses géochimiques sur roche totale. Une fois arrivés au laboratoire, ces échantillons ont été réduits en granulats d'une taille de 1 à 5 mm d'abord au broyeur à mâchoires puis au broyeur à cylindre. Les granulats obtenus précédemment sont ensuite porphyrisés pour l'obtention des poudres très fines de taille inférieure au micromètre qui sont distinctivement mises en flacon et étiquetées. Pour chaque échantillon, l'on prélève 100g pour le quartage (division en 4 ou 8

fractions identiques). Ensuite 10g sont prélevés pour fabriquer des pastilles destinées à l'analyse proprement dite.

La composition chimique en roche totale a été déterminée à l'aide de différentes techniques: les éléments majeurs ont été analysés par spectrométrie d'émission atomique couplée au plasma d'induction (ICP-AES) et les éléments traces par spectrométrie de masse couplée au plasma d'induction (ICP-MS) sur un spectromètre de masse VG-Plasma Quad STE ICP. Au total, 43 éléments ont été dosés et le protocole analytique commence par une phase de préparation où un mélange de 600 mg d'acide borique et de 900 mg de métaborate de lithium a été ajouté à 100 mg d'échantillon porphyrisé dans un creuset en or ou platine. L'ensemble est ensuite fondu dans un four tunnel automatique à 1080°C pendant 2h. Le verre obtenu est dissous dans 120 ml de solution contenant de l'acide nitrique, de l'eau oxygénée, du glycérol bi-distillée et placée sur un plasma. Cette ionisation a entraîné une émission de photons (proche UV à proche IR) qui ont été analysés pour le dosage des éléments majeurs. Les éléments majeurs et le scandium ont été dosés simultanément par ICP-AES tandis que le dosage des éléments traces, y compris les terres rares (REE), a été effectué par ICP-MS. Les teneurs éléments majeurs sont exprimées en pourcentage de poids d'oxydes (wt.%) et celles des éléments en trace et REE en partie pour million (ppm). Pour un meilleur étalonnage, des standards ont été introduits dans chaque série d'échantillons, avec ou sans ajout d'éléments supplémentaires. Les incertitudes analytiques sont de l'ordre de 1 % pour les éléments majeurs et entre 5 et 10 % pour les éléments traces. La précision analytique des REE est estimée à 5 % pour les concentrations > 10 ppm et 10 % pour les concentrations < 10 ppm (Carignan et al., 2001).

### **II.2.3- Méthodes de télédétection**

L'approche par télédétection a été abordée dans ce travail en deux volets : (1) d'abord pour la cartographie des accidents tectoniques régionaux à travers les linéaments d'images landsat-7 ETM+, (2) ensuite pour la cartographie de l'altération hydrothermale associée à la minéralisation aurifère en surface en se servant des images landsat-8 et ASTER.

#### ***II.2.3.1- Cartographie des accidents tectoniques régionaux***

L'imagerie satellitaire est fréquemment utilisée pour l'identification et la cartographie des structures géologiques qui transparaissent dans la géomorphologie (Parsons et Yearley, 1986, Ozer et al., 1988). L'identification de ces structures et plus spécifiquement des structures linéaires ou linéaments, peut se faire par une interprétation visuelle des images,

mais il est de nos jours recommandé de recourir le plus souvent à des traitements plus automatisés, ceci en vue d'obtenir un rendu dénué de toute impureté et qui se rapproche au mieux de la réalité. En effet, les travaux récents (Metang et al., 2014; Takodjou Wambo et al., 2016; Binam Mandeng et al., 2018) que l'analyse des images satellitaires améliore le tracé des structures tectoniques et conduit de ce fait à une cartographie structurale plus précise en zone de couverture forestière épaisse.

### ***II.2.3.1.1-Méthodologie de traitement des images satellitaires***

Il existe une grande variété de techniques d'amélioration d'images. Le choix d'une technique particulière dépend de l'application, des données disponibles, de l'expérience et des préférences de l'analyste d'images. Dans ce travail, différents types de traitements ont pu être réalisés, ceci en vue de faciliter la détection des linéaments et des limites entre les ensembles lithologiques ayant une signature spectrale particulière. Pour ce faire, quatre principales techniques ont été appliquées, à savoir: l'Analyse en Composante Principale (ACP), la combinaison de bandes, la composition colorée et le filtrage spatial.

#### **(i) - L'analyse en composantes principales (ACP)**

L'ACP fait partie du groupe des méthodes descriptives multidimensionnelles appelées méthodes factorielles. Pour compresser les données redondantes des images multi-bandes et trouver une combinaison de composition colorée la plus discriminante possible, l'ACP propose à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de  $p$  variables quantitatives pour  $n$  unités (appelées aussi individus), des représentations géométriques de ces unités et de ces variables (Duby et Robin., 2006). Les bandes brutes ETM+ sont fortement corrélées comme le montrent le [tableau 2.1](#) ci-dessous :

**Tableau 2.1.** Matrice de corrélation des bandes brutes de l'image Landsat ETM+ utilisée

	<b>ETM1</b>	<b>ETM2</b>	<b>ETM3</b>	<b>ETM4</b>	<b>ETM5</b>	<b>ETM7</b>
<b>ETM1</b>	1,000000	0,738563	0,733769	0,005681	0,484322	0,639578
<b>ETM2</b>	0,738563	1,000000	0,839243	0,304762	0,724692	0,757614
<b>ETM3</b>	0,733769	0,839243	1,000000	0,072603	0,758965	0,890240
<b>ETM4</b>	0,005681	0,304762	0,072603	1,000000	0,549949	0,168209
<b>ETM5</b>	0,484322	0,724692	0,758965	0,549949	1,000000	0,874637
<b>ETM7</b>	0,639578	0,757614	0,890240	0,168209	0,874637	1,000000

Ces matrices de corrélation témoignent de la forte redondance de l'information contenue dans les images Landsat ETM+. Il convient donc d'en réaliser une analyse en composante principale afin de s'affranchir des redondances et d'améliorer le contraste dans l'image. Cette technique réduit en outre le nombre de bandes à traiter en comprimant les informations selon une hiérarchie. Les six canaux ETM+ 1, 2, 3, 4, 5 et 7 de résolution de 30 m chacun sont par conséquent retenues pour l'ACP, tandis que les canaux ETM+ 6(1) et 6(2) de résolution de 60 m et la bande panchromatique de résolution de 15 m sont exclus de cette analyse. Les images transformées ainsi obtenues et regroupant le maximum d'informations ont ensuite été combinées à travers une composition colorée.

### **(ii) - Composition colorée**

Il s'agit de transformer les images en niveau de gris en images couleur obtenues à partir de trois bandes en attribuant à chacune d'elle une des couleurs primaires: rouge (R), vert (V) et bleu (B). Dans le souci d'optimiser l'analyse visuelle et d'adapter les variations de tonalités au système visuel humain, des compositions colorées ont été réalisées respectivement à partir des bandes du proche infrarouge (PIR) et du moyen infrarouge (MIR1 et MIR2) de l'image Landsat ETM+ utilisée. En effet, chacune de ces bandes intègre des informations complémentaires pouvant mettre en évidence la structure du sol et de ce fait ressortir plus nettement les discontinuités structurales et texturales entre la végétation et les accidents géologiques, facilitant ainsi la discrimination visuelle des linéaments. Cette application a pour avantage de regrouper à l'intérieur d'une seule image, l'ensemble des informations contenues dans les images transformées précédemment retenues.

### **(iii) -Combinaison de bandes**

La combinaison de bandes consiste à un ensemble d'opérations arithmétiques (addition, soustraction et division) appliqué sur les bandes. Quelques rapports de bandes ont été appliqué pour la détection des linéaments notamment le rapport  $TM7-TM4/TM7+TM4$  qui permet de visualiser les linéaments rattachés au réseau hydrographique (Kouamé, 1999) ce qui est un atout pour l'information structurale dans la région de Ngoura-Colomines où le réseau hydrographique est à guidage structural (Takodjou Wambo, 2015). Un autre rapport de bandes  $TM6-TM7/TM6+TM7$  permet de mettre en évidence les linéaments régionaux, les structures particulières et les grandes zones de fractures (failles et/ou des zones de cisaillement) du substratum qui drainent les eaux souterraines à grande échelle (Savané, 1997). Ce second rapport qui induit l'utilisation de la bande spectrale de l'IR thermique/ lointain n'a été possible qu'après le ré-échantillonnage de la bande TM6 selon la même résolution spatiale que les autres bandes.

#### (iv) - Filtrage spatial

Le filtrage de l'image consiste à recalculer la valeur de chaque pixel en analysant les radiométries sur un voisinage, dans l'optique d'accentuer le contraste. Un filtre linéaire convolue la radiométrie de l'image par une fenêtre de convolution (petite matrice carrée centrée sur le pixel courant) dont les coefficients déterminent l'effet du filtrage (Polidori, 2006). Dans cette étude, la convolution s'applique sur une image  $I(x, y)$  avec une fonction  $f(x, y)$  appelée réponse impulsionnelle (ou opérateur de convolution) du filtre. Dans le cas continu, l'image filtrée est donnée par :

$$I_f(x, y) = (f \times I)(x, y) = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y') I(x-x', y-y') dx' dy'$$

Dans le cas discret et pour prendre l'exemple simplifié d'une image carrée, les domaines de  $I$  et de  $f$  sont bornés. Le domaine de  $I$  est  $[-N/2, +N/2]^2$  si  $N$  désigne la taille de l'image et le domaine de  $f$  est  $[-K/2, +K/2]^2$  avec  $K \leq N$ . La convolution s'écrit alors :

$$I_f(x, y) = (f \times I)(x, y) = \sum_{i'=-k/2}^{i'=+k/2} \sum_{j'=-k/2}^{j'=+k/2} f(i-i', j-j') I(i', j')$$

L'on notera que le filtrage linéaire consiste simplement à remplacer chaque niveau de gris par une combinaison linéaire des niveaux de gris des points voisins.

Les filtres utilisés ici sont les filtres directionnels qui sont appliqués dans quatre principales directions : N-S, E-W, NE-SW, SE-NW. Le [tableau 2.2](#) donne un exemple de matrices pour les filtres directionnels de Sobel utilisés dans cette étude. L'algorithme de Sobel est un opérateur utilisé en traitement d'image pour la détection de contours. Dans la pratique, l'opérateur calcule le gradient de l'intensité de chaque pixel. L'opérateur utilise des matrices de convolution. La matrice (dans le cas présent de taille  $7 \times 7$ ) subit une convolution avec l'image pour calculer des approximations des dérivées horizontale et verticale. Ces filtres selon des fenêtres glissantes  $7 \times 7$  ont été appliqués aux néo-canaux ACP pour accentuer les discontinuités lithologiques et structurales et faciliter la discrimination des linéaments.

L'ensemble de ces traitements sur l'image Landsat (composition colorée, combinaisons arithmétiques de bandes spectrales, et néo-canaux ACP transformés par des filtres directionnels) a permis de fournir des supports visuels complémentaires sur lesquels le travail de photo-interprétation des linéaments s'est appuyé. Après le filtrage des images suivant les directions ci-dessus mentionnées, la prochaine étape a consisté en l'extraction manuelle et automatique des linéaments.

**Tableau 2.2.** Matrices des filtres Sobel 7×7 et gradient de Yésou et al. (1993).

1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1	<table border="1"> <tbody> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> </tbody> </table> <p>Yésou et al.(1993)</p>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1
1	1	1	1	1	1	1																																																									
1	1	1	1	1	1	1																																																									
1	1	1	1	1	1	1																																																									
0	0	0	0	0	0	0																																																									
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1																																																									
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1																																																									
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1																																																									
1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-2	0	2	1	1																																																		
1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1																																																		
0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2																																																		
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1																																																		
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1																																																		
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1																																																		
Sobel N-S							Sobel E-W																																																								
0	1	1	1	1	1	2	2	1	1	1	1	1	0																																																		
-1	0	2	2	2	3	1	1	3	2	2	2	0	-1																																																		
-1	-2	0	3	4	2	1	1	2	4	3	0	-2	-1																																																		
-1	-2	-3	0	3	2	1	1	2	3	0	-3	-2	-1																																																		
-1	-2	-4	-3	0	2	1	1	2	0	-3	-4	-2	-1																																																		
-1	-3	-2	-2	-2	0	1	1	0	-2	-2	-2	-3	-1																																																		
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-2																																																		
Sobel NE-SW							Sobel NW-SE																																																								

### II.2.3.1.2- Extraction du réseau de linéaments par photo-interprétation

En fonction des données disponibles et compte tenu de la connaissance du terrain, les extractions automatique et manuelle des linéaments ont été effectuées dans le cadre de cette étude. Pour ce faire, toutes les linéarités anthropologiques (réseau routier, fils de haute tension, layons de délimitation de forêt et surfaces cultivées...) de la zone explorée ont d'abord été répertoriées et stockées sous forme de base de données SIG. Ces impuretés ont par la suite été éliminées du rendu final et seuls les linéaments d'origine tectonique ont un intérêt dans cette étude. L'extraction manuelle à consister en la numérisation de toutes les structures linéaires observées sur l'image satellitaire transformée (ACP), rehaussée et filtrée. L'extraction automatique de la seconde famille de linéament a été rendue possible grâce au logiciel de traitement d'image satellitaire Geomatica 2012. La carte du réseau de fractures est obtenue après la validation du réseau des linéaments par comparaison avec celui des accidents relevés sur le terrain.

### II.2.3.2- Cartographie des altérations hydrothermales

Les systèmes orogéniques de type Au et porphyres Cu-Au sont généralement associés à des zones d'altération hydrothermale en surface et la cartographie de ces zones d'altération est l'une des techniques les plus importantes du stade de reconnaissance de l'exploration minérale (Duuring et al., 2012; Zoheir et al., 2018; Abdelnasser et al., 2018; Pour et al.,

2018a; Noori et al., 2019; Sheikhrhimi et al., 2019). La télédétection est un moyen efficace pour atteindre cet objectif. En effet, les données de télédétection multi-spectrales et hyperspectrales permettent d'identifier les minéraux d'altération hydrothermale associés aux minéralisations en or et en cuivre à travers les bandes du visibles, proche infrarouge et de l'infrarouges à ondes courtes (Liu et al., 2018; Noori et al., 2019; Sheikhrhimi et al., 2019). Dans ce travail, les images landsat-8 et ASTER ont été utilisées pour détecter les signatures spectrales des halos d'altération hydrothermale contenant des fonctions d'absorption de  $\text{Fe}^{+2}$ ,  $\text{Fe}^{+3}$ ,  $\text{Al-OH}$ ,  $\text{Mg-OH}$ ,  $\text{Si-OH}$  et  $\text{CO}_3^{2-}$ . Ensuite, l'analyse par diffraction des rayons X (DRX) et la spectroscopie de réflectance a été effectuée sur des échantillons représentatifs (altérés et frais) pour vérifier les corrélations entre les signatures spectrales et les zones d'altération hydrothermale associées à la minéralisation aurifère en surface.

#### ***II.2.3.2.1- Prétraitement des données Landsat-8 et ASTER***

L'image Landsat-8 de niveau 1T (relief corrigé) acquise le 30 mars 2017 avec une couverture en nuages de 6,25% ainsi qu'une scène ASTER sans nuage de niveau 1T corrigée (AST\_L1T\_00303052007093157) du 5 mars 2007 couvrant la zone d'étude ont été obtenue par l'intermédiaire du Centre d'Observation et de Science des Ressources Terrestres des États-Unis (EROS) (<http://earthexplorer.usgs.gov>). Les deux images ont été géoréférencées dans la projection cartographique UTM de la zone 33 N à l'aide du datum WGS84. La correction atmosphérique a été appliquée aux données Landsat-8 à l'aide de l'algorithme FLAASH, analyse atmosphérique de l'hypercube spectral à ligne directe (Cooley et al., 2002) avec des modèles d'aérosols atmosphériques et d'aérosols troposphériques de la saison pluvieuse (Research System, Inc., 2008). La correction de la diaphonie (défaut dans la transmission ou la restitution d'un signal évalué en décibels, dû à un transfert d'énergie d'un signal sur un autre) a été effectuée sur les données ASTER (Iwasaki et Tonooka, 2005). Ces données de télédétection ont été traités à l'aide des packages logiciels ENVI (Environment for Visualizing Images) version 5.2 et ArcGIS version 10.3.

#### ***II.2.3.2.2- Traitement des images Landsat-8 et ASTER***

Les approches spécialisées de traitement d'image sont essentielles pour extraire des informations significatives sur les signatures spectrales d'altération hydrothermale dans des zones à couverture végétale dense comme le secteur de Ngoura-Colomines. Dans le but d'extraire des informations spectrales relatives à la végétation et à l'altération hydrothermale notamment les oxydes et hydroxydes de fer, les groupes  $\text{Al-OH}$ ,  $\text{Fe-Mg-OH}$  et  $\text{CO}_3^{2-}$  et la

silicification, les techniques de l'analyse en composantes principales (ACP), de l'analyse en composantes indépendantes (ACI) et du rapport de bandes spectrales ont été appliquées sur les deux types d'images après le prétraitement réalisé au paragraphe II.2.4.1.

### (i) Analyses ACP et ACI

L'ACP est une technique statistique multivariée qui sélectionne des combinaisons linéaires non corrélées (chargements de vecteur propre) de manière à ce que chaque composant extrait successivement une combinaison linéaire avec une variance plus petite (Jensen, 2005; Cheng et al., 2006; Schowengerdt, 2007 ; Gupta, 2017). Les charges de vecteurs propres isoleront alors idéalement les informations les plus essentielles pour identifier les assemblages de minéraux d'altération hydrothermale. Le vecteur propre code comment chaque composante  $p$  dépend de chaque bande  $k$ , c'est-à-dire comment chaque bande "charge" chaque composant principal (Jensen, 2005):

$$R_{kp} = \frac{a_{kp} \times \sqrt{\lambda_p}}{\sqrt{\text{Var}_k}}$$

Où  $a_{kp}$  est le poids de la bande  $k$  dans le vecteur propre de la composante  $p$ ;  $\lambda_p$  est la valeur propre correspondante,  $\text{Var}_k$  est la variance de la bande  $k$  dans la matrice de covariance et  $R$  est une nouvelle matrice de charges factorielles.

L'élimination des quelques premiers composants principaux, hautement corrélés mais contenant peu d'informations, laisse généralement un petit résidu de la variance d'origine contenant des informations significatives des signatures spectrales des minéraux ou des groupes de minéraux souhaités (Gupta et al., 2013). Une charge positive dans la bande de réflexion d'un minéral produit des pixels améliorés brillants liés à ce minéral, tandis qu'une charge négative dans une bande de réflexion conduit à des pixels améliorés sombres associés au minéral (Crosta et Moore, 1989). Par conséquent, les chargements de vecteurs propres dans chaque ACP identifieront dans quelles images ACP un minéral d'altération spécifique produira des pixels clairs ou foncés (Gupta et al., 2013). Les vecteurs propres de trois ACP ont été calculés: une analyse de huit bandes OLI + TIRS pour Landsat-8, une analyse de neuf bandes VNIR + SWIR pour ASTER et une analyse de cinq bandes TIR pour ASTER.

L'ACI est une technique statistique et informatique de traitement de matrice et d'analyse de données, visant à récupérer des signaux individuels (ou «sources») à partir de mélanges de signaux observés, exploitant uniquement l'hypothèse d'indépendance mutuelle des signaux (Hyvarinen et Oja, 2000; Hyvarinen, 2013). Elle recherche des combinaisons de signaux avec les fonctions de densité de probabilité les moins gaussiennes possibles (Hyvarinen et al., 2010; Shimizu, 2012). Celles-ci sont identifiées comme les «composants

indépendants» (CI) des observations. Mathématiquement, si  $X$  est la matrice des données observées, l'ACI postule qu'il existe une décomposition  $X = AS$ , où  $S$  est une matrice contenant les signaux de source inconnue et  $A$  est une matrice de mélange inconnue qui associe les sources pour donner les observations. Le problème consiste à trouver la «matrice de mélange» ( $W = A^{-1}$ ) telle que  $S = WX$ . Chaque signal source peut alors être obtenu en prenant le produit interne d'un «vecteur de démixage», une ligne en  $W$ , avec les signaux mélangés dans les données (Hyvärinen et al., 2001). L'ACI est très étroitement liée aux méthodes de séparation aveugle du signal (Hyvärinen, 2005; Comon et Jutten, 2010). Elle est superficiellement liée à l'ACP et à l'analyse factorielle, mais elle est souvent plus capable d'isoler des sources ou des facteurs sous-jacents dans les cas de bruit réaliste et de structure de corrélation dans les données (Pour et al., 2018b).

Dans cette étude, l'ACI a été appliquée sur les images obtenues de l'ACP, en utilisant les images ACP1 à ACP8 de Landsat-8, ACP 1 à ACP9 des données VNIR + SWIR d'ASTER et ACP 1 à ACP 5 des données TIR d'ASTER. Le retraitement peut être exprimé par une rotation du circuit intégré avec une fonction de contraste LogCosh, 100 répétitions avec un seuil de convergence de 0,0001 et aucun redimensionnement de l'échantillon. Les bandes de sortie ont été triées par cohérence bidimensionnelle (2D), qui mesure la moyenne de deux coefficients d'autocorrélation, l'un avec des décalages de ligne (direction  $y$ ) et l'autre (direction  $x$ ) avec des décalages d'échantillon (Système de recherche, Inc., 2008). Les composants générés par la rotation du circuit intégré ont été analysés sur la base de facteurs statistiques, de diagrammes de dispersion 2D et d'un examen visuel des images de sortie.

## **(ii) Rapports et combinaisons de bandes**

Les combinaisons mathématiques de bandes telles que les rapports et les produits sont souvent utiles pour la discrimination qualitative des unités lithologiques et la détection des minéraux d'altération (Mars et Rowan, 2011). Les rapports ou indices de bande spectrale sont connus pour leur capacité à éliminer, ou du moins à minimiser, les différences d'éclairage dues à la topographie (ombrage de la surface causé par l'angle d'éclairage solaire et l'orientation de la pente), source majeure d'informations dans des images brutes de terrain accidenté (Colby, 1991). De plus, il est facile de préparer des images composites de couleur rouge-vert-bleu (RVB) en combinant trois rapports de bande spectrale dans une seule carte-image, ce qui facilite l'interprétation des données d'image multicanaux et fait ressortir les caractéristiques pouvant être masquées dans des images monocanal (Pohl et Van Genderen, 1998). Plusieurs rapports de bande et indices minéralogiques fondés sur des combinaisons ont

été développés dans cette étude en prenant en compte la sensibilité de la longueur d'onde des bandes spectrales Landsat-8 et ASTER et des caractéristiques spectrales des minéraux d'altération cibles (Pour et al., 2018c).

La limonite, la goethite, la jarosite et l'hématite ont tendance à présenter des caractéristiques d'absorption diagnostiques dans la région VNIR (0,4 -1,1  $\mu\text{m}$ ) en raison des processus de transfert de charge et de champ cristallin (Morris et al., 1985; Sherman et Waite, 1985). Le transfert de charge absorbe entre 0,48 et 0,72  $\mu\text{m}$ , tandis que l'absorption par champ cristallin se situe entre 0,63 et 0,72  $\mu\text{m}$  pour le fer ferreux et entre 0,85 et 1,0  $\mu\text{m}$  pour le fer ferrique (Murphy et Monteiro, 2013; Noda et Yamaguchi, 2017). Les bandes 2, 3, 4 et 5 de Landsat-8 et les bandes 1, 2 et 3 d'ASTER se situent dans la plage appropriée pour ces absorptions. Abrams et al. (1983) ont utilisé le rapport de bande 3/1 de l'ancien Landsat Thematic Mapper (TM) pour cartographier les oxydes de fer dans le district minier de cuivre Helvetia-Rosemont, dans le sud de l'Arizona aux États-Unis. Les bandes 2(0,45-0,51  $\mu\text{m}$ ) et 4(0,64-0,67  $\mu\text{m}$ ) de Landsat-8 sont équivalentes aux bandes Landsat TM 1 et 3, respectivement. Par conséquent, un rapport de bande spectrale de 4/2 devrait permettre de détecter des minéraux riches en fer dans les données Landsat-8. Deux définitions plus complexes des indices Fe-minéraux (Fe-IM), Landsat-8 (bande 6/bande 5)  $\times$  (bande 4/bande 3) et ASTER (bande 4/bande 3)  $\times$  (bande 2/bande 1) introduit par Pour et al. (2018c) ont également été testés et comparés au résultat plus simple du rapport de bande Landsat-8 4/2. Les bandes SWIR de Landsat-8 pourraient être utilisées pour identifier les groupes minéraux hydroxylés (Al-OH) et (Fe, Mg-OH) et  $\text{CO}_3^{2-}$ . Les minéraux argileux et carbonatés présentent des caractéristiques d'absorption spectrale entre 2,1 et 2,4  $\mu\text{m}$  et des caractéristiques de réflectance entre 1,55 et 1,75  $\mu\text{m}$ , coïncidant avec les bandes 7(2,11-2,29  $\mu\text{m}$ ) et 6(1,57-1,65  $\mu\text{m}$ ) de Landsat-8, respectivement. Par conséquent, la détection des minéraux argileux et carbonatés devrait être améliorée en utilisant les caractéristiques complémentaires de ces minéraux dans ces deux bandes, suggérant l'utilisation du rapport de bande 6/7. Nous avons comparé ensuite ce résultat à l'indice de minéraux d'altération porteurs d'Al-OH (Al-OH-MI), bande 6/(bande 7  $\times$  bande 7), suggéré par Pour et al. (2018c).

Les bandes ASTER SWIR peuvent avoir une résolution spectrale suffisante pour distinguer les signatures spectrales des zones d'altération argilique, séricitique et propylitique avancées (Mars et Rowan, 2011). L'altération argilique avancée forme généralement la kaolinite et l'alunite, avec une caractéristique d'absorption d'Al-OH à 2,17  $\mu\text{m}$  dans la bande ASTER 5. La séricite possède une caractéristique d'absorption intense d'Al-OH centrée à 2,20

$\mu\text{m}$ , coïncidant avec la bande ASTER 6. Les zones propylitiques à épidote, chlorite et calcite, présentent des caractéristiques d'absorption du Mg-OH à  $2,35 \mu\text{m}$  dans la bande ASTER 8. Par conséquent, les bandes 5, 6 et 7 de ASTER ont été utilisées pour déterminer les minéraux portant l'Al-OH (Al-OH-MI) (bande 5×bande 7)/(bande 6×bande 6). Pour détecter les groupes (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$ , les bandes 7, 8 et 9 d'ASTER (bande 7×bande 9)/(bande 8×bande 8) ont été sélectionnées (Pour et al., 2018c).

Les bandes 5(0,85-0,88  $\mu\text{m}$ ) et 6(1,57-1,65  $\mu\text{m}$ ) de Landsat-8 sont utilisées pour l'identification de roches non altérées et de minéraux silicatés courants, ce qui suggère que le rapport Landsat-8 (5/6) (Abrams et al., 1983). De même, l'indice de radiance (TRLI) basé sur Landsat-8 (bande 10+bande 11)×(bande 11) est conçu pour extraire les minéraux silicatés (Pour et al., 2018c).

Les roches mafiques à ultramafiques présentent une émissivité élevée dans les bandes ASTER 10 à 12 (8 à 9  $\mu\text{m}$ ) mais une émissivité faible dans les bandes ASTER 13 et 14 (10 à 12  $\mu\text{m}$ ). Les roches felsiques ont une faible émissivité dans les bandes 10 à 12 et une émissivité élevée dans les bandes 13 et 14 (Yajima et Yamaguchi, 2013). Par conséquent, les combinaisons de bandes ASTER TIR présentent un excellent potentiel pour identifier et discriminer les unités mafiques à ultramafiques des unités felsiques. Les bandes 10, 11, 12, 13 et 14 de ASTER ont été combinées dans l'indice (bande 10+bande 11+bande 12)/(bande 13+bande 14) pour cartographier les zones silicifiées.

Enfin, nous avons choisi des combinaisons des rapports de bande sélectionnés pour générer des images RVB améliorées à partir de données Landsat-8 et ASTER. Ces images révèlent des zones distinctes dans le secteur d'étude interprétées d'une part comme des unités lithologiques non altérées et d'autre part comme des zones d'altération hydrothermale de divers types associées à la minéralisation aurifère en surface.

#### ***II.2.3.2.3- Analyse par diffraction des rayons X***

Les échantillons de poudre de roches ont été analysés par diffraction des rayons X (DRX) avec un diffractomètre de marque Philips X'Pert du laboratoire de science des matériaux du *California Institute of Technology* (Caltech) de Pasadena, Californie (USA). Environ 1 g de poudre a été étalé sur une lame de verre de 3cm x 1cm, orienté parallèlement à l'allongement des fentes dans l'optique à rayons X. Un rayonnement de Cu monochromatique ( $K\alpha = 1,54060 \text{ \AA}$ ) a été généré en éclairant une cible de Cu avec 40 mA de courant à un potentiel d'accélération de 45 kV. Le goniomètre a été balayé de  $2\theta = 10$  à  $80^\circ$  avec une taille

de pas de 0,017°. Le temps de collecte des données était de 1 heure pour chaque échantillon. Les minéraux ont été identifiés en se basant sur les modèles de référence du projet RRUFF (<http://rruff.info>, Lafuente et al., 2015). L'orientation préférentielle extrêmement forte des grains de flocons de phyllosilicates a proscrit l'affinement quantitatif des proportions de minéraux à partir des intensités maximales de ces modèles, de sorte que l'interprétation s'est limitée à l'identification des minéraux et à l'évaluation qualitative des proportions relatives. Ceci nous a permis de vérifier l'identification de base de certains minéraux d'altération des images satellites couvrant les affleurements sur lesquels les échantillons représentatifs ont été récoltés.

#### ***II.2.3.2.4- Spectroscopie par réflectance***

Les spectres des échantillons représentatifs ont été mesurés à l'aide de deux instruments du laboratoire de spectroscopie planétaire de Caltech. Les spectres de réflectance du visible au proche infrarouge des échantillons pulvérisés (longueurs d'onde de 350 à 2500nm à une résolution spectrale de 1nm) ont été recueillis avec un spectro-radiomètre Malvern Panalytical ASD FieldSpec4. Les spectres du proche infrarouge et de l'infrarouge thermique (longueurs d'onde de 2500 à 25000nm, équivalentes à 400 à 4000  $\text{cm}^{-1}$ , équidistantes en nombre d'onde avec une résolution spectrale de 0,5  $\text{cm}^{-1}$ ) ont été enregistrés en effectuant une moyenne de 250 balayages en géométrie de réflectance dans la chambre principale d'un récepteur spectromètre infrarouge à transformée de Fourier Nicolet iS50 (FT-IR).

#### **II.2.4 Méthodes d'analyse géostatistique**

La méthode géostatistique d'interpolation spatiale connue sous le nom de « Krigeage » a été utilisée pour analyser la variabilité spatiale des teneurs en or des alluvions dans le secteur d'étude. Différents types de données notamment les images Landsat-7 ETM+, la carte géologique de Batouri-Est à l'échelle 1/500000 ([Gazel et Gerard, 1954](#)), la carte topographique à l'échelle 1/200000 et les données minières provenant des puits d'exploration ont été utilisés ([Takodjou Wambo et al., 2018](#)). Pour l'évaluation de la teneur en or de chaque puits, nous avons utilisé la technique de lavage à la batée pour récupérer le concentré d'or qui a été pesé en utilisant une balance de haute précision. L'étude morphoscopique des grains d'or s'est fait par examen de ces derniers au microscope binoculaire au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I.

### II.2.4.1- Traitement des données

Les données de terrain ont été analysées en utilisant les techniques géostatistiques couplées au SIG. Trois techniques principales de krigeage, à savoir le krigeage simple, le krigeage ordinaire et le krigeage universel, sont largement utilisées pour caractériser la répartition spatiale des gisements minéraux. Un avantage du krigeage est qu'il fournit une estimation de la variance ou de l'écart type de la configuration des données utilisée dans l'estimation. Une variance d'estimation élevée indique un manque de données compte tenu de la continuité spatiale du phénomène (Matheron, 1963). Le krigeage simple a une variable stationnaire avec une moyenne connue, le krigeage ordinaire est à variables stationnaires avec une moyenne inconnue et le krigeage universel a des variables non stationnaires. Nous nous sommes optés pour le krigeage ordinaire, plus précisément le krigeage ponctuel, car il s'agit de la méthode géostatistique la mieux adaptée au type de données utilisé dans ce travail (Heriawan et Koike, 2008).

#### - Variogramme

L'interpolation spatiale est un problème classique d'estimation d'une fonction  $F(x)$ , où  $X=(x, y)$ , à un point  $x_p$  du plan à partir de valeurs connues de  $F$  à un certain nombre de points autour de  $X_i$ :

$$F(x_p) = \sum_{i=1}^n W_i F(x_i) \quad (1)$$

La difficulté ici est de déterminer le poids ( $W_i$ ) de chacun des points voisins. Pour ce faire, les deux méthodes courantes pour choisir  $W_i$  sont: (i) l'interpolation linéaire (en fonction de la distance inverse) et (ii) la méthode des splines cubiques (ajustement des polynômes cubiques). La méthode de krigeage choisit des poids basés sur le degré de similitude entre les valeurs de  $F$ , qui est alors la covariance parmi les points par rapport à la distance entre les points. La seule condition indispensable à l'utilisation de la méthode de krigeage est que la moyenne et la variance de la fonction  $F$  soient stationnaires, c'est-à-dire qu'elles ne doivent pas dépendre de la position des points mais uniquement de la distance entre les points (Gratton et al., 2002). Le variogramme est alors simplement la variance totale moins la covariance par rapport à la distance entre les points (Journel et Huijbregts, 1978). La méthode de krigeage utilise alors la moitié du variogramme pour déterminer le poids dans l'équation (1). Le semi-variogramme est calculé à l'aide de l'équation (2) pour les  $n(h)$  points  $X_i$  et  $Y_i$  séparés par une distance  $h = |x_i - y_i|$ :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (x_i - y_i)^2 \quad (2)$$

Le choix du semi-variogramme est ensuite validé par des tests statistiques. Les tests statistiques sont utilisés ici pour détecter si les fluctuations observées entre la moyenne spatiale, la variance et le semi-variogramme global avec les valeurs moyennes associées, la variance de dispersion et le semi-variogramme (statistiques théoriques) sont cohérentes avec le modèle de champ aléatoire et la taille du domaine. Les objectifs ici sont d'évaluer l'accord entre les statistiques expérimentales du champ aléatoire simulé et le modèle statistique correspondant.

### - Krigeage ordinaire

La méthode de krigeage consiste à calculer le poids de  $W_i$  de l'équation (1) en utilisant les valeurs de la fonction  $\gamma(h)$  correspondant aux points  $m$  choisis. La méthode consiste à déterminer la combinaison des poids, c'est-à-dire la combinaison de  $W_i$  de l'équation (1) qui garantit que les valeurs calculées en utilisant le point ciblé  $X_p$  seront trouvées sur la courbe de modèle attendue (Gratton et al., 2002). Les poids sont obtenus en multipliant le  $W_i$ , pour chacun des  $m$  points, par chacune des demi-variances  $m$  associée à ce point (les lignes de la matrice  $A$  dans l'équation (3)). Le défi est expressément défini sous la forme du système  $m+1$  d'équations linéaires à  $m+1$  inconnu d'après Davis (1986).

$$A \cdot W = B \quad (3)$$

où  $A = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1m}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2m}) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(h_{m1}) & \gamma(h_{m2}) & \dots & \gamma(h_{mm}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_m \\ \lambda \end{bmatrix}$  et  $B = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \dots \\ \gamma(h_{mp}) \\ 1 \end{bmatrix}$

Les  $\gamma(h_{ij})$  étant les valeurs du semi-variogramme correspondant à la distance  $h_{ij}$  entre les points  $x_i$  et  $x_j$ . Le  $\gamma(h_{ij})$  a déjà été calculé en utilisant la fonction analytique ajustée au semi-variogramme. Pour que la solution soit optimale, la somme des poids ( $W_i$ ) devrait être égale à 1 (Davis, 1986). Ce dernier ensemble d'informations impose un défi supplémentaire qui est traité en ajoutant une variable libre  $\lambda$ , avec est un multiplicateur de Lagrange, pour minimiser les erreurs d'estimation. Le vecteur  $W$  est obtenu de chaque côté de l'équation (3) par l'inverse de la matrice  $A$ . la valeur attendue au point  $X_p$  est alors calculée en utilisant les valeurs de  $F$ , le  $F(X_i)$ , via l'équation (1). La variance de l'estimation  $sp^2$  qui est le carré des erreurs standard sur chaque point est obtenue par la relation :

$$S_p^2 = W^T \cdot B \quad (4)$$

où T indique la transposition du vecteur W. En supposant que les erreurs d'estimation sont normalement réparties autour de la bonne valeur, la probabilité que la valeur correcte soit  $F(x_p) \pm sp$  est de 68%, alors que la probabilité que la valeur correcte soit  $F(x_p) \pm 2sp$  est de 95% (Davis, 1986).

#### **II.2.4.2- Analyse SIG**

Les techniques de traitement précédentes sont suivies par l'analyse SIG, qui consiste en la création d'une base de données pour la gestion efficace des données et l'interprétation appropriée des résultats. L'analyse SIG des résultats obtenus a été réalisée à l'aide des logiciels ArcGIS 10, Erdas Imagine 2014 et Geomatica 2012. L'analyse des données est la dernière phase dans la mise en œuvre du SIG. La procédure d'analyse des données d'un projet SIG englobe un large éventail d'opérations. Elle va du simple affichage des entités aux modèles analytiques multi-étages complexes (ESRI, 2005). Dans le cadre de cette étude, deux types d'analyse ont été utilisées : l'affichage de la répartition géographique des données et la superposition des différentes couches. Le choix de l'ellipsoïde dépend de la zone géographique où l'on se trouve. Dans notre travail, les données sont géoréférencées dans la projection WGS84 en coordonnées UTM, zone 33N. Le WGS 84 est un système de référence géodésique terrestre fixe basé sur un ensemble cohérent de constantes et de paramètres qui décrivent la taille, la forme, la gravité et les champs géomagnétiques de la Terre. Il convient de noter que les informations contenues dans notre base de données SIG proviennent de plusieurs sources, y compris des campagnes effectuées sur le terrain, les cartes disponibles et les données des sociétés minières. Toutes ces données sont regroupées en couches et présentées sous forme de cartes.

**CHAPITRE III.**  
**INVENTAIRE LITHOLOGIQUE ET**  
**ÉTUDE PÉTROGRAPHIQUE**

*«Tout ce que l'esprit de l'homme peut concevoir et croire, il peut le réaliser.»*  
-Napoleon-hill

## INTRODUCTION

L'inventaire lithologique, la caractérisation pétrographique et minéralogique des différentes formations géologiques qui affleurent dans le secteur de Ngoura-Colomines sont présentées dans ce chapitre, dans le but d'établir les relations entre les différents ensembles lithologiques et de préciser les principales phases minérales en présence. Les travaux de terrain et les études pétrographiques révèlent la présence de trois (03) ensembles lithologiques distincts à savoir : un ensemble magmatique dominant (~60% en volume), un ensemble métamorphique moins représenté (~35%) et un ensemble de roches filoniennes (~05%). Dans ces ensembles lithologiques, 57 lames minces ont été confectionnées sur les 140 échantillons récoltés sur le terrain (Fig. 3.1).

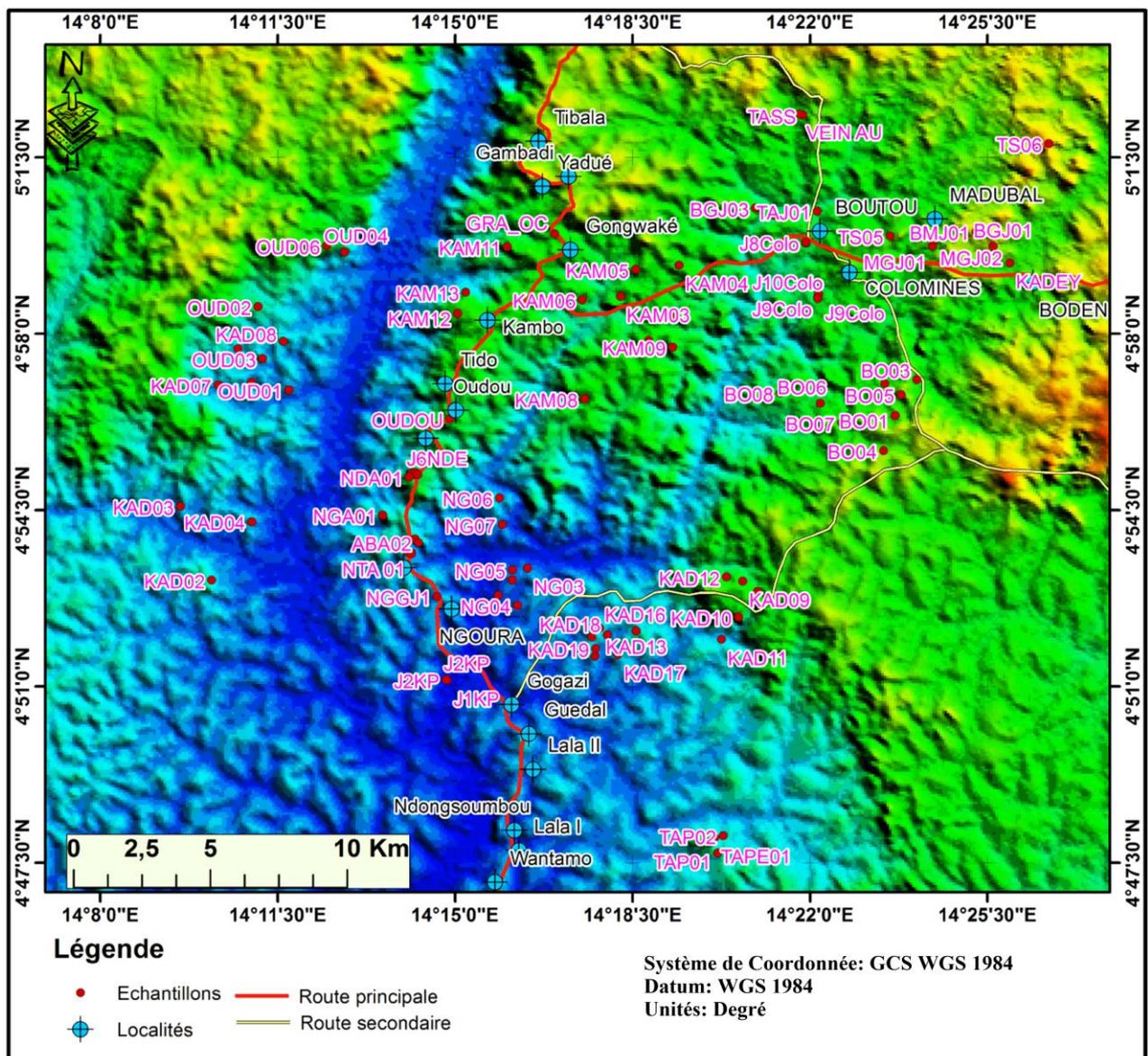


Figure 3.1. Carte d'échantillonnage

### III.1- ENSEMBLE MAGMATIQUE

L'ensemble magmatique est majoritairement représenté à l'affleurement dans la quasi-totalité du secteur d'étude, l'ensemble métamorphique étant observable tantôt en coupe tantôt au travers de petites fenêtres au sein de l'ensemble magmatique. Cet ensemble est constitué principalement de granite, de granodiorite et d'orthogneiss. Le mode d'affleurement est globalement en dômes, en boules et en dalles (Fig. 3.2).



**Figure 3.2.** Principaux modes d'affleurement de l'ensemble magmatique. (a) affleurement en dôme du massif de Ndembara ; (b) et (c) affleurement en boules et en blocs des massifs de Ngoura; (d) affleurement en dalle au sommet d'un dôme du massif de Ngogon Gobou.

#### III.1.1- Granites

Les granites constituent le type pétrographique le plus représentatif de l'ensemble magmatique. Sur la base de la couleur, de la composition minéralogique et de la taille des minéraux, nous avons distingué quatre (04) types principaux: (1) les granites à biotite et à grains grossiers, (2) les granites à biotite et à grains moyens (3) les granites leucocrates à grains grossiers et (4) les granites roses à tendance pegmatitique. Le passage d'un type à l'autre est discontinu.

### **III.1.1.1- Granites à biotite et à grains grossiers**

Les granites à biotite (Ech. KTJ1-2 et MAJ1) affleurent en dômes et en dalles à Ngogon-Goubou, Kpangara-Kadei, Madoubal, Boden et Ndembera (Fig. 3.1). A l'œil nu, la roche est de couleur gris- sombre avec une structure massive et composée de quartz, de biotite et des cristaux (2-3 mm) de feldspath potassique (Fig. 3.3a).

Au microscope, le mode d'agencement des minéraux confère à la roche une texture grenue porphyroïde composée de feldspath potassique, de quartz, de plagioclase, et de biotite (Figs. 3.3b-3f). La phase accessoire est représentée ici par les minéraux opaques et le zircon qui la plupart du temps, est en inclusion dans les autres minéraux. L'on note également la présence des sulfures.

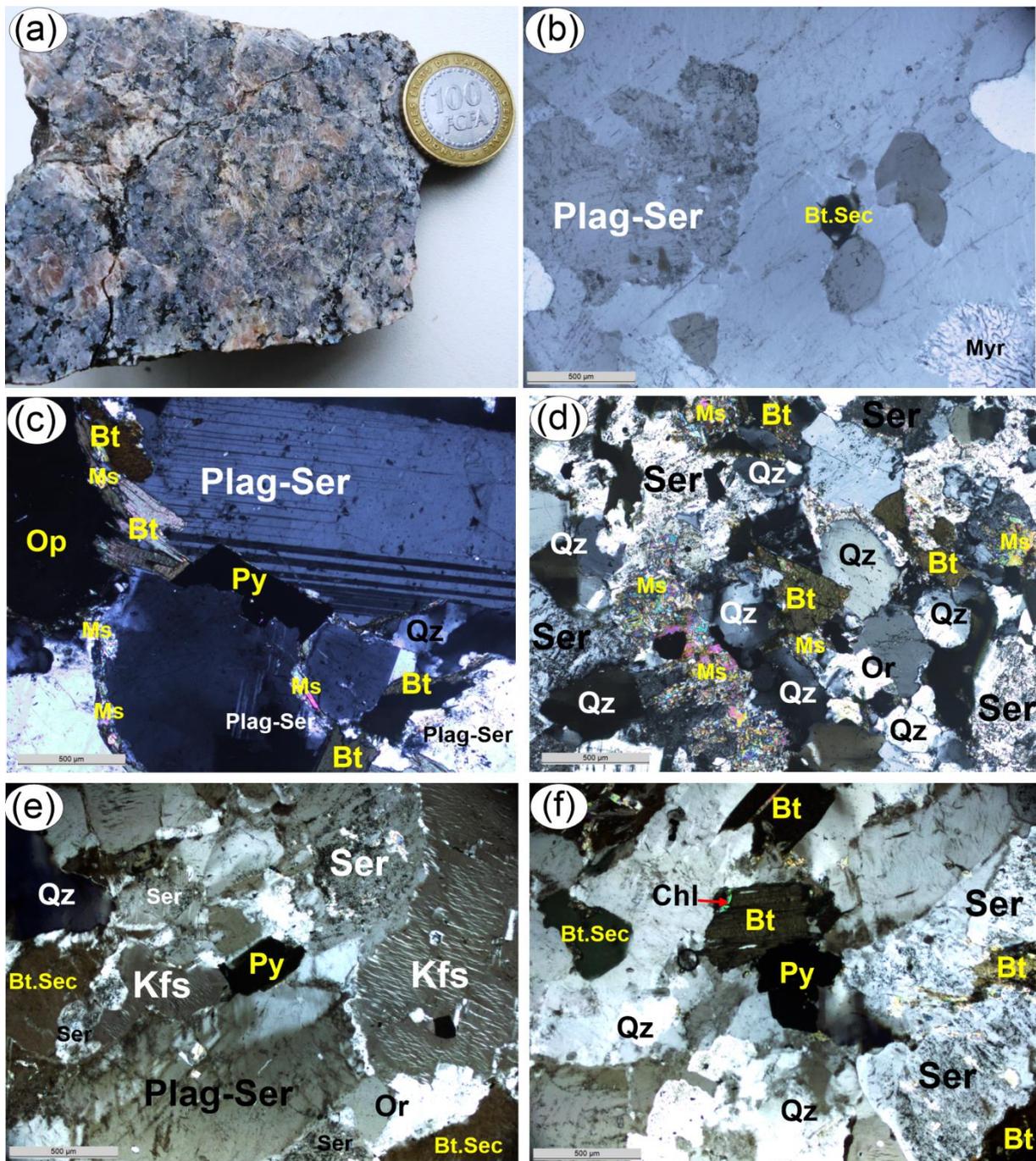
*Le feldspath potassique* (25-30%) est représenté par l'orthose et le microcline. Le microcline étant peu abondant est issu principalement de la transformation de l'orthose. L'orthose se présente sous forme de larges plages sub-automorphes à automorphes de taille variable (comprise entre 1 mm et 3 mm). Certains cristaux de feldspath potassique sont perthitiques (Fig. 3.3e) et parfois myrmékites (Fig. 3.3b). D'autres cristaux (1,5 mm) renferment des inclusions de quartz et d'opaques (Fig. 3.3e). Les cristaux de feldspath potassique sont fréquemment associés aux paillettes de biotite et aux cristaux de plagioclase et de quartz.

*Le quartz* (25-30%) se présente sous la forme de cristaux fins et de phénocristaux. Les phénocristaux sont xénomorphes de taille pouvant atteindre 2,5 mm de grand axe. Ces derniers sont généralement associés aux phénocristaux de feldspaths potassiques. Les fins cristaux de quartz quant à eux sont sous forme de grains sub-automorphes de taille avoisinant 0,7 mm. Ces fins cristaux se rencontrent soit en inclusion dans les cristaux de feldspath soit sous forme de grains dispersés dans la roche ou entre les phénocristaux de la roche.

*Le plagioclase* (15-20%) se présente sous forme de plages sub-automorphes à automorphes. Leur taille est comprise entre 0,5 mm et 3 mm de long. Certains cristaux de plagioclase renferment des inclusions de minéraux opaques et de cristaux de quartz. D'autres par contre montrent un début d'altération en séricite (Figs. 3.3a-f).

*La biotite* (10-15%) est l'unique minéral ferromagnésien de la roche. Elle est sous forme de paillettes qui sont parfois en contact avec les phénocristaux de feldspaths. Certaines paillettes de biotite se transforment en biotite secondaire (Bt. sec) et en minéraux opaques et d'autres renferment des inclusions de cristaux de zircon. La déstabilisation des paillettes de biotite en chlorite est visible par endroits (Fig. 3.3f). Les dimensions des paillettes de biotite

n'excèdent pas 0,5 mm x 0,9 mm. L'association paillettes de biotite - cristaux de feldspath potassique et de quartz est fréquente.



**Figure 3.3.** Caractères pétrographiques des granites à biotite et à grains grossiers de Ngogon-goubou, Kpangara-Kadei, Madoubal, Boden et Ndembera (a) Echantillon de granites à biotite et à grains grossiers de Ngogon-goubou; (b) Notez les myrmékites au bord inférieur; (c-f) Texture grenue porphyroïde avec début d'altération du plagioclase en séricite ; (c) Notez la double macle de Karlsbad et de l'albite du plagioclase ; (e) Phénocristal de feldspath potassique perthitique dans le granite à biotite, notez les inclusions de minéraux opaques et de cristaux de quartz dans les Kfs; (f) Déstabilisation des paillettes de biotite en chlorite et en opaques.

*La muscovite* est en moindre proportion dans la roche ( $\leq 05\%$ ). Ses cristaux se présentent sous forme de paillettes disséminées, parfois en association avec le plagioclase (Figs. 3.3c-d).

*Les minéraux opaques* ( $< 3\%$ ) se présentent sous formes de granules éteintes aussi bien en LPNA qu'en LPA et de dimension millimétrique. Ils sont soit disséminés dans la roche, soit en inclusion dans les paillettes de biotite et les cristaux de feldspath et de quartz. Ils se développent principalement au dépend des paillettes de biotite (Figs. 3.3c-f).

*Le zircon* ( $< 2\%$ ) au même titre que les minéraux opaques fait partie de la phase accessoire de la roche. Il est observé en inclusion dans les paillettes de biotite (Fig. 3.3e).

*Les sulfures* ( $< 1\%$ ) sont aussi présentés dans ce type pétrographique. Un examen en lumière réfléchie a montré qu'il s'agit principalement de la pyrite, dont les cristaux sub-automorphes et automorphes sont en association avec la biotite, le quartz et les feldspaths (Figs. 3.3e-f).

#### **III.1.1.2- Granites à biotite et à grains moyens (Ech. NDA1)**

Ce type pétrographique affleure principalement au lieu-dit Ndembara (Ech. NDA1), sous forme d'un imposant dôme d'échelle kilométrique. C'est donc un batholite au sein duquel des enclaves d'amphibolites et de gneiss sont sporadiquement observées. À l'affleurement, les granites à biotite et à grains moyens sont d'aspect gris rosé, composés du quartz, du feldspath alcalin et de la biotite (Fig. 3.4a).

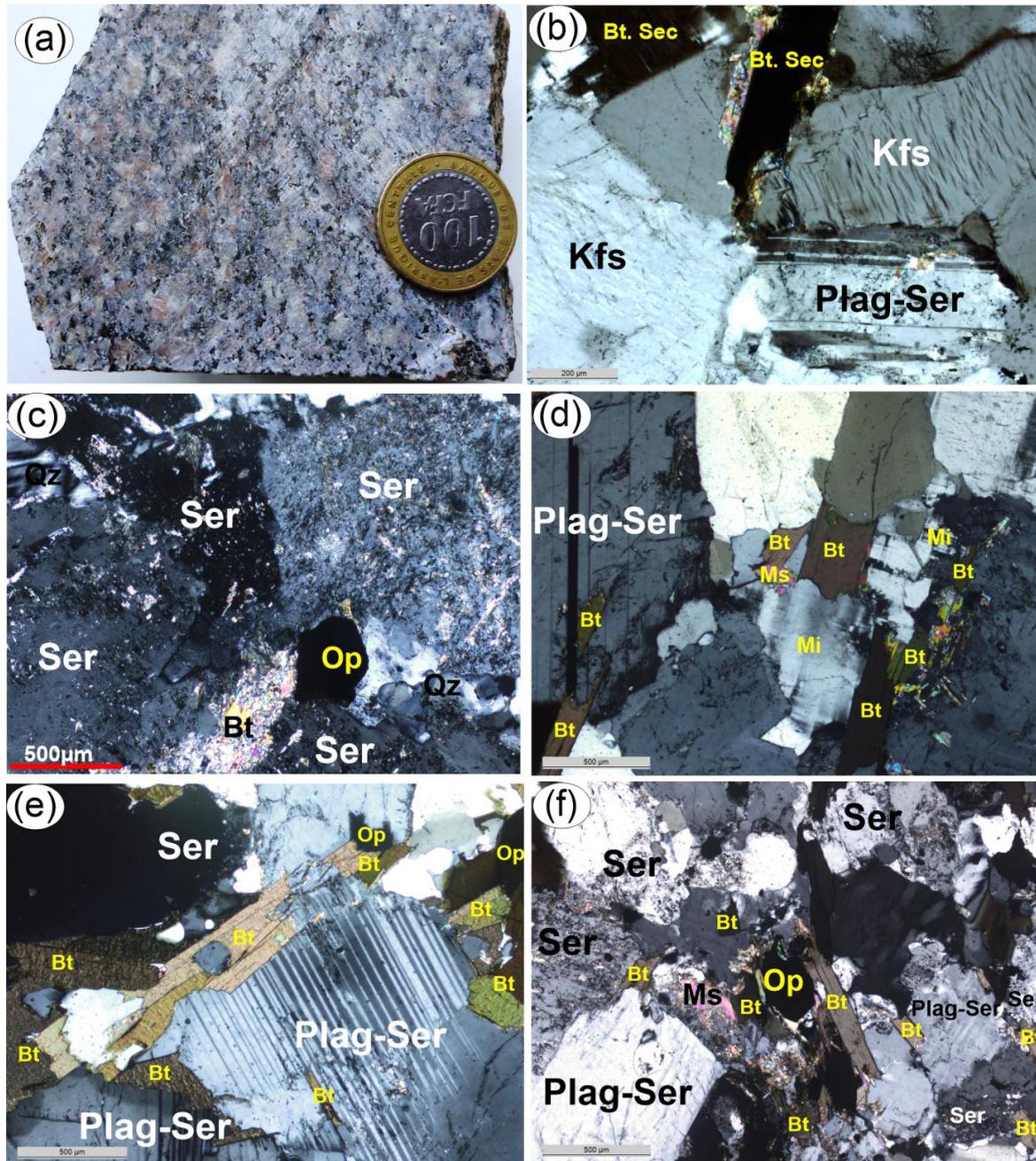
Au microscope, la roche présente une texture grenue composée de quartz, de feldspath potassique, de plagioclase et de biotite. A ces minéraux s'ajoutent le zircon, l'apatite, l'épidote et les minéraux opaques qui forment la phase accessoire.

*Le feldspath potassique* est représenté par l'orthose (25-30%) et le microcline (05-10%). Les cristaux sont sub-automorphes à automorphes et d'aspect trouble, probablement dû à un début d'altération en épidote et séricite. Leur taille est de l'ordre du millimètre. Certains cristaux renferment cependant des inclusions de biotite et de quartz, d'autres présentent des fractures remplies par les paillettes de biotite (Figs. 3.4b-e). Le microcline est formé des individus polycristallins présentant des macles de pericline à quadrillage sub-losangique (Fig. 3.d).

*Le quartz* (10-15%) est incolore et se présente en cristaux xénomorphes de taille variable, comprise entre 0,75 mm et 1,12 mm. Les cristaux de quartz montrent une extinction

roulante et sont associés aux cristaux de feldspath potassique et de biotite. Certains cristaux de quartz s'observent en inclusion dans les cristaux de feldspath potassique.

*Le plagioclase* (10-15%) se présente sous forme de cristaux sub-automorphes de taille millimétrique. Certains cristaux de plagioclase sont antiperthitiques et d'autres par contre montrent un début d'altération en séricite (Figs. 3.4b-f).



**Figure 3.4.** Caractères pétrographiques des granites à biotite et à grains moyens de Ndembara. (a) Echantillon de granite à biotite et à grains moyens; (b-f) Texture grenue avec un début d'altération des plagioclases en séricite ; (b) Notez la double marcle de Karlsbad et de l'albite du plagioclase ; (c) Aspect nuageux de la séricite issue de l'altération des plagioclases ; (d et e) Notez les inclusions de biotite dans les cristaux de plagioclase ; (f) altération des biotites en opaques.

La phase ferromagnésienne est représentée par *la biotite* (20-25%). Cette dernière se présente sous forme de paillettes de taille variable, entre 0,37 et 1,12 mm de long, et fréquemment en association avec les cristaux de feldspaths potassique et de plagioclase. Certaines paillettes de biotite renferment des inclusions de zircon (Figs. 3.4b-f).

*L'apatite* (< 2%) se présente en très petits cristaux automorphes, en inclusion dans les paillettes de biotite (Figs. 3.4b, d, e).

*L'épidote* (< 2%), sous forme de cristaux xénomorphes se rencontrent en inclusions dans les cristaux de feldspath potassique (Figs. 3.4b, d, e).

*Les minéraux opaques* (< 3%) se présentent sous formes de grains xénomorphes, disséminés dans la roche et souvent en inclusion dans les cristaux de feldspaths et les paillettes de biotite (Figs. 3.4c, f).

### **III.1.1.3 - Granites leucocrates à grains grossiers**

Les granites leucocrates à grains grossiers (Ech. TAG1)affleurement en boules aux environs de Tapondo et Madoubal. Ce sont des roches d'aspect blanchâtre à structure grenue porphyroïde (Fig. 3.5a). Les principaux minéraux observés à l'œil nu sont le quartz, le feldspath potassique et la biotite.

En lame mince, la roche présente une texture grenue porphyroïde composée du quartz, plagioclase, feldspath potassique (orthose et microcline) et de la biotite. Les minéraux accessoires présents sont le zircon et les minéraux opaques (Figs. 3.5b-f).

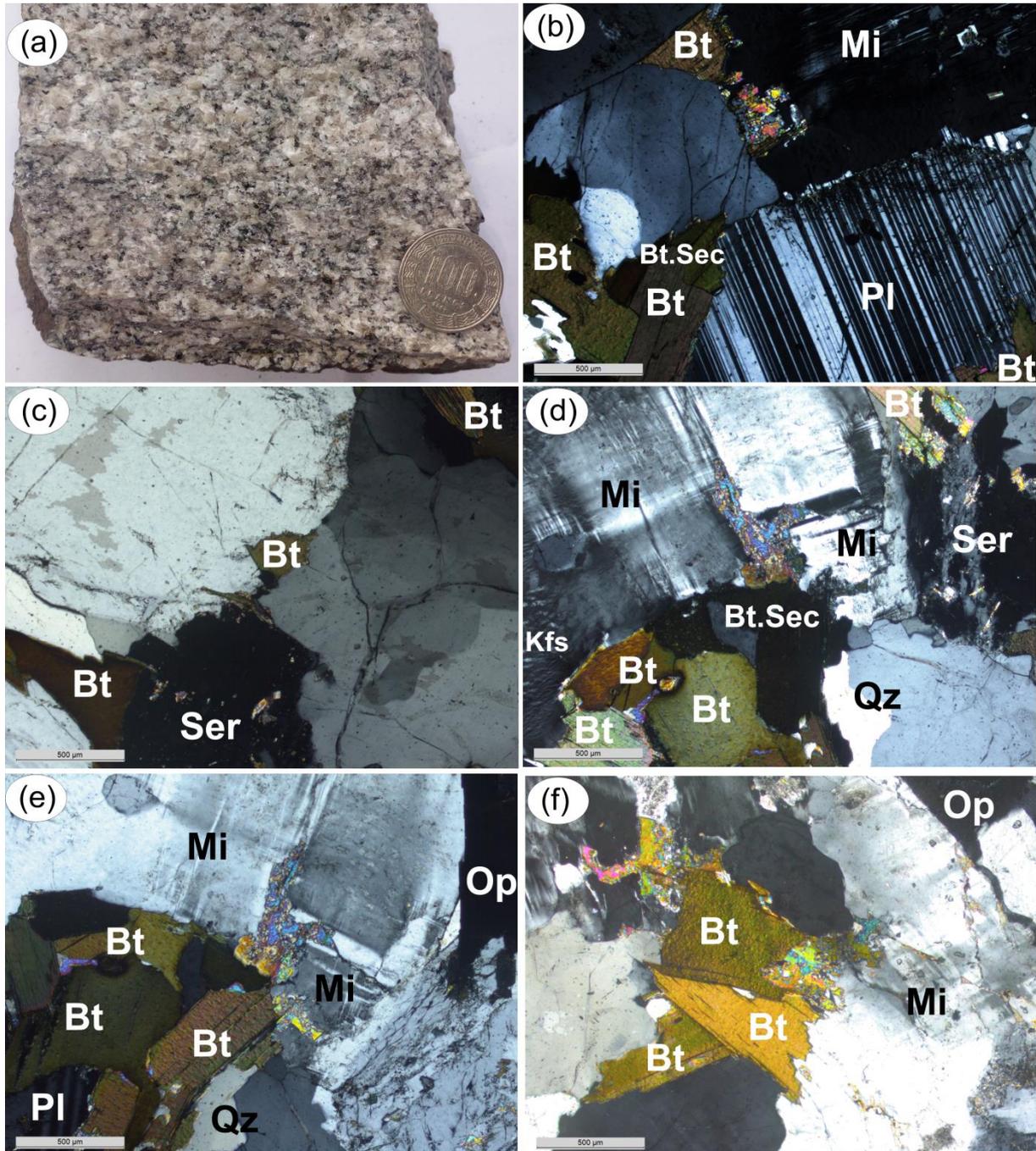
*Le quartz* (30-35%) est sous forme de cristaux poly-cristallins à extinction roulante. Ces cristaux sont sub-automorphes à xénomorphes de dimension variant de 0,4 à 0,6 mm. Ils forment des granulations de bordure autour des mégacristaux de plagioclase et de feldspath potassique.

*Le feldspath potassique* (20-30%) est représenté dans la roche par l'orthose et le microcline. Les cristaux d'orthose sont xénomorphes, parfois avec des golfes de corrosion occupés par le quartz et les opaques. L'orthose est perthitique (Fig. 3.5d-f). Le microcline est plus abondant que l'orthose avec des cristaux sub-automorphes à automorphes. Leur taille est la même que celle de l'orthose et ils renferment des inclusions de zircon (Figs. 3.5b, d-f).

*Le plagioclase* (20-25%) présente des cristaux de forme variable (arrondie, allongée, irrégulière) parfois à contours déchiquetés. Leur taille est très variable et la plupart des cristaux présentent la macle double polysynthétique et de l'albite. Les petits cristaux, de taille de l'ordre du micromètre (5 µm), sont automorphes et sont associés aux granulations de quartz sub-automorphes. Les phénocristaux forment de larges plages millimétriques pouvant

atteindre 3 mm de grand axe. L'altération se traduit par une damouritisation conduisant à la formation des micas (Figs. 3.5b-f).

La biotite (10%) est le principal minéral de la phase ferromagnésienne de la roche. Dans l'ensemble, elle se présente sous forme de lamelles renfermant des inclusions d'opaques (Figs. 3.5b-f).



**Figure 3.5.** Caractères pétrographiques des granites leucocrates à grains grossiers de Tapondo. (a) Echantillon de granite leucocrate de Tapondo; (b-f) Texture grenue porphyroïde, notez la damouritisation conduisant à la formation des micas et la déstabilisation de la biotite en biotite secondaire et en opaques.

*Le zircon* (<1%) se rencontre dans la roche sous forme de cristaux automorphes de forme variée, rencontrés soit sous forme libre, soit en inclusion dans d'autres minéraux (biotite et plagioclase) (Figs. 3.5b-f).

*Les minéraux opaques* sont sous forme de petits cristaux automorphes rencontrés en inclusion dans d'autres minéraux.

#### ***III.1.1.4- Granites roses à tendance pegmatitique***

Les granites roses (Ech. NDJ2) sont remarquables sur le terrain par leur forte coloration rose et leur mode d'affleurement en dômes et en boules (Fig. 3.2a). Ils affleurent dans les localités de Tingou et de Ndembara (Fig. 3.1). À l'affleurement tout comme sur l'échantillon, l'on peut distinguer le feldspath alcalin, très abondant et identifiable par sa couleur rose, du quartz et de la biotite. Tous ces minéraux sont de taille allant de 2 à pratiquement 1cm de long (Fig. 3.6a).

En lame mince, le mode d'agencement des minéraux confère à la roche une texture grenue porphyroïde à tendance pegmatitique. Les minéraux essentiels sont : plagioclase, feldspath potassique, quartz et biotite. Les minéraux opaques forment la phase accessoire tandis que les minéraux secondaires sont représentés par la chlorite.

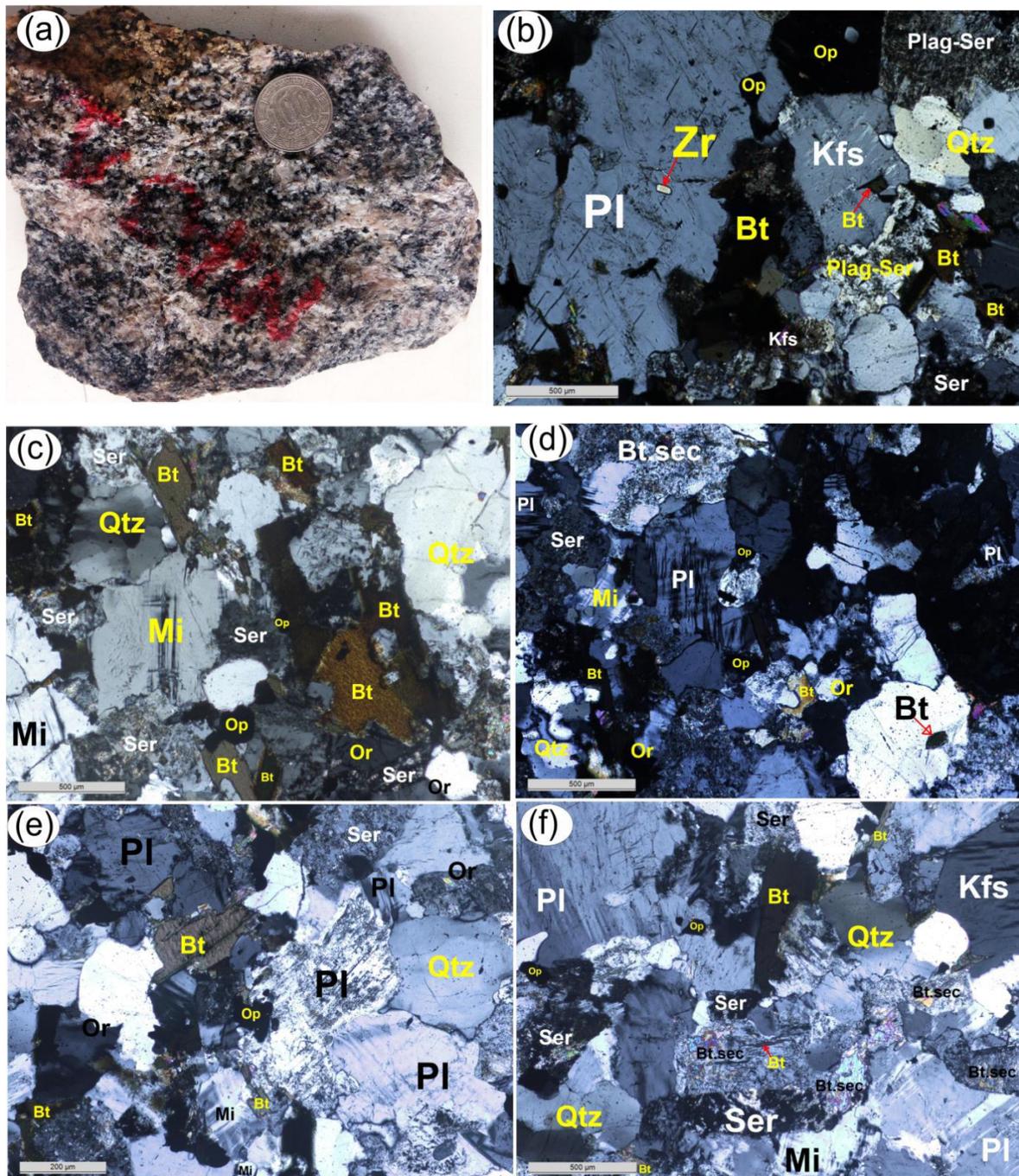
*Le feldspath potassique* (30-35%) est sous forme de cristaux sub-automorphes à automorphes et de taille atteignant 3 mm de long. Les cristaux sont pour la plupart fracturés et montrent par endroit des exsolutions d'albite (perthites) tandis qu'à d'autres endroits, ils montrent des microstructures myrmékitiques. Des inclusions de biotite, de quartz et des minéraux opaques y sont fréquentes (Figs. 3.6b-f).

*Le plagioclase* (20-25%) se présente sous forme de phénocristaux xénomorphes à sub-automorphes de grande taille (>1,6 mm). Certains cristaux de plagioclase sont antiperthitiques et d'autres présentent des micro-fractures (Figs. 3.6b-f).

*Le quartz* (15-20%) se présente sous forme d'individus polycristallins, subautomorphes à xénomorphes et de taille variable (0,5 à 2mm). Les microcristaux se rencontrent soit en inclusion, soit dans les interstices des phénocristaux de feldspaths potassiques.

*La biotite* (10-15%) a une coloration brune. Elle se présente en lamelles allongées avec un clivage régulier. La taille des lamelles est de l'ordre de 0,75 mm. Les lamelles plus petites sont parfois en inclusion dans les cristaux de feldspaths. Certaines lamelles de biotite présentent un début de chloritisation au niveau des plans de clivages et montre une coloration verdâtre (Figs. 3.6b-e).

Les minéraux opaques (5%) se présentent généralement sous forme de granules éparses dans la roche.



**Figure 3.6.** Caractères pétrographiques des granites roses à tendance pegmatitique de Tingou et Ndembara. (a) Echantillon de granite rose à tendance pegmatitique; (b) Inclusion de zircon dans les plagioclases et déstabilisation de la biotite en biotite secondaire et en opaques; (c) Sericitisation avancée des plagioclases; (d) Inclusion des biotites dans les cristaux de feldspaths et début de la chloritisation au niveau des plans de clivages; (e) Clivages réguliers des sections de biotite; (f) exsolutions d'albite en perthites et cristaux de plagioclase antiperthitiques.

### III.1.2- Granodiorite (*Ech. BOJI*)

Les granodiorites affleurent soit en dôme, soit en bloc aux lieux-dits Yangosso et Ngoura et à proximité de l’affleurement de Ndembara. La roche est grenue et finement cristallisée, voisine des granites. Elle est néanmoins plus sombre que le granite conventionnel.

À l’affleurement, la roche est de couleur gris claire. Les minéraux visibles sont : feldspath, quartz et biotite (*Fig. 3.7a*).

Au microscope, la roche présente une microstructure grenue composée de plagioclase, de feldspath potassique, de microcline, de biotite et de quartz (*Figs. 3.7b-f*). A ces minéraux essentiels s’ajoutent le zircon et les minéraux opaques représentant la phase accessoire.

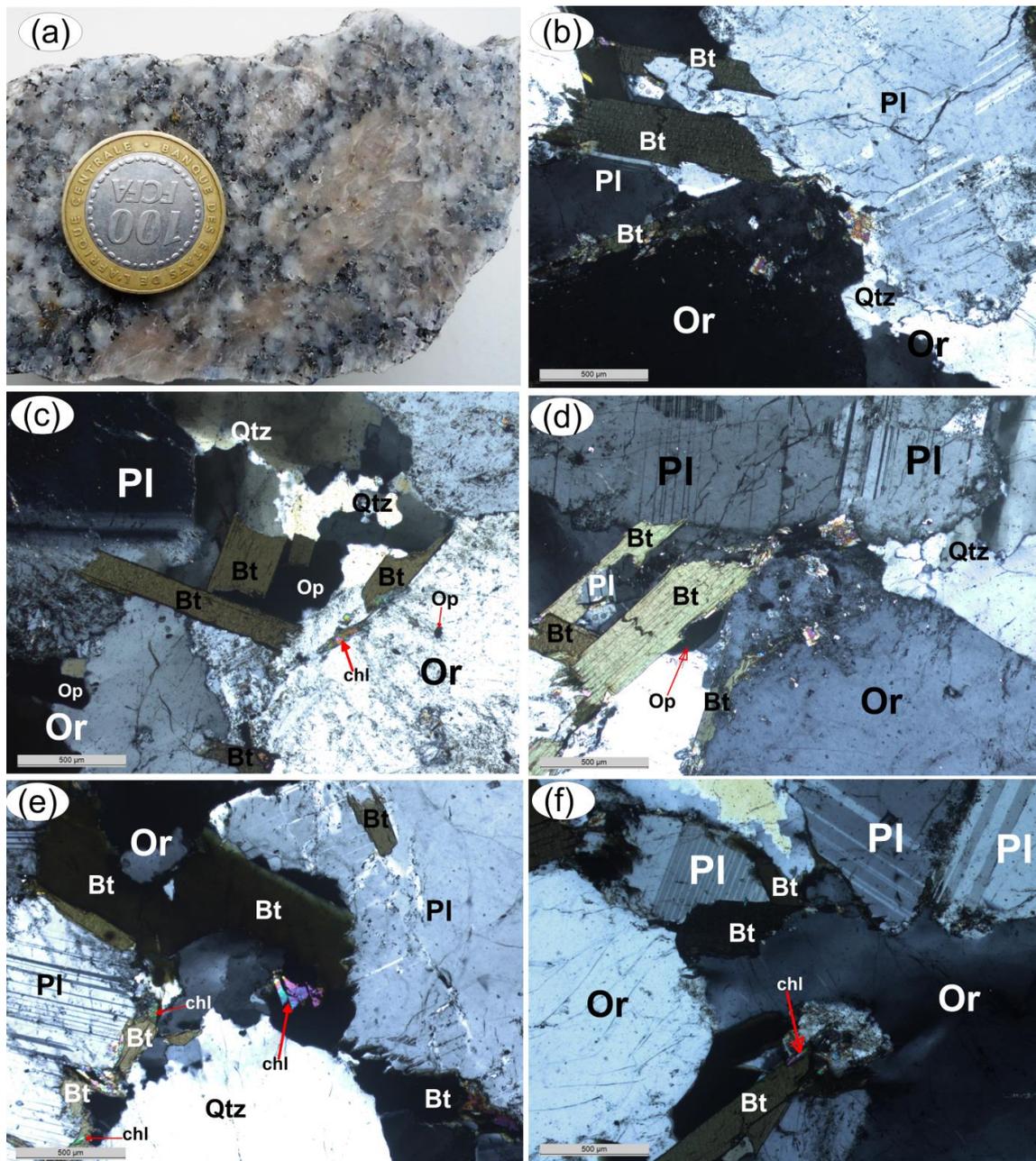
*Le plagioclase* (25-35%) se présente sous forme de cristaux sub-automorphes de taille variable comprise entre 1 x 0,5 mm et 1,25 x 1,8 mm. Ces cristaux de plagioclase sont associés aux cristaux de feldspath potassique et de biotite (*Figs. 3.7b-f*). Ces cristaux présentent parfois un début d’altération en damourite (*Fig. 3.7b*).

*Le feldspath potassique* (15-25%) se présente sous forme de larges plages sub-automorphes à automorphes, associés au quartz. Les plus gros atteignent parfois 1,5 mm de long et dépassent parfois 0,93 mm de petit axe. Certains cristaux de feldspaths potassiques renferment des inclusions de minéraux opaques (*Fig. 3.7c*).

*Le quartz* (10-20%) se présente sous forme de cristaux polycristallins, sub-automorphes à xénomorphes de taille pouvant atteindre 1,6 mm de grand axe. les grands cristaux de quartz sont fréquemment associés aux plages de feldspaths, tandis que les petits cristaux sub-automorphes sont souvent regroupés autour des cristaux de plagioclase. Ils sont pour la plupart à extinction roulante (*Figs. 3.7c*).

*La biotite* (10-15%) se présente en lamelles automorphes et sub-automorphes de dimensions supérieures à 0,93 mm x 0,5 mm. Les lamelles de biotite sont dispersées dans la roche et sont fréquemment associées aux cristaux de quartz, de feldspath alcalin et de plagioclase. Certaines lamelles sont altérées en biotite secondaire et en chlorite (*Figs. 3.7c-e*).

*Les minéraux opaques* (5%) sont de petits cristaux automorphes en inclusion dans les autres minéraux (biotite, plagioclase) ou dispersés dans la matrice (*Fig. 3.7d*).



**Figure 3.7.** Caractères pétrographiques des granodiorites de Yangosso, Ngoura et de Ndembara. (a) Echantillon de granodiorite de Ndembara; (b-f) Microstructure grenue; (b) Damouritisation des plagioclases; (c) Biotite et opaques en inclusion dans l'orthose; (d) Plagioclases et biotites fracturés; (e) Biotites en inclusion dans les plagioclases; (f) Chloritisation des biotites.

### III.2- ENSEMBLE MÉTAMORPHIQUE

L'ensemble métamorphique est moins représenté dans notre secteur. Elles affleurent en dômes, en boules et en dalles et parfois en enclave et/ou de lentille. Deux principaux types pétrographiques constituent cet ensemble à savoir les gneiss à biotite et à amphibole et les amphibolites.

### III.2.1- Gneiss à biotite et à amphibole

Les gneiss à biotite et à amphibole affleurent en dômes, en boules et en dalles et parfois en enclaves dans les massifs granitiques de Ngogon-goubou et de Ndembara (Fig. 3.8a). A l'affleurement, la roche est d'aspect gris sombre. Les minéraux visibles à l'œil nu sont le quartz, les feldspaths et les ferromagnésiens, notamment la biotite et l'amphibole.

En lame mince, le mode d'agencement des minéraux confère à la roche une microstructure granoblastique hétérogranulaire constituée de: feldspath potassique, quartz, plagioclase, biotite et amphibole. La phase accessoire est constituée de zircon et de minéraux opaques (Fig. 3.8b).

*Le quartz* est sous forme de rubans xénomorphes de taille variable, associés au feldspath potassique et au plagioclase (Figs. 3.8b-d).

*Le feldspath potassique* se présente sous forme de porphyroblastes sub-automorphes et xénomorphes. Certains cristaux sont moulés par les paillettes de biotite ou sont en contact avec les prismes d'amphibole (Fig. 3.8c).

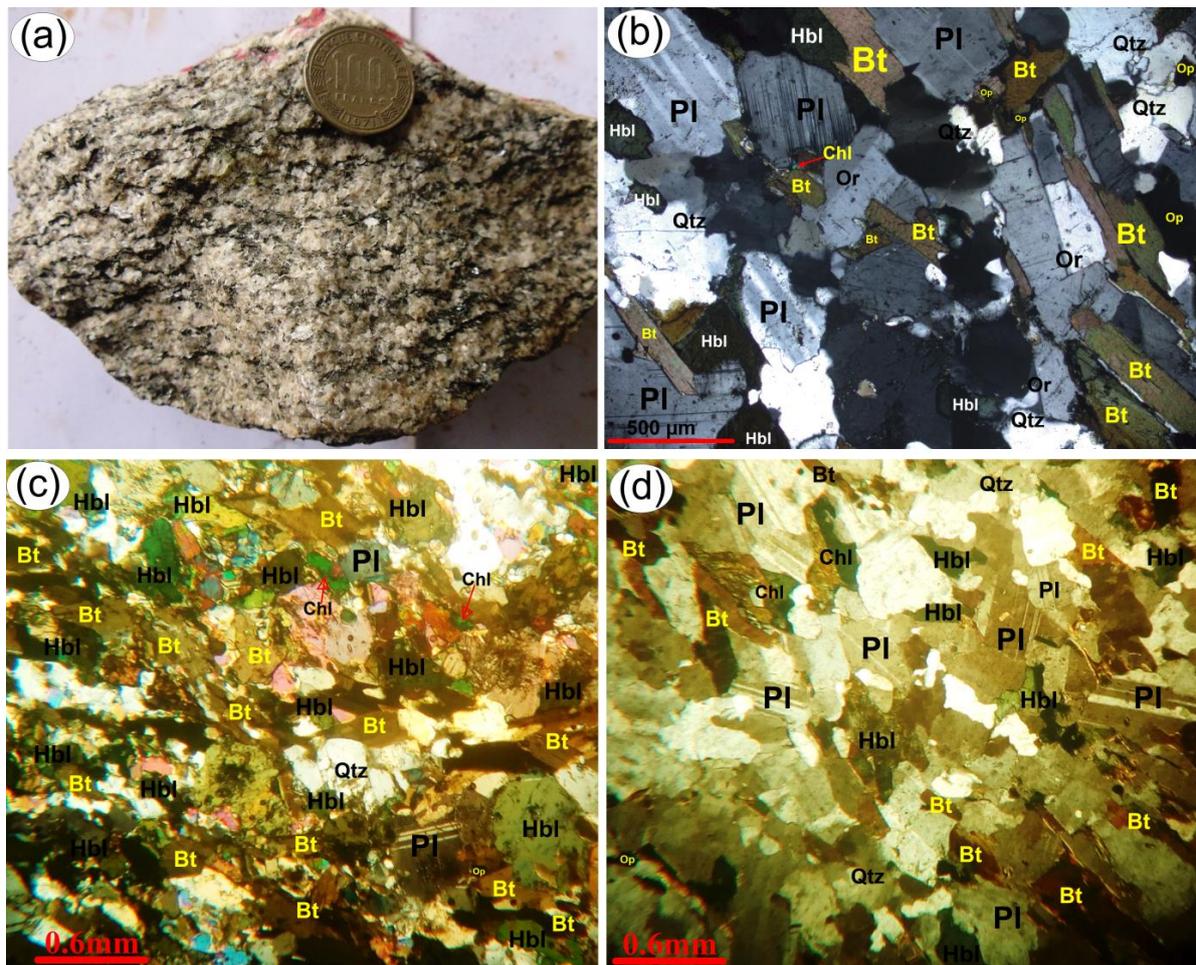
*Le plagioclase* se présente sous forme de cristaux sub-automorphes de taille variable pouvant atteindre 0,7 x 1 mm. Les cristaux de plagioclase montrent par endroit des microfractures, un début d'altération et renferment des inclusions de lamelles de biotite, de cristaux de quartz et de minéraux opaques (Figs. 3.8b-d). Certains cristaux de plagioclase sont en association avec les paillettes de biotite, les cristaux d'amphibole et de feldspath potassique.

*La biotite* est sous forme de lamelles allongées de taille pouvant atteindre 1,5 mm de grand axe. Ces lamelles sont enchevêtrées entre elles ou associées aux cristaux de hornblende pour former les niveaux ferromagnésiens. Les lamelles de biotite renferment aussi des inclusions de cristaux de zircon et de minéraux opaques. Certains cristaux moulent les phénocristaux de feldspath, quartz et de plagioclase. D'autres paillettes de biotite présentent un début de chloritisation (Figs. 3.8c-d).

*L'amphibole* représente avec la biotite les minéraux ferromagnésiens de la roche. Il se présente sous forme de cristaux xénomorphes orientés. La taille des cristaux est comprise entre 0,5 et 1,12 mm de long. L'amphibole ici est la hornblende verte. Les porphyroblastes d'amphibole renferment des inclusions d'opaques et sont souvent associées aux lamelles de biotite et aux cristaux de feldspath. Certains cristaux d'amphibole se déstabilisent en biotite et en opaques (Figs. 3.8c-d).

*La chlorite* est en lamelles verdâtres, issues de la déstabilisation de certaines paillettes de biotite (Figs. 3.8c-d).

Les minéraux opaques se présentent sous forme de cristaux xénomorphes issus de la déstabilisation des autres minéraux.



**Figure 3.8.** Caractères pétrographiques des gneiss à biotite et à amphibole de Ngogon-goubou et de Ndembara. (a) Echantillon de gneiss à biotite de Ngogon-goubou; (b-d) Microstructure granoblastique hétérogranulaire; (b) Litage compositionnel constitué de plagioclases, amphibole et biotites; (c) Chloritisation des biotites; (d) Orientation des biotites, amphiboles et feldspaths.

### III.2.2- Amphibolites

Les amphibolites (Ech. TAA1) affleurent sous forme d'enclaves (Fig. 3.9a) dans les massifs granitiques de Ndembara et de Ngogon-goubou. La roche est d'aspect sombre à grains fins à moyens (Fig. 3.9b).

Au microscope, la microstructure observée est granoblastique hétérogranulaire (Figs. 3.9c-f) composée d'amphibole, de plagioclase, de biotite, de chlorite et de quartz. Les minéraux opaques, le zircon et le sphène forment la phase accessoire.

Le plagioclase est le minéral le plus représenté dans la roche. Il se présente sous forme de cristaux sub-automorphes de dimension moyenne 0,5 mm de grand axe. Le

plagioclase est en association fréquente avec les cristaux d'amphibole. Certains cristaux de plagioclase renferment des inclusions de minéraux opaques (Figs. 3. 9c-f).

*L'amphibole* est la hornblende verte. Elle se présente sous forme de blastes xénomorphes de taille variable (0,3 x 0,5 mm à 0,75 x 1 mm). Certains cristaux d'amphibole se déstabilisent en biotite et en minéraux opaques (Figs. 3. 9c-f).

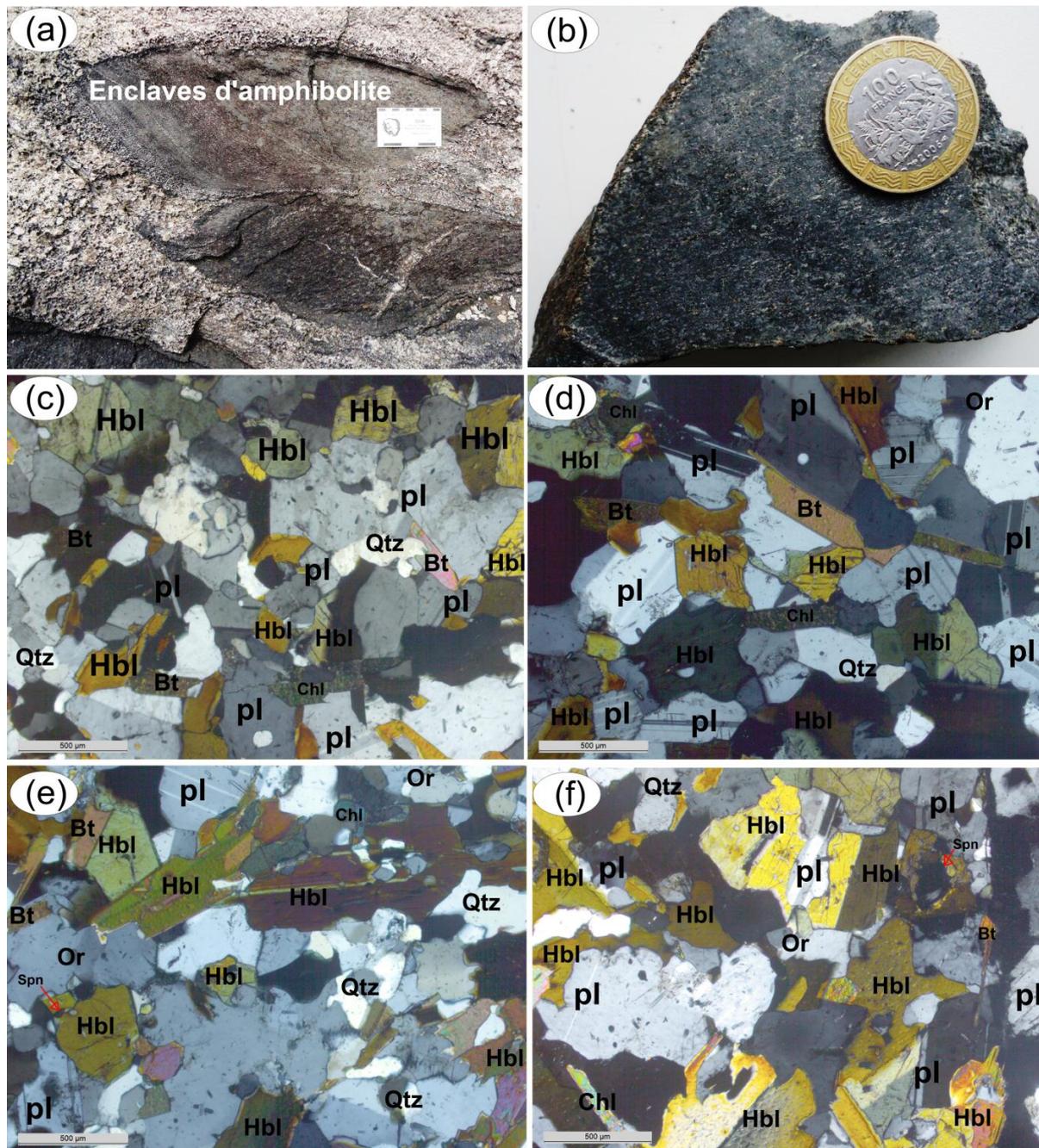
*La biotite* est généralement sous forme de paillettes effilochées et orientées. Certaines de ces paillettes sont en contact avec les cristaux de feldspath potassique et de plagioclase, tandis que d'autres présentent des micro-fractures, et aussi un début de chloritisation (Figs. 3. 9c-f).

*Le feldspath alcalin* est l'orthose. Il se présente sous forme de cristaux xénomorphes de taille moyenne 0,37 x 0,5 mm. Certains cristaux s'associent à ceux de quartz et de plagioclase pour former de minces niveaux (0,5 mm) quartzo-feldspathiques (Figs. 3. 9c-f).

*Le quartz* se présente soit sous forme d'amas polycristallins, soit sous forme de rubans xénomorphes. Par endroit, les cristaux de quartz se rencontrent dans les interstices entre les phenoblastes d'amphibole et de plagioclase.

*Les cristaux de sphène* sont automorphes, de forme losangique et de dimension moyenne 0,05 x 0,12 mm (Fig. 3. 9e). Ces cristaux sont associés aux lamelles de biotite et aux cristaux d'opacités dans les niveaux ferromagnésiens.

*La chlorite* est secondaire dans la roche et se présente sous forme de lamelles xénomorphes, de taille pouvant atteindre 1 mm de long. Elle provient essentiellement de la rétro-morphose de l'amphibole (Figs. 3. 9c-d).



**Figure 3.9.** Caractères pétrographiques des amphibolites de Ngogon-goubou et de Ndembara. (a) Enclave d'amphibolite du massif granitique de Ndembara; (b) Echantillon d'amphibolite, notez l'aspect sombre à grains fins ; (c-f) Microstructure granoblastique hétérogranulaire typique; (c) Déstabilisation des cristaux d'amphibole en biotite secondaire et opaques ; (d) Plagioclase en association avec les cristaux d'amphibole ; (e) Inclusion des cristaux de sphène et de quartz dans les amphiboles; (f) Inclusion des cristaux de plagioclase dans les amphiboles, notez la chloritisation des biotites.

### III.2.3- Mylonites (*Ech. TAG2*)

Les mylonites sont des roches situées à l'interface magmatisme-métamorphisme. Ils présentent une organisation mécanique des minéraux traduisant une déformation plus ou moins prononcée très souvent liée à la mylonitisation. Les roches mylonitisées sont très

représentées dans notre secteur d'étude et en particulier dans les localités de de Madubal, Colomines et de Boden. Elles affleurent en dômes, en boules et en dalles.

On note aussi à Madubal principalement, la présence de bandes métriques d'orthogneiss mylonitisés (jusqu'à 20 m de large) au sein des dalles granitiques décrites au paragraphe III.1 du présent chapitre. Ces bandes sont traversées par des filons aplitiques et pegmatitiques (Figs 3.10a). Ces mylonites se reconnaissent aisément par des minéraux laminés et orientés. La taille du grain est réduite dans l'ensemble, mais quelques porphyroblastes peuvent être observés à l'œil nu. En lame mince, la microstructure est mylonitique (porphyroblastique) et composée d'une matrice riche en petits grains de quartz, des porphyroblastes de feldspath et des lamelles de biotite (Figs 3. 10b-f).

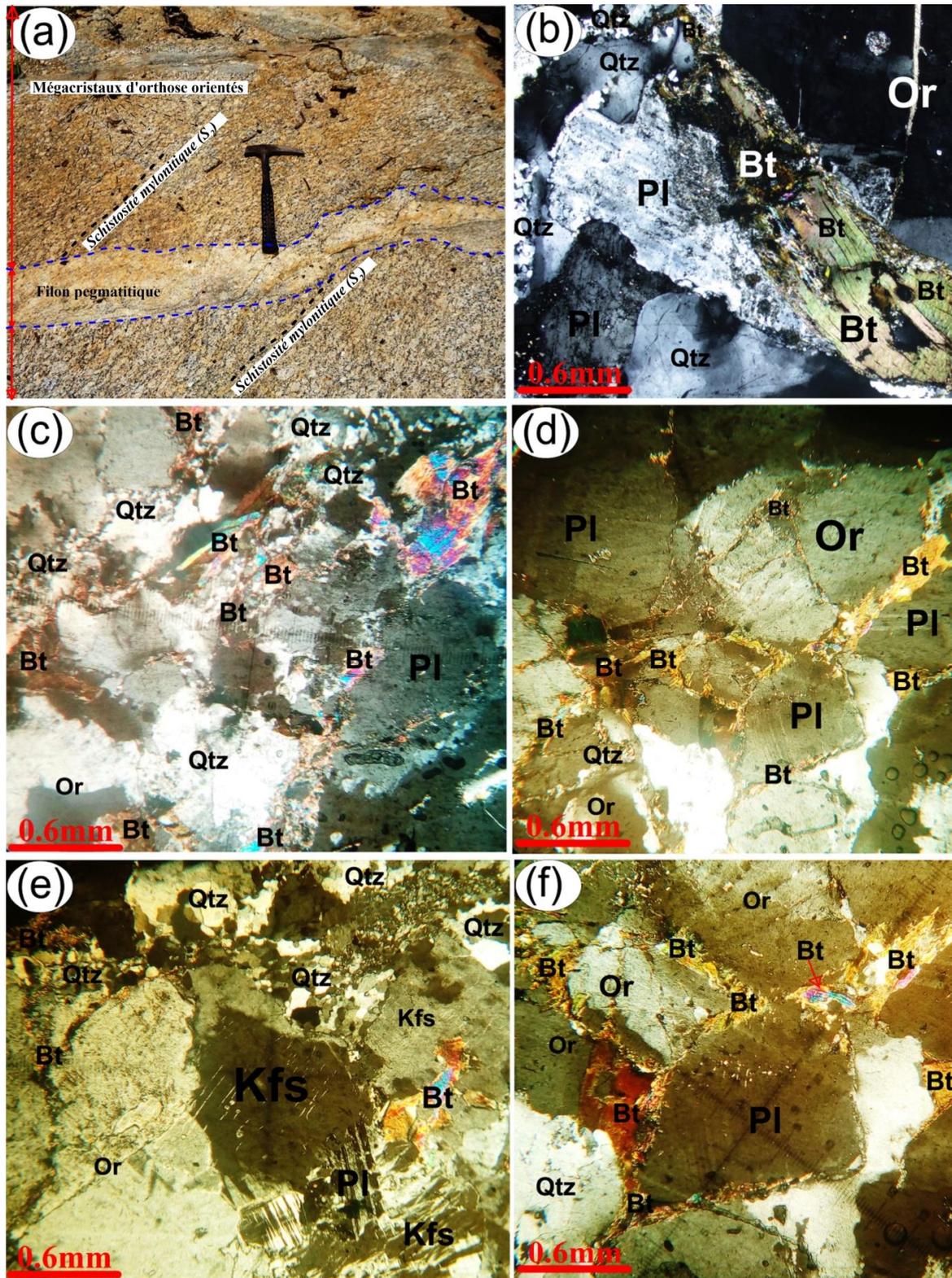
*Le quartz* (25-30%) est sous forme de rubans et d'individus polycristallins. Les cristaux de quartz en rubans sont de dimension variable avec des queues étirées et moulent les porphyroblastes de feldspath potassique et de plagioclase (Fig 3. 10b). Les grands cristaux sont rares tandis que les petits cristaux (sous-grains), très nombreux et forment la matrice dans laquelle baignent les grands cristaux de plagioclase et d'orthose. Ces petits cristaux sont à extinction roulante et leur taille ne dépasse pas 1 mm. Par endroit ces petits cristaux colmatent les fractures des grands cristaux (Figs 3. 10b, c, f).

*Le feldspath potassique* (20-25%) est également sous forme d'individus polycristallins, généralement de forme sigmoïde. Les porphyroblastes (2 x 1 mm) de feldspath sont pour la plupart fracturés et ces fractures sont remplies par la biotite et d'un matériel quartzo-feldspathique à grains plus fins (Figs 3. 10c- f). Les petits blastes s'associent à ceux du quartz pour former la matrice. Le feldspath développe des myrmékites au contact du quartz. Les porphyroblastes d'orthose présentent des zones d'ombre remplies de biotite et des sous grains de quartz. D'autres cristaux sont intensément altérés et fracturés et ces fractures sont colmatées par la biotite, le quartz et les opaques (Figs 3. 10c- f).

*Le plagioclase* (20-25%) est représenté dans la roche par des porphyroblastes (3 x 2 mm) noyées dans une matrice fine formée de petits cristaux de quartz et de feldspath potassique. Certaines porphyroblastes de plagioclase sont antiperthitiques. D'autres forment une mosaïque hétérogranulaire séparée par des grains très fins de nature quartzo-feldspathique.

*Les cristaux de biotite* (10-15%) sont sous forme de *mica-fish* et de lamelles étirées, fracturées, plissées et soulignent la schistosité mylonitique ( $S_m$ ) (Figs 3. 10c- f). Cette  $S_m$  moule par endroit les porphyroblastes de feldspath, quartz et de plagioclase. Les blastes de biotite renferment des inclusions de zircon et d'opaques automorphes (Fig 3. 10b).

Le zircon et les minéraux opaques (5%) représentent la phase accessoire. Ces deux minéraux sont fréquemment rencontrés en inclusion dans la biotite (Figs 3. 10b-c).



**Figure 3. 10.** Caractères pétrographiques des orthogneiss de Madubal, Colomines et de Boden. (a) Bande d'orthogneiss de Colomines, notez les porphyroblastes d'orthose orientés; (b-f) Notez la microstructure mylonitique (porphyroblastique); (b) Biotite étirée, plisotée et fracturée; (c) Quartz à queues étirées moulant les porphyroblastes de feldspath potassique; (c

et e) Petits cristaux (sous-grains) de quartz soulignant la granulation de bordure des porphyroblastes de feldspaths; (d et f) Porphyroblastes de feldspaths oeilés enveloppés par des biotites.

### **III.3- ENSEMBLE DES ROCHES FILONIENNES**

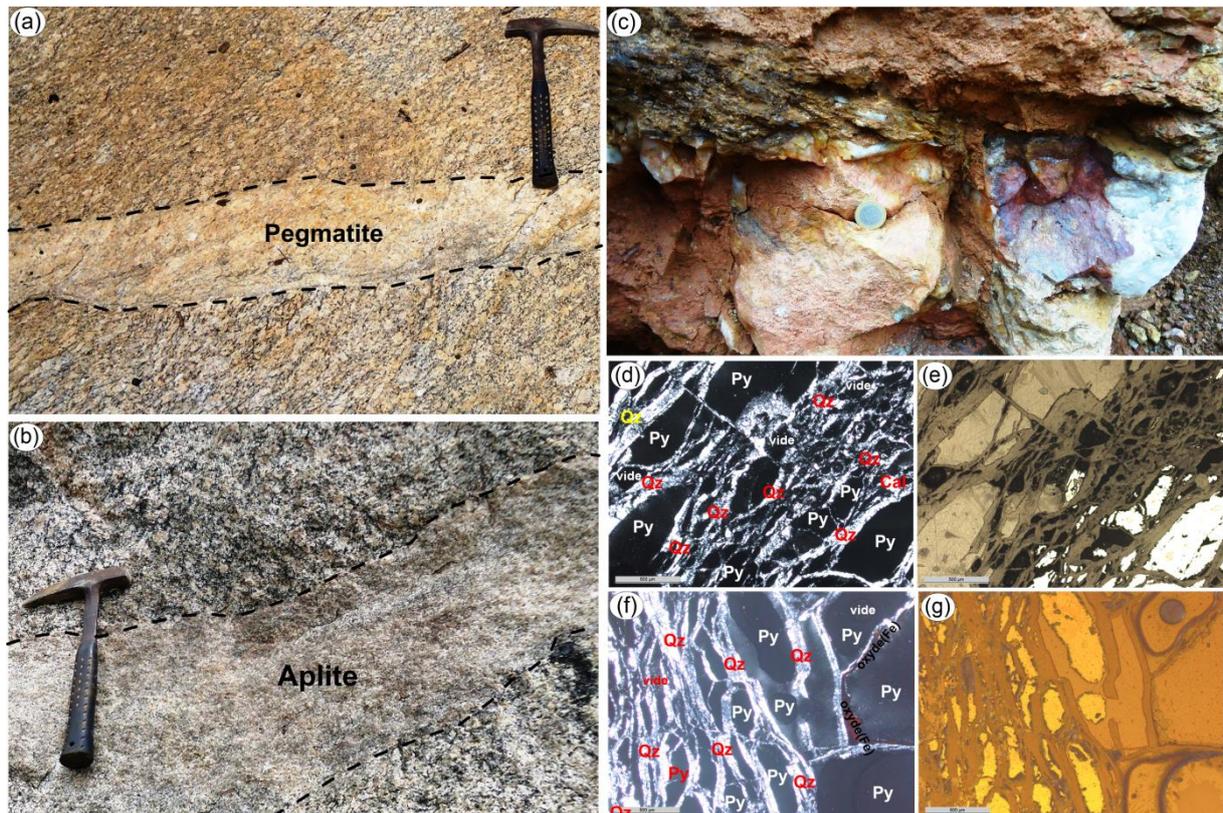
Les roches filoniennes recoupent les deux ensembles précédemment décrits et peuvent être concordantes ou discordantes sur la structure de l'encaissant. Elles sont représentées soit par des pegmatites (Fig. 3.11a), soit par des aplites (Fig. 3.11b), soit par des veines de quartz (Fig. 3.11c). Certaines de ces veines sont aurifères.

#### **III.3.1- Filons de pegmatite et d'aplite**

Les filons de pegmatite et d'aplite sont observés dans les orthogneiss et les granites, les aplites étant les plus répandues. Les pegmatites sont à grains grossiers (> 1 cm) et constituées principalement des phénocristaux de feldspaths et de micas (biotite et muscovite) (Fig. 3.11a). Elles ont été principalement identifiées à Madubal au NE de Ngoura. Les aplites sont à grains fins (< 2 mm) et de largeur moyenne d'environ 8 à 15 cm. Leur minéralogie est dominée par la calcite, le quartz, le feldspath, les oxydes et sulfures de fer (Fig. 3.11a).

#### **III.3.2- Veines de quartz**

Les veines de quartz (Fig. 3.11c) sont les roches filoniennes les plus abondantes de notre zone d'étude. Elles s'observent dans presque tous les types pétrographiques. Dans l'ensemble leur épaisseur est centimétrique, rarement métrique. Dans le massif de Ndembara, les veines de quartz peuvent atteindre plusieurs mètres de long, et sont soit concordantes, soit discordantes sur la direction générale du massif. Dans les zones mylonitiques, les veines de quartz sont boudinées et se présentent sous forme de lentilles. La roche est blanchâtre, fracturée, à structure alvéolaire et composée du quartz, de la pyrite, de la calcite et des oxydes de fer. En lame mince (Figs 3.11d-f), l'on observe principalement le quartz automorphe, la pyrite, la calcite, les oxydes de fer et les vacuoles, l'ensemble présentant des textures de remplissage.



**Figure 3.11.** Caractères pétrographiques des roches filoniennes de la zone d'étude. (a) Filon de pegmatite dans les orthogneiss; (b) Filon d'aplite dans les orthogneiss; (c) Filon de quartz minéralisé à quartz dominant et calcite; (d et e) Aspect microscopique des filons de quartz minéralisé, notez la fracturation des pyrites et quartz; (f et g) Texture de remplissage, notez les vides restants et les oxydes de fer en bordure des cristaux de quartz.

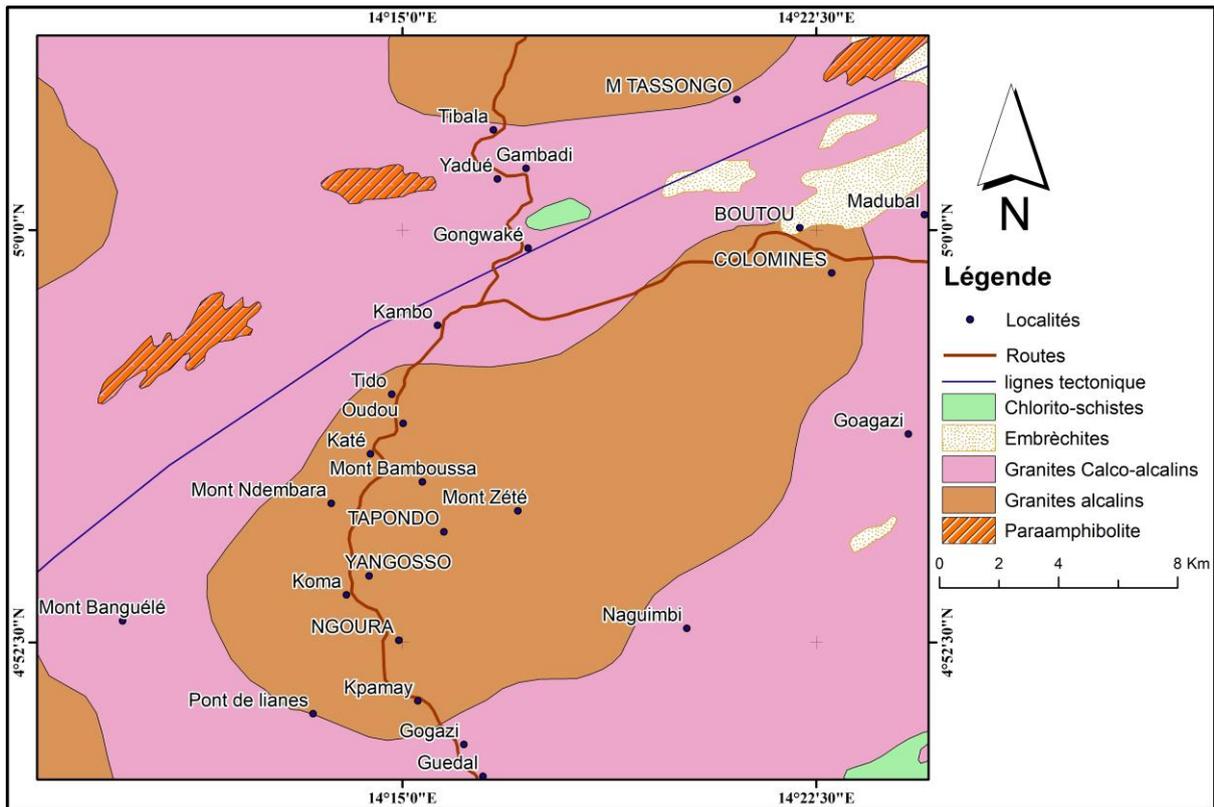


Figure 3.12. Carte géologique de la zone d'étude d'après Gazel et Gerard (1954).

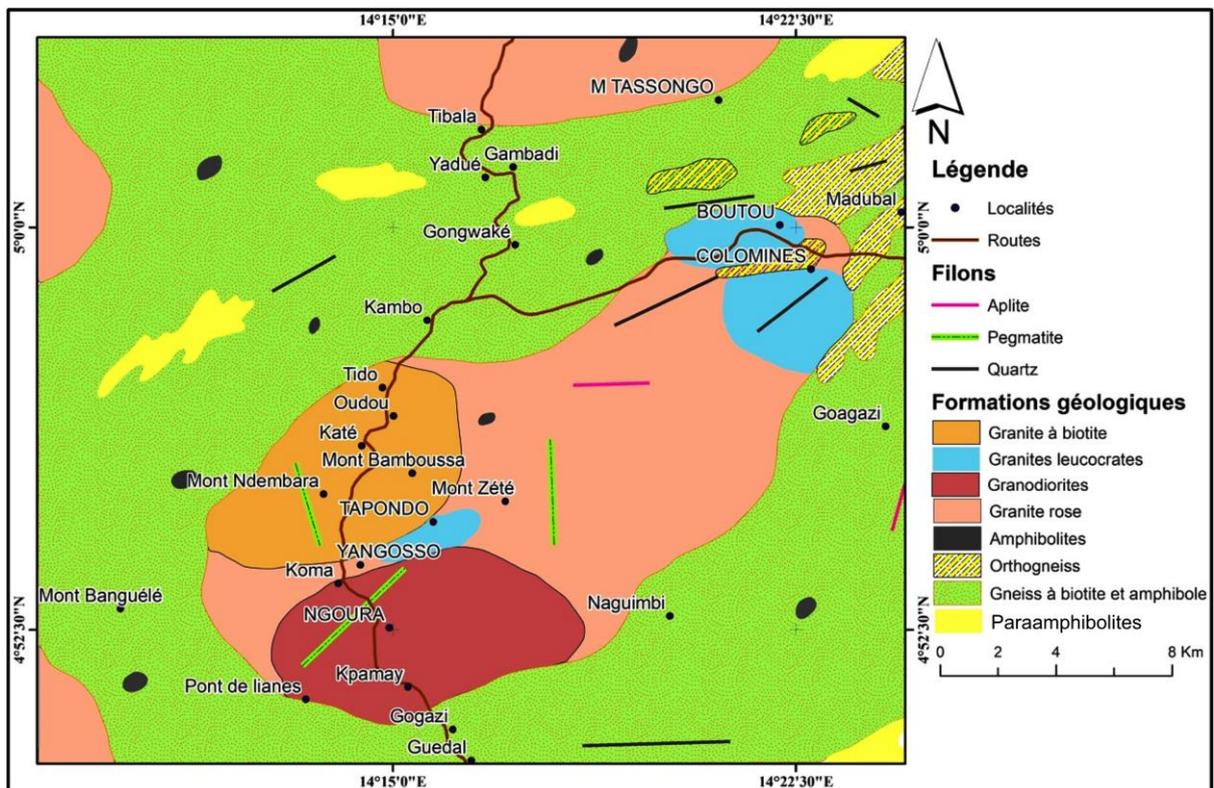


Figure 3.13. Carte géologique de la zone d'étude (modifiée de Gazel et Gerard, 1954)

**Tableau 3.1.** Caractéristiques pétrographiques des formations géologiques du secteur de Ngoura-Colomines

Ensembles lithologiques	Types pétrographiques	Associations minérales	Microstructures	Faciès
<b>Magmatique</b>	Granites à biotite et à grains grossiers	Qtz + Kfs + Pl + Bt	Grenue porphyroïde	/
	Granites à biotite et à grains moyens	Qtz + Kfs + Pl + Bt	Grenue	/
	Granites leucocrates à grains grossiers	Qtz + Kfs + Pl + Bt	Grenue porphyroïde	
	Granites roses à tendance pegmatitique	Qtz + Kfs + Pl + Bt	Grenue porphyroïde	/
	Granodiorite	Qtz + Kfs + Pl + Bt	Grenue	/
<b>Métamorphique</b>	Amphibolite	Hbl + Pl + Qtz + Kfs + Bt ± Chl	Granoblastique hétérogranulaire	Amphibolite
	Gneiss à biotite et amphibole	Qtz + Kfs + Pl + Hbl + Bt ± Spn	Granoblastique hétérogranulaire	Amphibolite
	Mylonites	Qtz + Kfs + Pl + Bt	Mylonitique (porphyroblastique)	/
<b>Roches filoniennes</b>	Pegmatites	Qtz+ Kfs+ Bt+ Ms	Pegmatitique	/
	Aplites	Qtz+ Kfs+ Cal+ Ox-Fe+Py	Aplitique	/
	Veines de quartz	Qtz+Ox-Fe+Py+Au	De remplissage	/

## CONCLUSION

L'étude pétrographique nous a permis d'inventorier les différentes entités lithologiques dont les principales caractéristiques pétrographiques sont résumées dans le [tableau 3.1](#). Les données cartographiques et pétrographiques combinées ont permis la réactualisation de la carte géologique du secteur Ngoura-Colomines ([Figs 3.12 et 3.13](#)).

**CHAPITRE IV.  
ANALYSE DE LA DÉFORMATION  
DANS LES DIFFÉRENTS  
ENSEMBLES LITHOLOGIQUES**

*«Il existe une force motrice plus forte que la vapeur, que l'électricité et que l'énergie atomique: la volonté.»  
- Albert Einstein*

## INTRODUCTION

Le présent chapitre analyse la déformation qui a affectée les formations précambriennes du secteur de Ngoura-Colomines. Cette analyse intègre des observations à différentes échelles notamment aux échelles mégascopique, macroscopique, mésoscopique et microscopique. À l'échelle régionale (mégascopique et macroscopique), nous procéderons à l'analyse morpho-structurale qui permettra de mettre en évidence la relation entre les formes du paysage, la lithologie et les grandes structures géologiques. L'analyse structurale à l'échelle mésoscopique et voire microscopique vise le démêlage et la caractérisation des différents épisodes de déformation dans le secteur d'étude, ceci à travers l'analyse géométrique, cinématique et chronologique détaillée. Les résultats obtenus ainsi que les interprétations qui en découlent, offrent une meilleure compréhension de l'architecture de la région de Ngoura-Colomines en vue de son intégration dans l'évolution tectonique de la CPNE.

### IV.1- ANALYSE MORPHO-STRUCTURALE

L'analyse morpho-structurale intègre l'étude des formes de paysage en tant que résultat du remodelage de la surface terrestre par la géodynamique. Elle fournit une vision immédiate et complète des formes de terrain, favorisant ainsi la compréhension des principales articulations du paysage. C'est dans cette optique que l'approche morpho-structurale est abordée dans ce travail à travers ses volets orographique et hydrographique aussi bien sur les cartes topographiques que sur les images satellitaires.

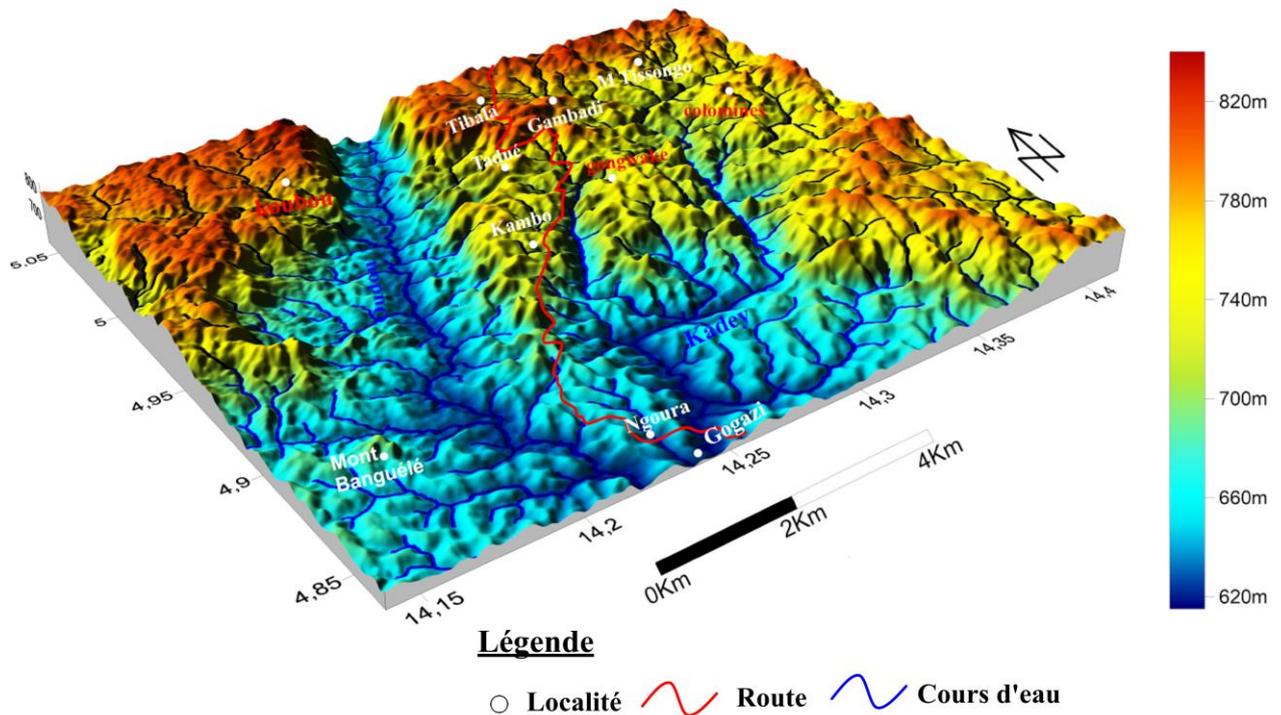
#### IV.1.1- Analyse de la carte topographique

##### IV.1.1.1- Orographie

###### *i) Agencement spatial des reliefs*

Le secteur Ngoura-Colomines fait partie intégrante du vaste ensemble du plateau sud-camerounais. Les observations de terrain ainsi que le modèle numérique de terrain (Fig. 4.1) montrent un moutonnement du relief dont l'altitude oscille entre 620 m et 840 m. La tendance générale est l'abaissement, en pente douce, du relief du Nord vers le Sud. Toutefois, une forte dépression matérialisée par la présence du cours d'eau *Oudou*, entaille le relief du secteur donc la direction globale varie de NNE-SSW à pratiquement N-S sur la bordure SW.

La carte des unités géomorphologiques (Fig. 4.2) couplée à la carte orographique (Fig. 4.3), confirment la présence de reliefs élevés du Nord à la bordure Est, et une dépression qui se prononce de plus en plus du Nord vers le Sud avec la présence des cours d'eau *Oudou* d'orientation moyenne NNE-SSW et *Kadey* de direction NNE-SSW et E-W.



**Figure 4.1.** Modèle numérique de terrain extrait de la carte topographique du secteur Ngoura-Colomines et digitalisée à partir des feuillets topographiques de Batouri et Bétaré-Oya

En effet, les courbes de niveau d'altitude 740 m sont concentriques et régulièrement étalés au Nord et à l'extrémité Est du secteur d'étude. Par contre, les courbes de niveau d'altitude inférieure à 740 m se retrouvent concentrées au S et au SW du secteur d'étude et s'ordonnent quelque fois de manière linéaire suivant la direction NNE-SSW. La succession de reliefs ainsi que l'alternance des formes dans le paysage définissent trois unités morphologiques recouvrant l'ensemble du secteur d'étude (Fig. 4.2). Il s'agit de l'unité haute d'altitude > 776m ; de l'unité intermédiaire d'altitudes comprises entre 698 m et 776 m et de l'unité basse caractérisée par des altitudes inférieures à 698 m.

### *ii) Modelé des reliefs*

Le modelé en plan de la carte orographique de la figure 4.3 révèle que le type de relief prédominant dans le secteur d'étude est la colline. Deux types de colline sont observés. Il s'agit des collines subcirculaires ou en demi-orange et des collines allongées. Les collines subcirculaires sont les plus représentées et sont inégalement réparties de part et d'autre du cours d'eau *Oudou*. Elles sont caractérisées par leur forme circulaire à subcirculaire et présentent un alignement suivant la direction NW-SE. Les collines allongées quant à elles sont uniquement rencontrées du côté de la rive droite du cours d'eau *Oudou* et sont orientées suivant la direction NE-SW. Elles côtoient aussi la *Kadey* dans ses deux rives.

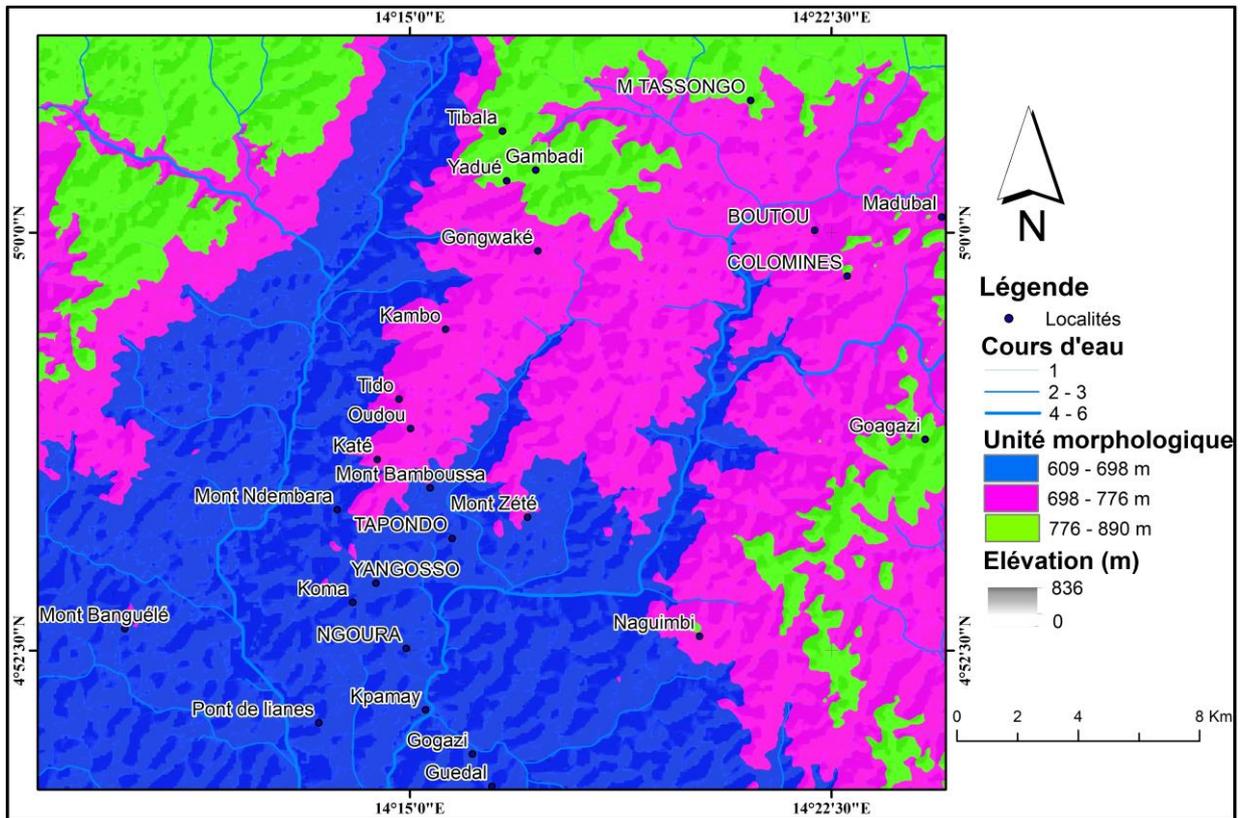


Figure 4.2. Carte des unités géomorphologiques du secteur d'étude, extraite de l'image SRTM.

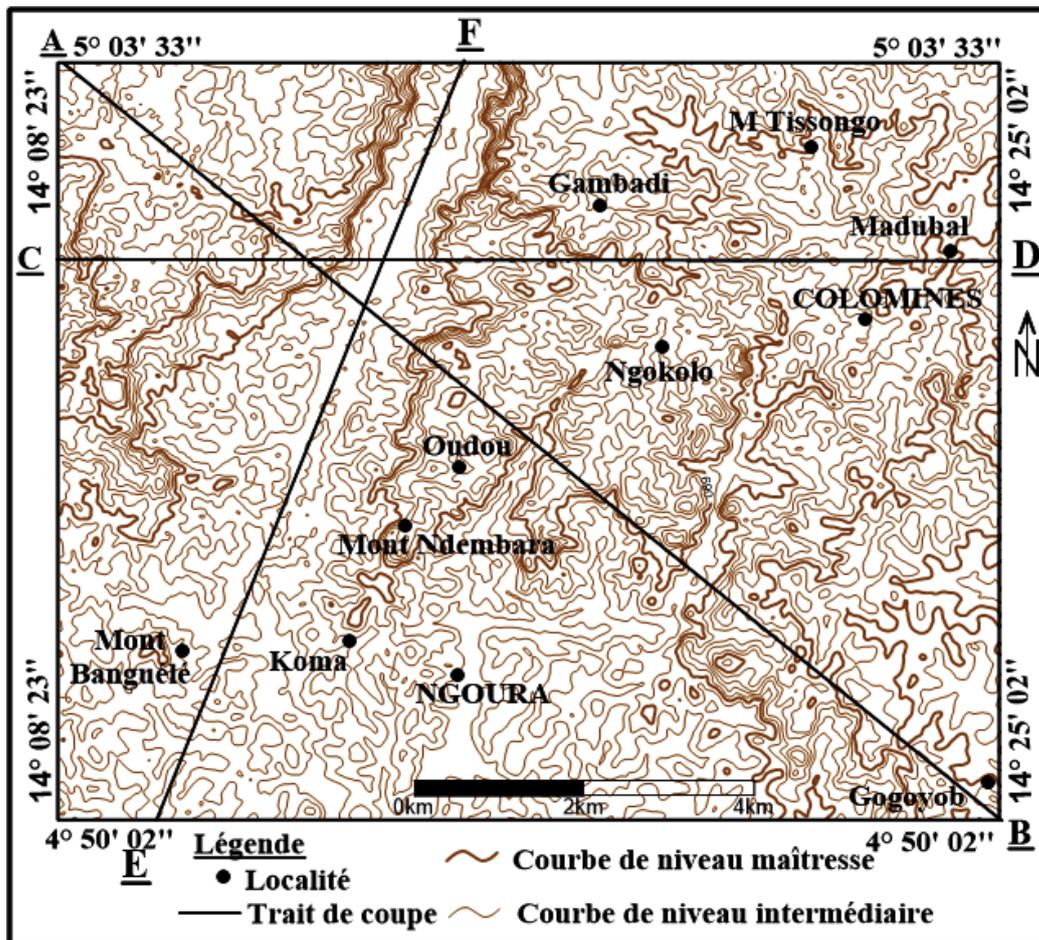
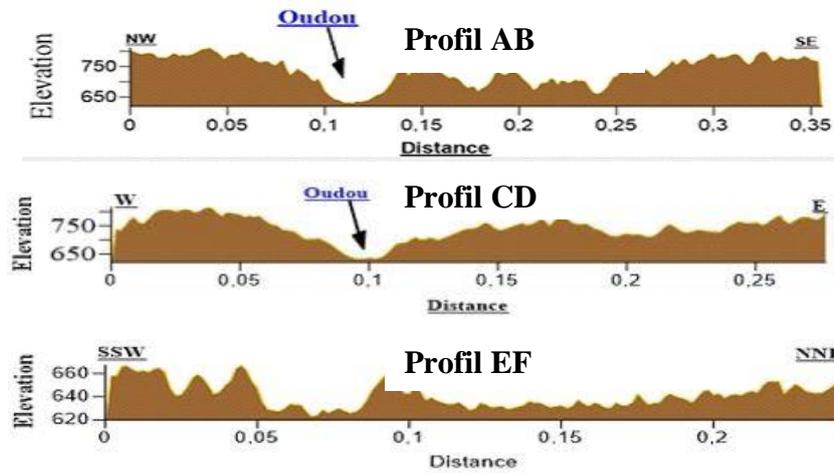


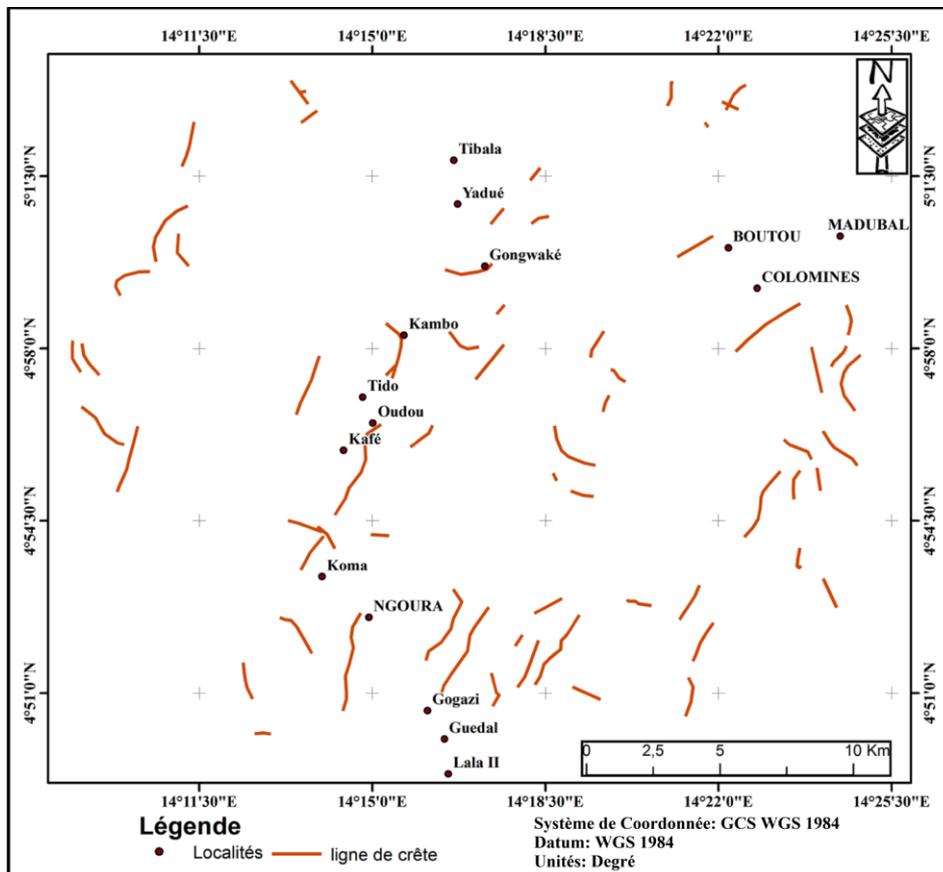
Figure 4.3 : Carte orographique du secteur d'étude, extraite de l'image SRTM

Le modelé en coupe (Fig. 4.4) obtenu à partir de trois traits de coupe (AB, CD et EF) montre des versants à pentes symétriques (collines arrondies) et les versants à pentes dissymétriques (collines allongées).

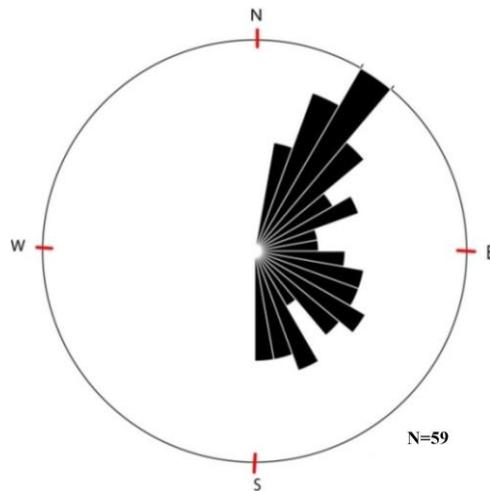


**Figure 4.4.** Profils topographiques suivant les traits de coupe AB, CD, EF (échelle des hauteurs en m et échelle des longueurs en degré)

La succession de reliefs ainsi que l’alternance des formes dans le paysage permettent de tracer des lignes de crête dont les directions préférentielles dans l’ordre d’importance sont NE-SW, NNE-SSW et NW-SE (Figs. 4.5 et 4.6).



**Figure 4.5.** Carte des lignes de crêtes du secteur d’étude



**Figure 4.6.** Rosace directionnelle des lignes de crête

#### ***IV.1.1.2- Hydrographie***

##### *i) Organisation spatiale du réseau hydrographique*

Le réseau hydrographique de la zone d'étude est très dense (Fig.4.7). Une hiérarchisation hydrographique proposée dans le cadre de ce travail permet de quantifier les écoulements régionaux, en se servant de la méthode de [Strehler, 1957](#). En effet, les ordres des cours d'eau sont compris entre 1 et 4 (Fig.4.7). Le collecteur principal est la *Kadey* qui coule dans la partie Sud suivant la direction NNE-SSW à E-W tandis que le second grand cours d'eau *Oudou* coule du Nord vers le Sud du secteur d'étude et sa direction varie de N-S à pratiquement NNE-SSW vers l'extrémité W. En dehors de ces deux cours d'eau majeurs, l'on note une multitude d'affluents d'ordre inférieur qui viennent au contact de ceux-ci soit dans des directions perpendiculaires ou sensiblement parallèles.

Le secteur présente ainsi un réseau hydrographique dendritique à tendance parallèle et perpendiculaire et s'identifie par le caractère curviligne des portions de certains cours d'eau. Les directions d'écoulement sub-mentionnées ont été déterminées à partir des azimuts des linéaments hydrographiques traités sur ordinateur (Fig. 4.8). Il ressort de cette approche graphique que les directions d'écoulement des cours diffèrent en fonction des ordres.

##### *ii) Modelé des cours d'eau*

La figure 4.9 présente les linéaments hydrographiques déduits de la carte hiérarchisée du réseau hydrographique du secteur d'étude. Une étude statistique des cours d'eau d'ordres 1, 2 et 3 ainsi que des linéaments hydrographiques a permis d'établir leurs différentes rosaces (Fig. 4.10) afin d'en évaluer l'effectif et la fréquence de chaque cours d'eau ainsi que leurs directions majeures, moyennes et mineures (Tab. 4.1). Les cours d'eau d'ordre 1 présentent

deux directions préférentielles à savoir ENE-WSW et NNW-SSE. Les cours d'eau d'ordre 2 présentent également deux directions préférentielles qui sont WNW-ESE et NNE-SSW. Enfin, les cours d'eau d'ordre 3 présentent une direction préférentielle qui est NNE-SSW.

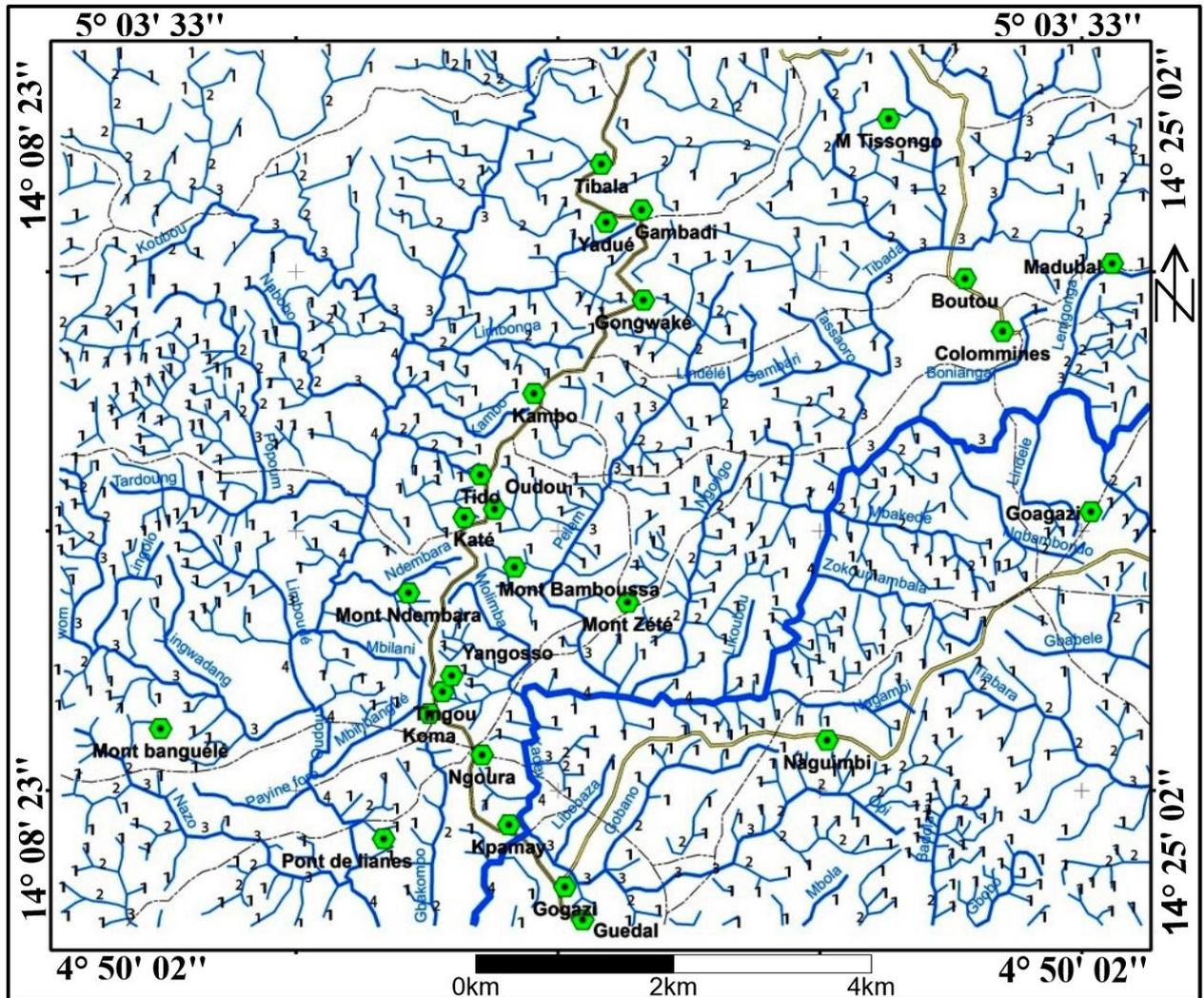


Figure 4.7. Carte du réseau hydrographique hiérarchisée dans le secteur exploré

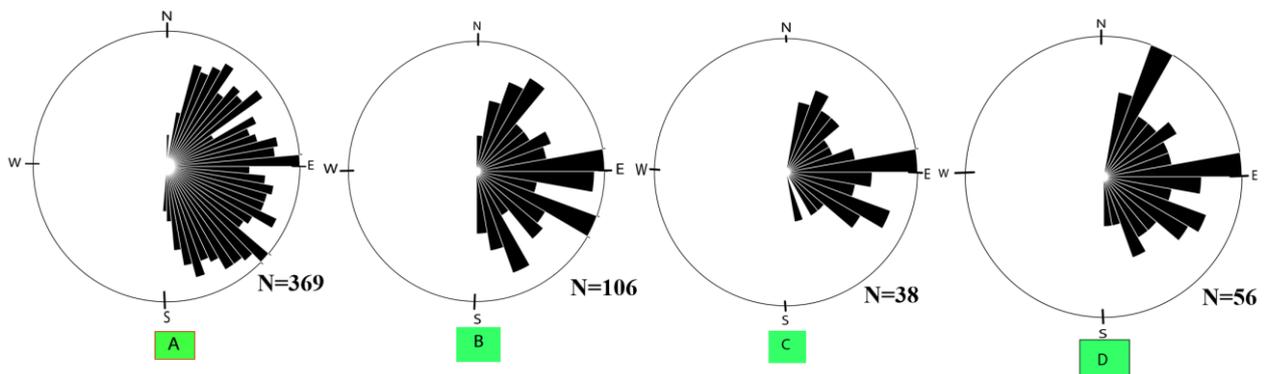


Figure 4.8. Rosace directionnelle des ordres de cours d'eaux : A) Ordre 1, B) Ordre 2, C) Ordre 3 et D) Ordre 4

La rosace synthétique des linéaments hydrographiques (Fig. 4.10), montre la direction majeure E-W et trois directions secondaires qui sont par ordre d'importance : NW-SE, N-S et NNE-SSW. Les directions d'écoulement des cours d'eau du secteur d'étude suivent donc les plans structuraux. Le réseau hydrographique serait donc à guidage structural.

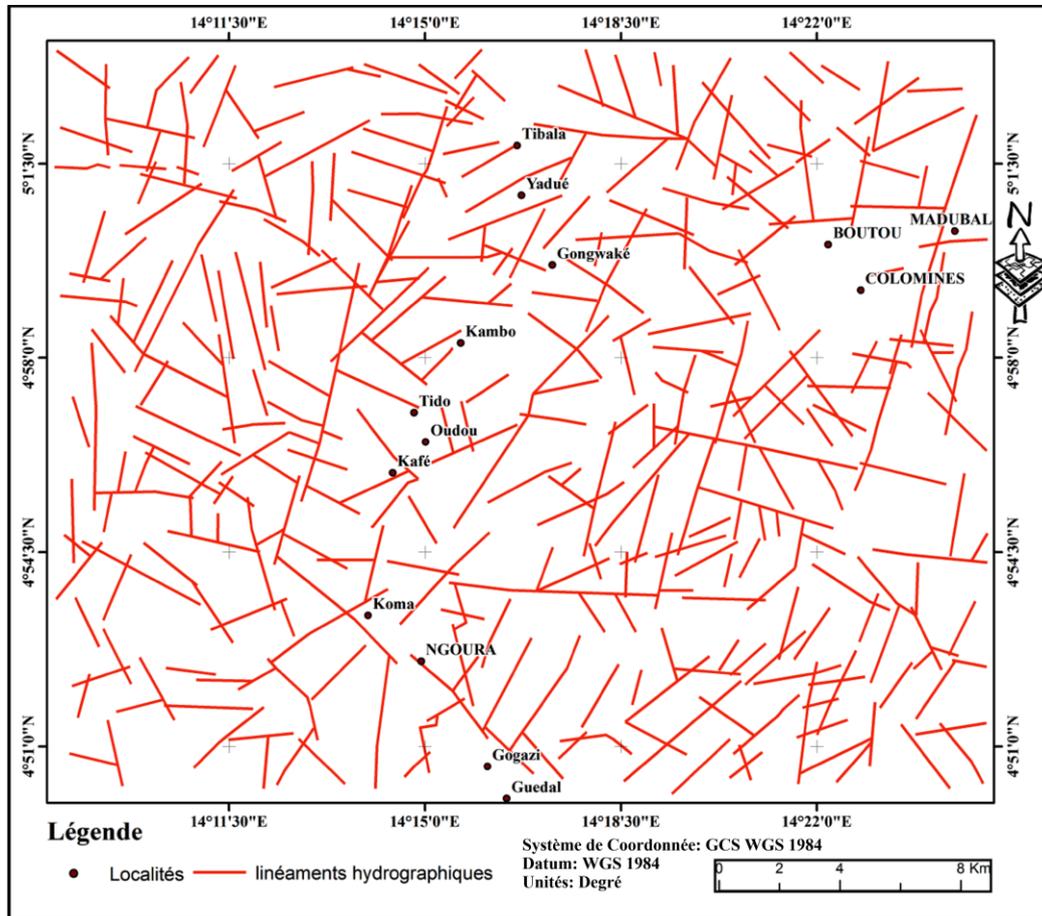


Figure 4.9. Carte des linéaments hydrographiques

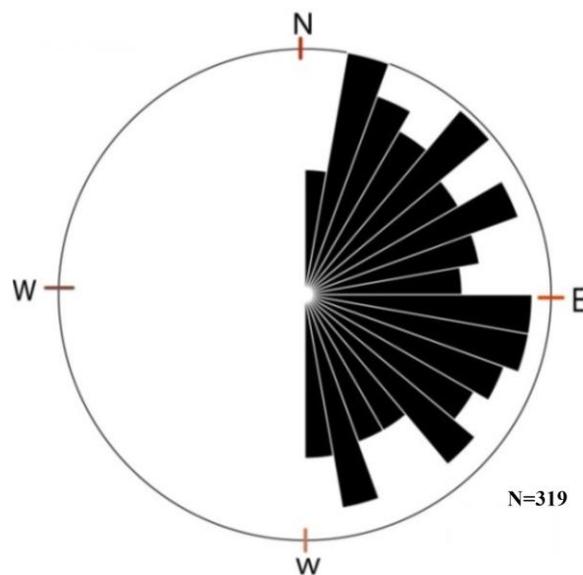


Figure 4.10. Rosace directionnelle des linéaments hydrographiques

**Tableau 4.1.** Récapitulatif des directions d'écoulement des cours d'eau d'ordre 1, 2, 3 et 4

	<b>Ordre 1</b>	<b>Ordre 2</b>	<b>Ordre 3</b>	<b>Ordre 4</b>
<b>Directions majeures</b>	E-W NW-SE	E-W WNW-ESE	E-W	NNE-SSW E-W
<b>Directions moyennes</b>	NNW-SSW ENE-WSW NE-SW	NE-SW E-W NNW-SSE	NW-SE	NW-SE NE-SW NNE-SSW NNW-SSE
<b>Directions mineures</b>	NNE-SSW NE-SW	N-S NE-SW NW-SE WNW-ESE	NE-SW NW-SE	NNW-SSE NE-SW ENE-WSW ESE-WNW
<b>Effectif</b>	369	106	38	56

#### IV.1.2- Analyse des images satellitaires

L'importance des images satellitaires en géomorphologie structurale n'est plus à démontrer car elles constituent un outil moderne et indispensable pour déceler des linéaments; détails qui ne sont généralement pas observables sur le terrain.

##### IV.1.2.1 Données utilisées

Plusieurs types de données ont été utilisés dans cette partie de l'étude. Il s'agit de: (i) l'image Landsat-7 ETM+ (Path 184 et Row 057) du 24 Décembre 2003 (début de la saison sèche) et correspondant à la zone 33 de la projection cartographique Universal Transverse Mercator (UTM) qui utilise le système géodésique de référence WGS 84 ; (ii) la carte géologique au 1/500 000 des degrés carrés de Batouri-Est (Gazel et al., 1954), et (iii) la carte topographique à échelle 1/200 000 couvrant la zone explorée. Le choix de ces images est basé sur les caractéristiques spectrales (30 m de résolution), permettant une cartographie à grande échelle. Les principales caractéristiques de l'image satellitaire Landsat utilisée sont présentées dans le [tableau 4.2](#). Les observations pétrographiques et les mesures structurales recueillies sur terrain ont permis d'interpréter et de valider les structures géologiques mises en évidence à l'aide de l'imagerie satellitaire. L'analyse des différentes cartes résultantes a été faite grâce aux logiciels ArcGIS 10, ERDAS IMAGINE 2014 et Geomatica 2012.

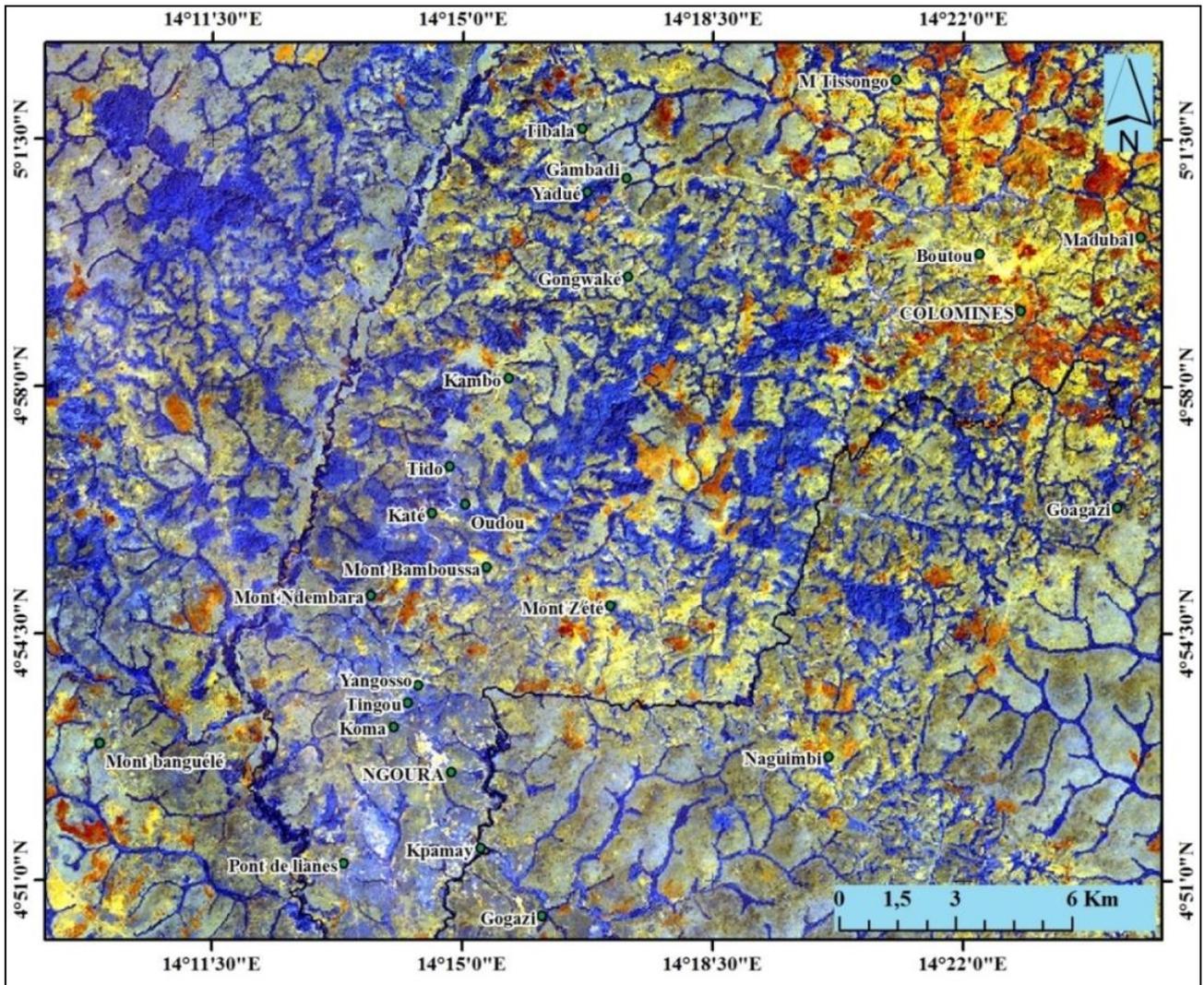
**Tableau 4.2.** Caractéristiques des bandes Landsat 7 ETM+ utilisées.

Bandes de fréquences de l'instrument ETM+	Bandes spectrales	Résolution spatiale	Longueur d'onde
Bande 1	Bleue (visible)	30 m	0,45-0,5 $\mu\text{m}$
Bande 2	Vert (visible)	30 m	0,52-0,6 $\mu\text{m}$
Bande 3	Rouge (visible)	30 m	0,63-0,69 $\mu\text{m}$
Bande 4	IR proche	30 m	0,75-0,9 $\mu\text{m}$
Bande 5	IR moyen	30 m	1,5-1,7 $\mu\text{m}$
Bande 6/1	IR thermique/ lointain	60 m 120 m	10,4-12,5 $\mu\text{m}$
Bande 6/2			
Bande 7	IR moyen	30 m	2,08-2,35 $\mu\text{m}$
Bande 8	Panchromatique (vert-rouge-IR)	15 m	520-900 nm

#### *IV.1.2.2- Cartographie des linéaments*

L'image Landsat-7 ETM+ a été soumise au prétraitement (corrections radiométrique et géométriques) et ensuite à l'analyse en composante principale (ACP) et combinaisons de bandes. L'ACP fournit un résultat dans lequel les deux premières composantes (les néo-canaux ACP1 et ACP2) synthétisent respectivement 70,6 et 13,2% de l'information contenue dans l'image multi-spectrale d'origine en neuf bandes (Koffi Yao., 2011). Les compositions colorées ont été réalisées respectivement à partir des bandes du proche infrarouge (PIR) et du moyen infrarouge (MIR1 et MIR2). La carte obtenue met en évidence le réseau hydrographique (bleu), les zones à forte végétation (violet) et les zones d'altération hydrothermale variées notamment dans les tons jaune, marron et gris (Fig. 4.11).

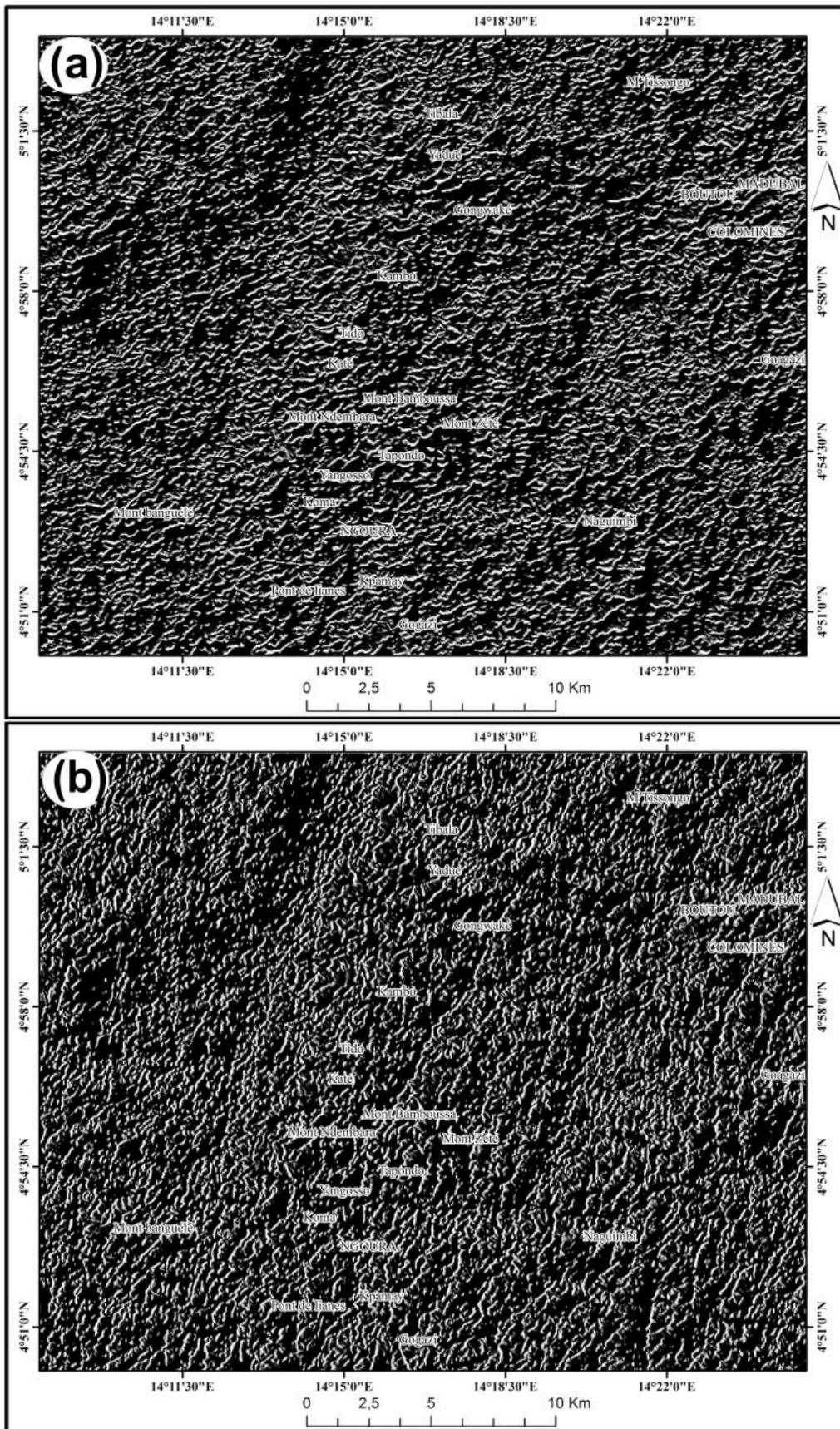
Les filtres directionnels de Sobel ont ensuite été appliqués sur l'image d'ACP dans quatre principales directions: N-S, E-W, NE-SW, NW-SE. Ces filtres accentuent les discontinuités structurales et facilitent la discrimination des linéaments. Les filtres rehaussent principalement les structures de façon perpendiculaire à la direction de filtrage. Pour ce faire, les filtres directionnels N-S mettent en évidence les discontinuités structurales E-W et vice-versa. Il en est de même pour les filtres NE-SW qui relèvent les structures spécialement NW-SE et vice-versa (Fig. 4.12).



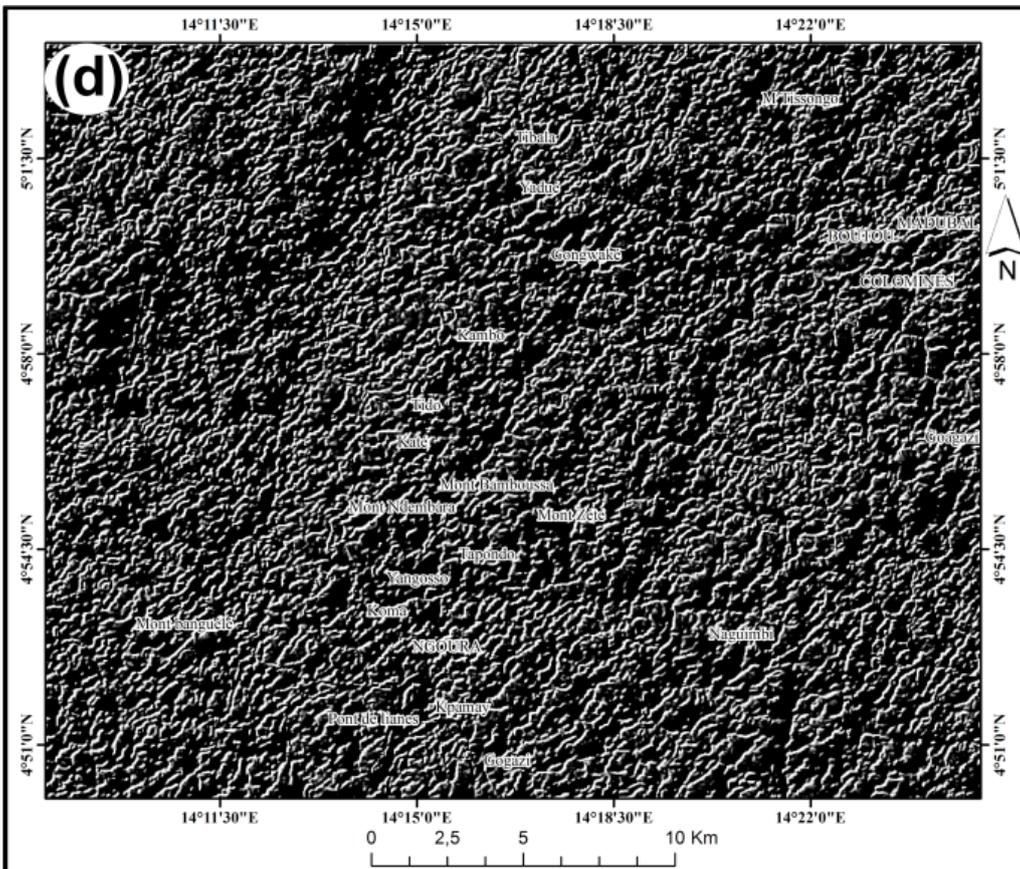
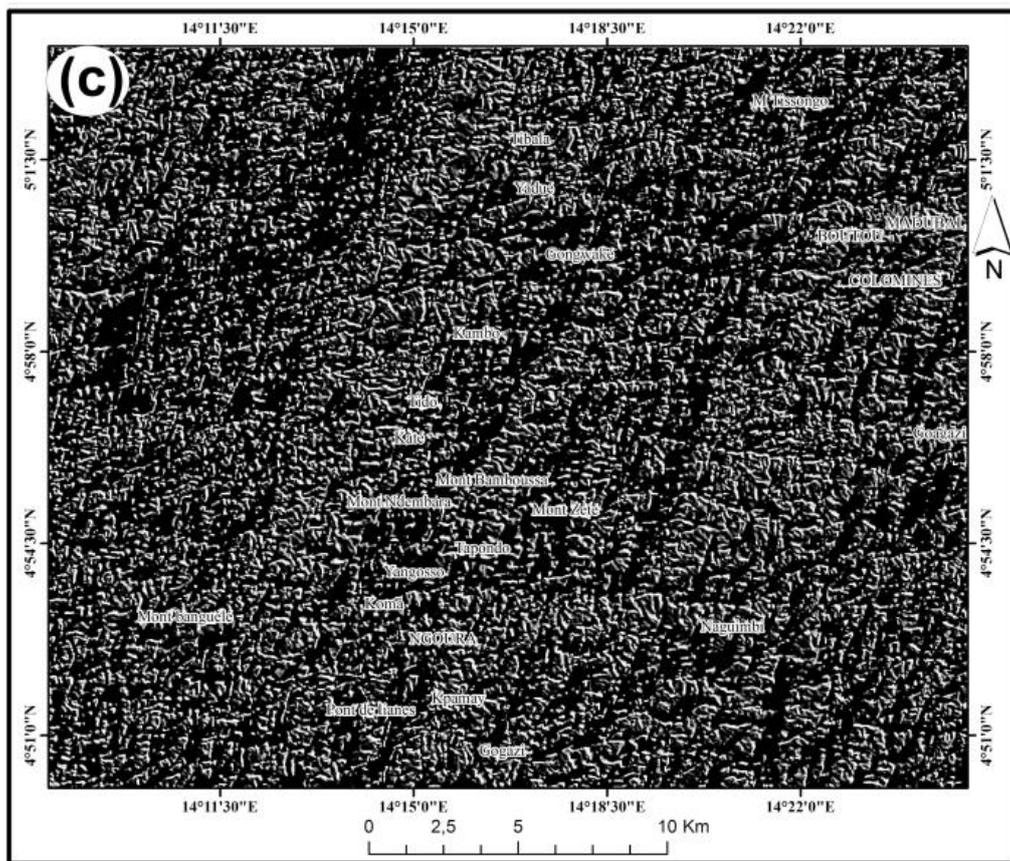
**Figure 4.11.** Image en composition colorée RVB 754 de la zone explorée.

L'ensemble de ces traitements (composition colorée, combinaisons arithmétiques de bandes spectrales, et néo-canaux ACP transformés par des filtres directionnels) appliqués sur l'image Landsat a permis de fournir des supports visuels complémentaires sur lesquels le travail de photo-interprétation des linéaments s'est appuyé (Fig. 4.13).

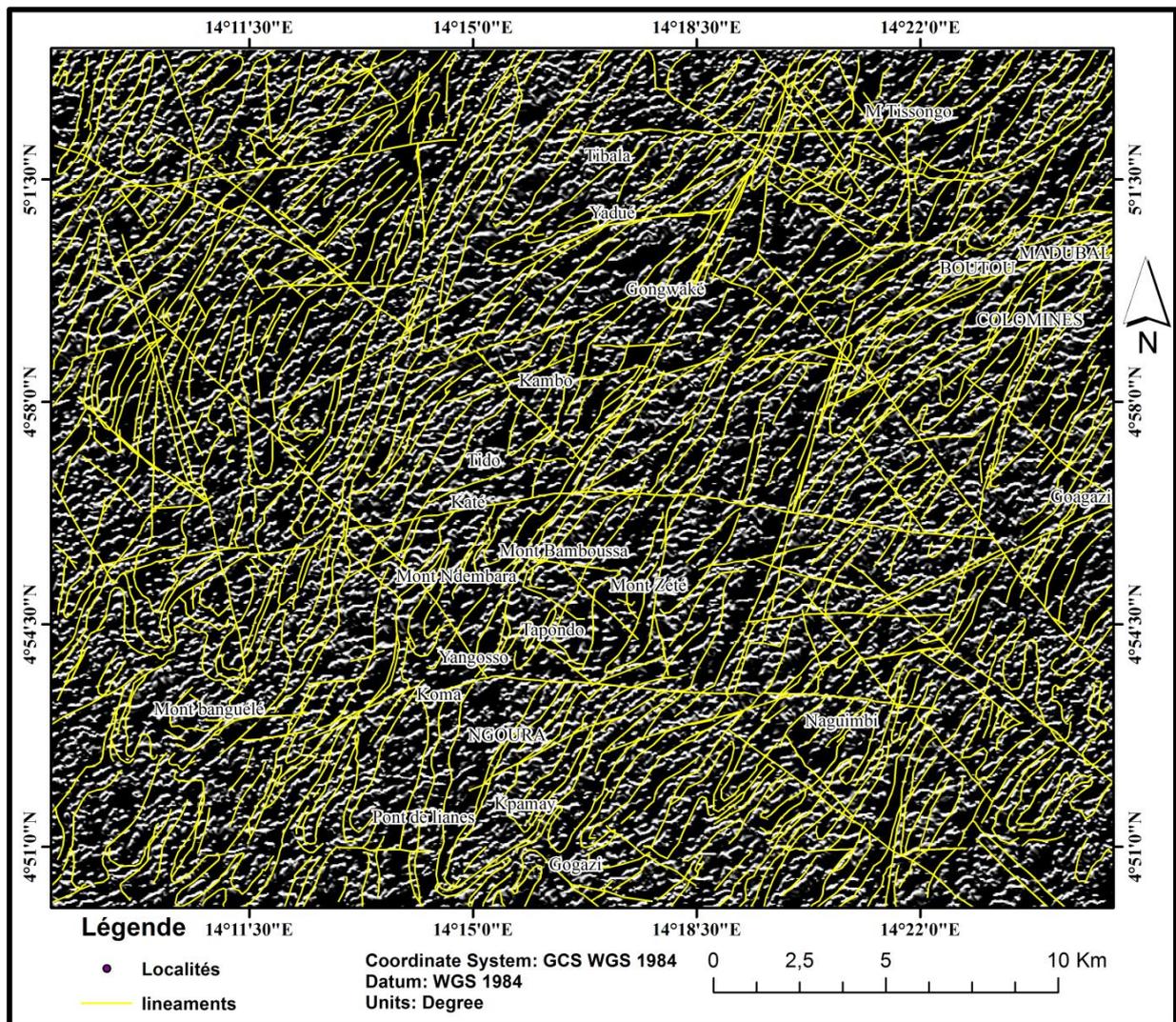
Après le filtrage des images suivant les directions ci-dessus mentionnées, l'étape suivante a consisté en l'extraction manuelle et automatique des linéaments avec leurs jonctions localement curvilignes. L'opération consiste essentiellement en la numérisation de toutes les structures linéaires observées sur l'image satellitaire transformée (ACP), rehaussée et filtrée.



**Figure 4.12.** Image Landsat-7 ETM+ filtrée par la méthode Sobel 7-7 suivant les quatre directions principales: (a) N-S, (b) E-W, (c) NE-SW et (d) NW-SE.



**Figure 4.13(suite).** Image Landsat-7 ETM+ filtrée par la méthode Sobel 7-7 suivant les quatre directions principales: (a) N-S, (b) E-W, (c) NE-SW et (d) NW-SE.

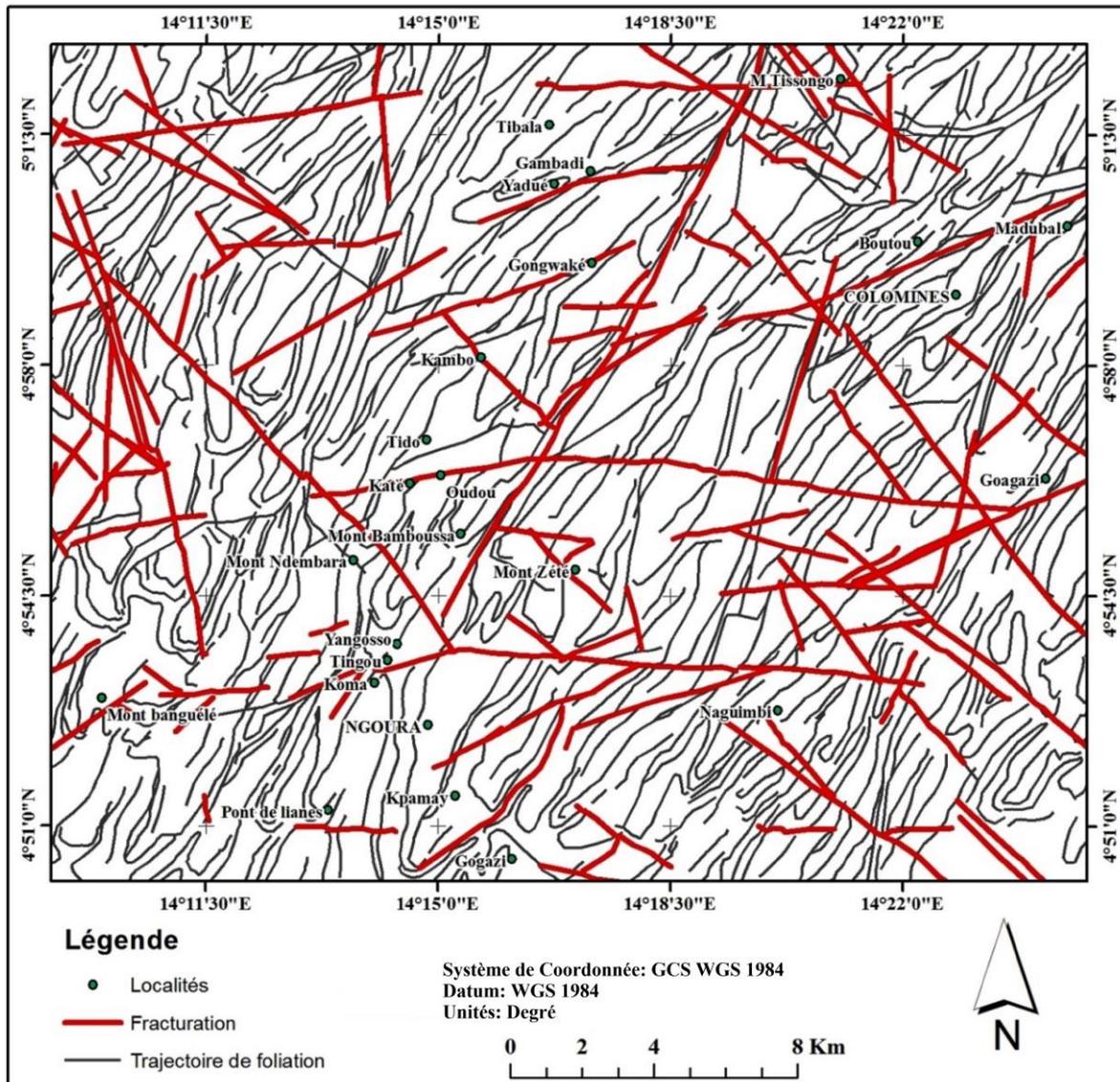


**Figure 4.14.** Carte de synthèse des linéaments

#### ***IV.1.2.3- Signification structurale et analyse statistique des linéaments***

Les linéaments obtenus sont de deux types en fonction de leur pénétrativité. Il s'agit respectivement des linéaments de type I à caractère pénétratif générés automatiquement et des linéaments de type II à caractère non pénétratifs issus de la vectorisation manuelle. De l'analyse des cartes et des rosaces, il ressort que: (1) les linéaments de type I du fait de leur pénétrativité correspondent à des trajectoires de foliation. Cette interprétation est confirmée par les données de terrain qui ont mis en évidence des plans de foliation orientés NE-SW (paragraphe IV.2). La foliation ainsi identifiée conformément à la direction prédominante des linéaments extraits des images satellites (Fig. 4.14) est par endroit rebroussee par des linéaments au tracé cartographique plus continu; (2) les linéaments de type II ou linéaments non pénétratifs se caractérisent par une continuité cartographique plus accentuée et une densité

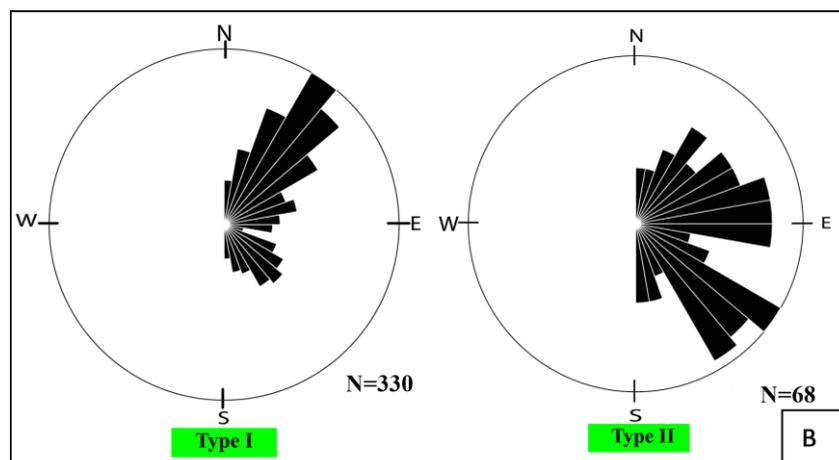
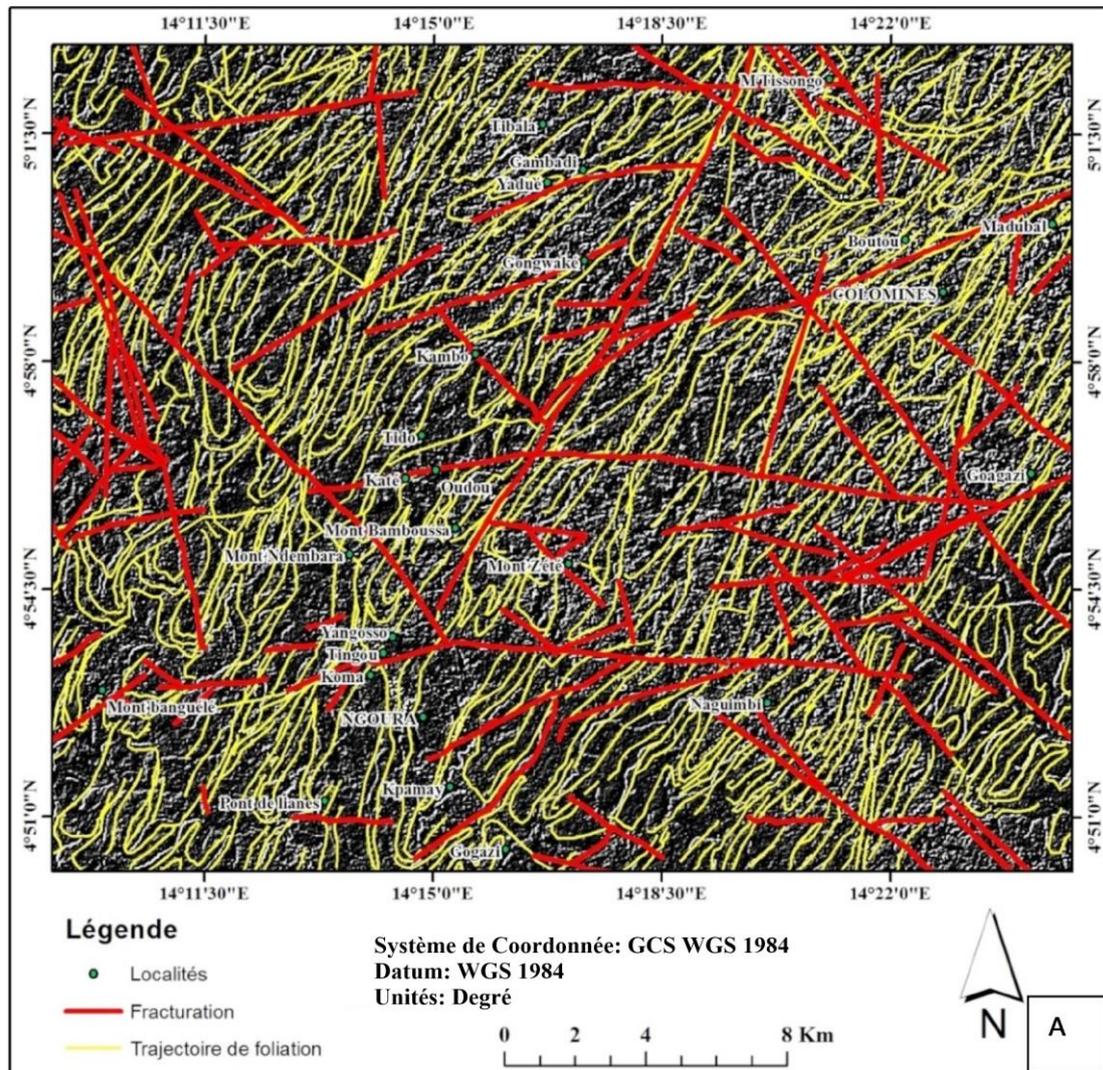
spatiale plus lâche. Ces linéaments induisent également le décalage de la foliation à leur contact et représentent ainsi la fracturation du secteur d'étude (Fig. 4.14).



**Figure 4.15.** Carte structurale de la région de Ngoura-Colomines établie à partir de l'analyse des images ETM+ de Landsat-7.

Dans le but de ressortir la géométrie du réseau des linéaments et d'en dégager les directions dominantes, une analyse statistique a été réalisée. Cette analyse a permis de dénombrer 654 éléments linéaires. Ces derniers présentent des trajectoires rectilignes sporadiquement relayées par des courbures; les premiers (type I) représentent plus de 85% alors que les seconds (type II) représentent environ 15%. Les figures 4.15A et 4.15B présentent respectivement les accidents majeurs rehaussés par le filtrage de Sobel et le gradient de Yésou et al. (1993) appliqué à l'image ACP1 et les rosaces directionnelles des linéaments détectés. Ces figures mettent en évidence les directions principales et secondaires des linéaments. Ainsi, les linéaments de type I (foliation) montrent une direction dominante

NE-SW et les directions secondaires N-S, E-W et NW-SE par ordre d'importance ; alors que les linéaments de type II (fracturation) présentent deux directions principales NE-SW et NW-SE.



**Figure 4.16.** A) Carte des linéaments rehaussés par le filtrage de Sobel et gradient de [Yésou et al. \(1993\)](#); B) Rosaces directionnelles (Type I: portions curvilignes ; Type II: portions linéaires).

## **IV.2- ANALYSE STRUCTURALE**

Les éléments structuraux recensés dans le secteur de Ngoura-Colomines sont des structures planaires (foliation, schistosité, plan de cisaillement), des structures linéaires (linéation minérale et linéation d'étirement minéral, linéation axiale) et des structures ubiquistes (plis, boudins, diaclases). Une chronologie relative permet de classer ces éléments structuraux en quatre principales phases de déformation. Cette section présente l'analyse et la description de ces différents éléments structuraux.

### **IV.2.1- Première phase de déformation D<sub>1</sub>**

La première phase de déformation D<sub>1</sub> est essentiellement ductile et affecte uniquement les roches de l'ensemble métamorphique. C'est une phase relique car ses structures sont fortement transposées par les phases de déformations ultérieures notamment D<sub>2</sub> et D<sub>3</sub>. Les éléments structuraux associés à la phase D<sub>1</sub> sont néanmoins reconnaissables dans les gneiss et les amphibolites. Cette phase se caractérise par: (1) des structures planaires tels que la foliation S<sub>1</sub> (alternance compositionnelle), (2) des structures linéaires notamment la linéation minérale Lm<sub>1</sub> et la linéation d'étirement minéral Le<sub>1</sub> et (3) des structures de volume (plis et boudins intrafoliaux P<sub>1</sub> et B<sub>1</sub> respectivement).

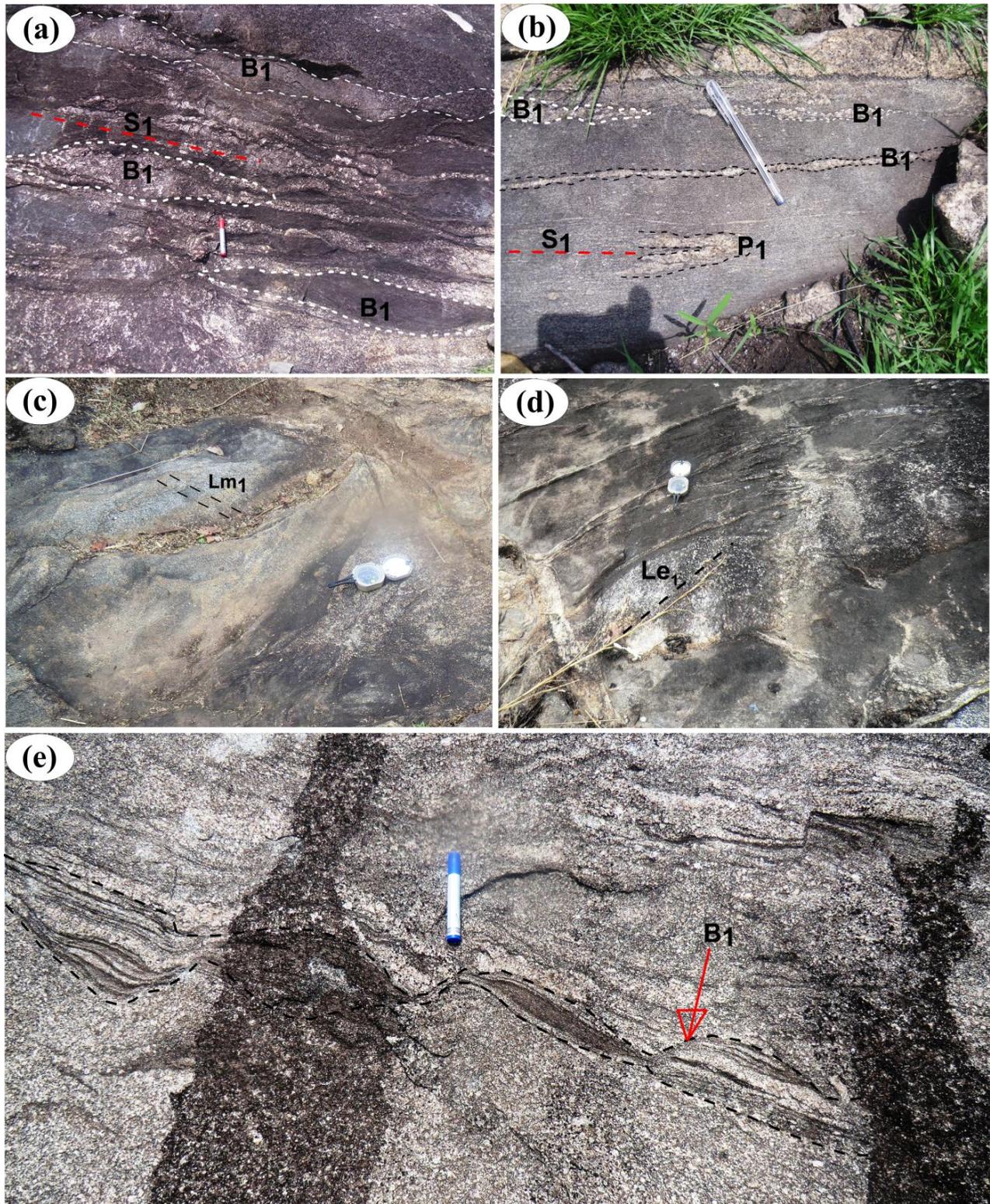
#### ***IV.2.1.1- Structures planaires***

##### ***IV.2.1.1.1- Foliation S<sub>1</sub>***

La foliation S<sub>1</sub> s'observe dans les amphibolites et les gneiss qui affleurent sous forme d'enclaves dans la plupart des massifs granitiques du secteur d'étude en l'occurrence ceux des secteurs Tapondo, Trou du rat 2, Ngogon-goubou, Ndembara, Colomines et Madubal. Cette foliation est visible aux échelles mésoscopique et microscopique.

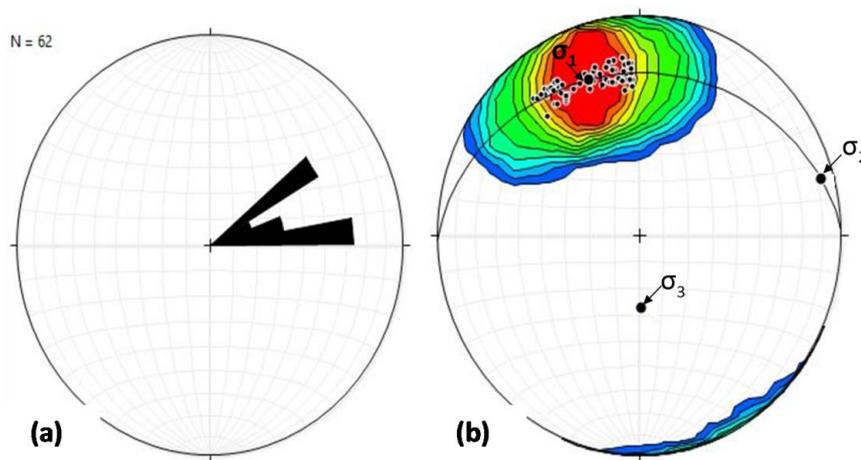
À l'échelle de l'échantillon, la foliation S<sub>1</sub> est de type litage compositionnel caractérisé par l'alternance des lits clairs composés essentiellement de quartz et de feldspath de dimension millimétrique à centimétrique et des lits sombres riches en minéraux ferromagnésiens (biotite et amphibole) de dimension centimétrique (Figs. 4.16a-b).

La schistosité S<sub>1</sub> associée est soulignée par l'orientation préférentielle des cristaux de feldspath, de quartz et des ferromagnésiens (Fig. 3.10). Elle est de plan axial aux plis intrafoliaux P<sub>1</sub> dans les gneiss (Fig. 4.16b). La direction moyenne de la foliation S<sub>1</sub> varie de N080E60N à Tapondo, N075E60NNE dans les secteurs Trou du rat 2, Ngogon-goubou et Ndembara à N055E70NW à Colomines et à Madubal.



**Figure 4.17.** Quelques éléments structuraux de la phase D<sub>1</sub>. (a) Foliation S<sub>1</sub> et boudins intrafoliaux B<sub>1</sub> dans les enclaves de gneiss et amphibolites ; (b) Foliation S<sub>1</sub>, boudins B<sub>1</sub> et pli intrafolial P<sub>1</sub> ; (c et d) Linéation minérale Lm<sub>1</sub> et linéation d'étirement minéral Le<sub>1</sub> dans les amphibolites et gneiss ;(e) boudins asymétriques sigmoïdes et en échelons tardi-D<sub>1</sub> à syn-D<sub>2</sub>.

La projection stéréographique des plans de foliation  $S_1$  ainsi que la rosace de directions (Fig. 4.17) montrent une distribution spatiale des directions de N050E à N087E avec deux directions dominantes NE-SW et E-W, et une direction mineure ENE-WSW (Fig. 4.17a). Le diagramme polaire des surfaces  $S_1$  montre des pôles des plans  $S_1$  essentiellement concentrés dans le quadrant NW du stéréogramme (Fig. 4.17b) indiquant ainsi un raccourcissement NNW-SSE. En effet, les axes de contrainte à l'origine de cette déformation présentent des orientations suivantes :  $\sigma_1$ : N160E 26SSE,  $\sigma_2$ : N074E 07WSW,  $\sigma_3$ : N178E 62N ; d'où  $\phi_{\sigma_3} > \phi_{\sigma_1} > \phi_{\sigma_2}$ . La phase de déformation  $D_1$  serait donc une compression induite par un raccourcissement NNW-SSE.



**Figure 4.18.** Diagrammes stéréographiques de la  $S_1$ : (a) rosace de directions; (b) diagramme de densité des pôles. Notez la disposition des axes de contraintes principales.

#### IV.2.1.2- Structures linéaires

Les plans de foliation  $S_1$  portent des structures linéaires que sont les linéations minérales  $L_{m1}$  et les linéations d'étirement minéral  $L_{e1}$ . Les linéations minérales sont principalement marquées dans les gneiss où elles sont soulignées par l'alignement des cristaux de feldspath, de quartz et des lamelles de biotite avec pour direction moyenne N065E (Fig. 4.16c). Les linéations d'étirement minéral  $L_{e1}$  s'observent dans les amphibolites de la localité de Ngogon-goubou et sont soulignées par l'allongement des agrégats de quartz et de feldspaths à direction moyenne N070E (Fig. 4.16d).

#### IV.2.1.3- Structures de volume

##### IV.2.1.3.1- Structures plicatives

Les structures plicatives associées à la phase  $D_1$  sont des plis intra-foliaux  $P_1$ , aux plans axiaux parallèles à la foliation  $S_1$  (Fig. 4.16b). C'est un plissement qui s'observe

essentiellement dans les gneiss de la localité de Ngogon-goubou. La présence dans cette formation de lits hétérogènes permet de mettre en évidence le profil des plis P<sub>1</sub>. Il s'agit des plis isopaques couchés.

#### **IV.2.1.3.2- Boudins B<sub>1</sub>**

Les boudins se forment généralement suite à un contraste de compétence entre les différents niveaux de la roche soumise à une compression et sont associés à l'étirement des couches compétentes dans une matrice ductile suivie de la ségrégation progressive du matériau. Les déformations résultantes dépendent du contraste de compétence et varient de la rupture des couches à fort contraste de compétence, aux structures «*pinch and swell*» dans les couches à faible contraste de compétence (Goldstein, 1988). Dans les localités de Yangosso, Gogo Boua et de Ngogon-goubou, le boudinage de la foliation a été observé (Fig.4.16a). Ce boudinage est incomplet et se traduit par des structures de type *pinch and swell* qui s'observent sur les niveaux clairs dans les gneiss et les niveaux sombres dans les amphibolites (Fig.4.16e). Ceci entraîne une inflexion de la matrice dans les intervalles pincés associés à des plans de cisaillement le long desquels s'effectue le glissement. À Gogo Boua précisément, les boudins B<sub>1</sub> sont asymétriques en échelons, formés par boudinage antithétique de type *A-Slip*. Ils seraient donc tardi-D<sub>1</sub> à syn-D<sub>2</sub> et correspondraient de par leurs formes aux boudins pré à syn-cisaillement, donc caractéristiques des zones de cisaillement (Ramsay et Huber, 1987 et Goldstein, 1988). En effet, leur rapport de forme (aspect ratio) est d'environ 3,60 ; caractéristique des boudins de type *shearband* (Goscombe et al., 2004).

En résumé, la phase de déformation D<sub>1</sub> comporte une foliation S<sub>1</sub> de direction moyenne NE-SW; des plis P<sub>1</sub> intrafoliaux, des linéations minérales et d'étirement minérale et des boudins B<sub>1</sub>. Cette phase déformation s'est déroulée en style compressif en régime coaxial car l'élément structural majeur est la foliation. Elle présente ainsi les caractères d'une déformation par constriction à raccourcissement maximal NNW-SSE.

#### **IV.2.2- Deuxième phase de déformation D<sub>2</sub>**

La deuxième phase de déformation D<sub>2</sub> est ductilo-fragile et affecte aussi bien l'ensemble magmatique que l'ensemble métamorphique. Les éléments structuraux de cette phase sont visibles à différentes échelles notamment microscopique, mésoscopique et mégascopique. Ils sont marqués par (1) des structures planaires (schistosité S<sub>2</sub>, cisaillement C<sub>2</sub>) et les failles satellites associées à l'échelle cartographique; (2) des structures linéaires notamment la linéation d'étirement minéral et (3) des plissements méso-à-mégascopiques P<sub>2</sub>.

Cependant, la description présentée ici pour cette phase fait abstraction des éléments structuraux mégascopiques car déjà abordée au paragraphe IV.1 de ce chapitre.

#### ***IV.2.2.1- Schistosité $S_2$***

La schistosité  $S_2$  s'observe sur les affleurements d'orthogneiss de Yangosso, Ngogon-goubou, Ndembara, Boden et Colomines (Fig. 4.18). Elle est soulignée par la disposition planaire et l'orientation préférentielle des rubans de quartz, et des cristaux déformés de feldspaths (Fig. 4.18a). C'est donc une schistosité mylonitique.

Les orthogneiss (granites mylonitisés) forment des bandes de près de 20 m de large traversée par les veines d'aplite et de pegmatite parallèles entre elles avec une orientation moyenne de N140E64NE. A Boden et Colomines, ces mylonites présentent des structures *S-C* caractéristiques (plans de schistosité mylonitique  $S_2$  associés aux plans de cisaillement  $C_2$ ). Leur présence constitue ainsi la preuve de l'existence d'une zone de cisaillement, le cisaillement de Ngoura-Colomines, dans le secteur d'étude.

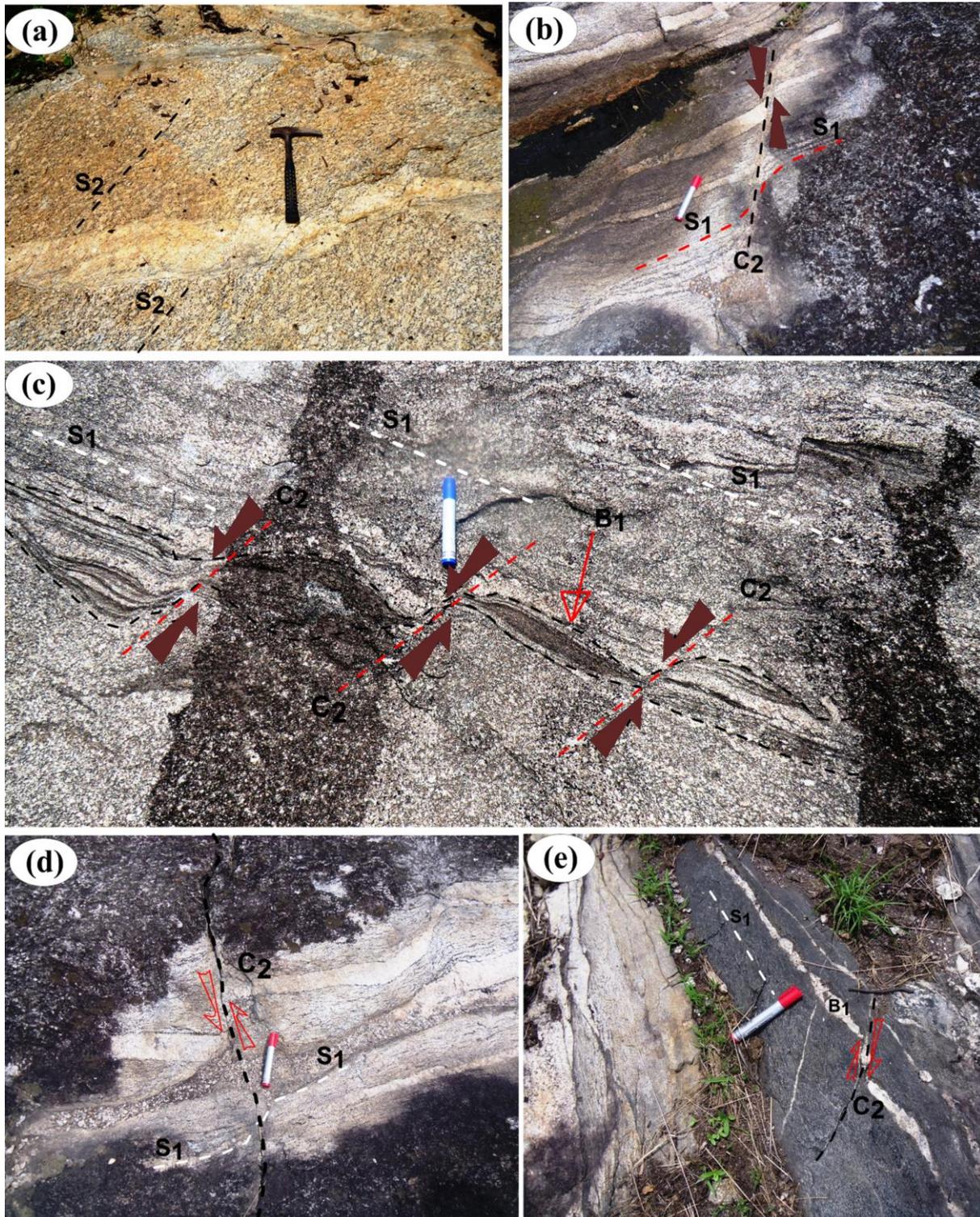
La direction moyenne de la  $S_2$  est N50°E70SE dans les localités de Yangosso et Ndembara, N140E60SE à Ngogon-goubou (Fig. 4.19a et b), mais cette orientation évolue sensiblement pour atteindre N070E55SSE dans les localités de Boden et Colomines (Fig. 4.19c).

#### ***IV.2.2.2- Cisaillement $C_2$***

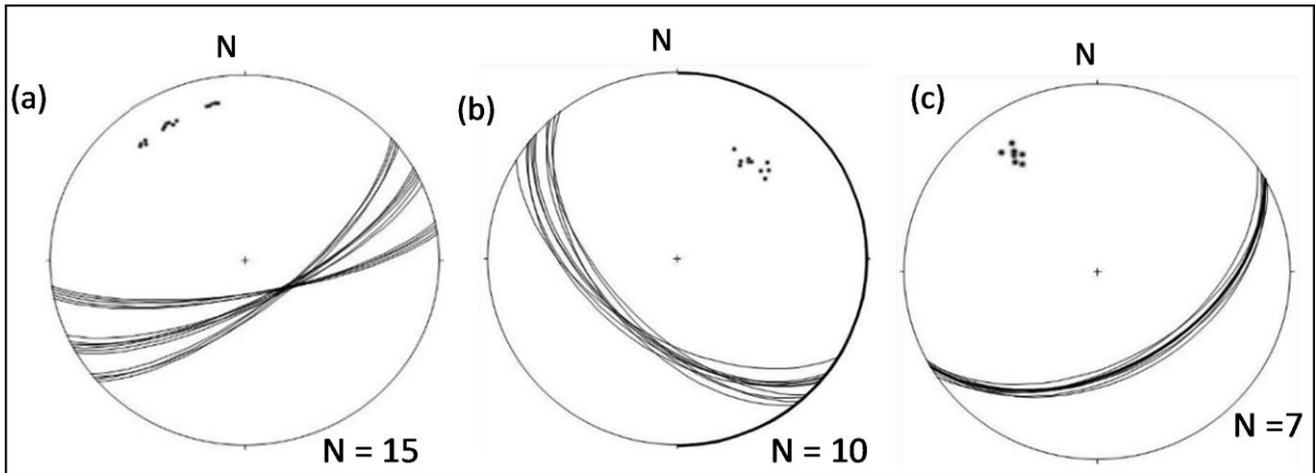
Les cisaillements  $C_2$  constituent l'un des éléments majeurs de la phase  $D_2$ . Ils sont rencontrés aussi bien dans l'ensemble magmatique que dans l'ensemble métamorphique. Ils sont soulignés par des injections filoniennes de direction moyenne N45°E qui rebrousse la schistosité  $S_1$ . L'ensemble définit ainsi un cisaillement de polarité aussi bien senestre (Fig. 4.18b-d) que dextre (Fig. 4.18e). Dans ces plans de cisaillement, les minéraux présentent une orientation préférentielle.

#### ***IV.2.2.3- Structures linéaires: Linéation d'étirement minéral $Le_2$***

La linéation d'étirement minéral  $Le_2$  s'observe dans les roches métamorphiques à Ngoura-Colomines où elle est marquée par l'alignement des lentilles quartzo-feldspathiques et l'étirement des paillettes de biotite et des prismes d'amphibole sur les plans de schistosité  $S_2$  dégagés (Fig. 4.19a). Attitude moyenne de la  $L_2$  étant N040E20NE.



**Figure 4.19.** Quelques éléments structuraux de la phase D<sub>2</sub>. (a) Schistosité mylonitique S<sub>2</sub>, (b) Cisaillement C<sub>2</sub> senestre sur la S<sub>1</sub> (c) Cisaillement C<sub>2</sub> senestre sur la S<sub>1</sub> et les boudins intrafoliaux B<sub>1</sub> d'amphibolites ; (d) Cisaillement C<sub>2</sub> senestre sur la foliation (S<sub>1</sub>), (e) Cisaillement C<sub>2</sub> dextre sur la S<sub>1</sub> et les boudins intrafoliaux B<sub>1</sub> dans les enclaves d'amphibolites.



**Figure 4.20.** Diagrammes cyclographiques et pôles de la schistosité mylonitique  $S_2$  des affleurements de Yangosso et Ndembera (a), Ngogon-goubou (b) Boden et Colomines (c).

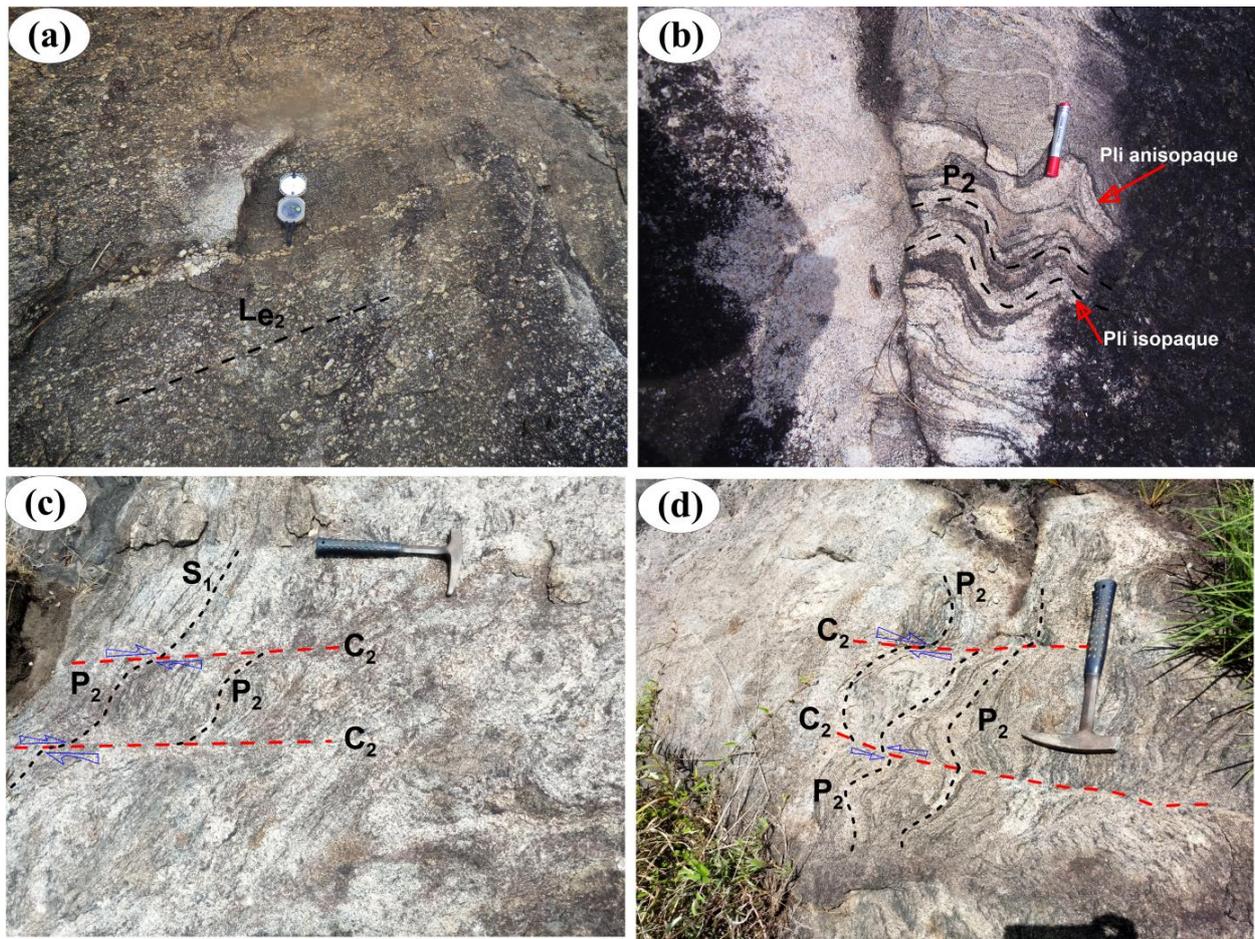
#### *IV.2.2.4- Structures plicatives*

Les plis sont des déformations continues et hétérogènes. Ce sont les marqueurs de la déformation ductile dans une roche. Dans la zone d'étude, on les retrouve sur les affleurements de Yangosso, de Ngogon-goubou et de Ndembera. Ces plis sont, en fonction de la variation de l'épaisseur des flancs à la charnière, de deux types : (1) des plis anisopaques et (2) des plis isopaques (Ramsay et Huber, 1987) ; l'on note aussi la présence des ptygmatisques.

Les plis anisopaques et isopaques sont soit des injections filoniennes plissées, soit la foliation métamorphique  $S_1$  plissotée (Fig. 2.20 b-d ; Fig. 2.21a-d).

Les plis ptygmatisques sont des plis en boyaux assimilables aux joints stylolitiques. En effet, ce sont les niveaux quartzo-feldspathiques injectés dans les gneiss et amphibolites qui montrent un profil sous forme de boyaux ou plis parasites (Fig. 2.21c).

En résumé, la phase tectonique  $D_2$  se caractérise par une diversité structurale. En effet, au cours de cette phase de déformation se sont développés: tout d'abord les boudins asymétriques en échelons tardi- $D_1$  à syn- $D_2$ , la schistosité mylonitique  $S_2$ , les cisaillements  $C_2$ , les structures  $S-C$ , les linéations d'étirement minérales  $Le_2$ , et les plis  $P_2$ . Ces éléments structuraux font de la phase  $D_2$  une phase de tectonique transcurrente.



**Figure 4.21.** Autres éléments structuraux de la phase D<sub>2</sub> (a) linéation d'étirement minéral Le<sub>2</sub>; (b) Plis anisopaques et isopaques P<sub>2</sub>; (c) *Strain-Slip* induisant le plissement de la foliation S<sub>1</sub> à leurs contacts ; (d) Cisaillement C<sub>2</sub> conjugués sous forme de *strain-slip* (dextres et senestres) induisant le plissement de la foliation S<sub>1</sub>.

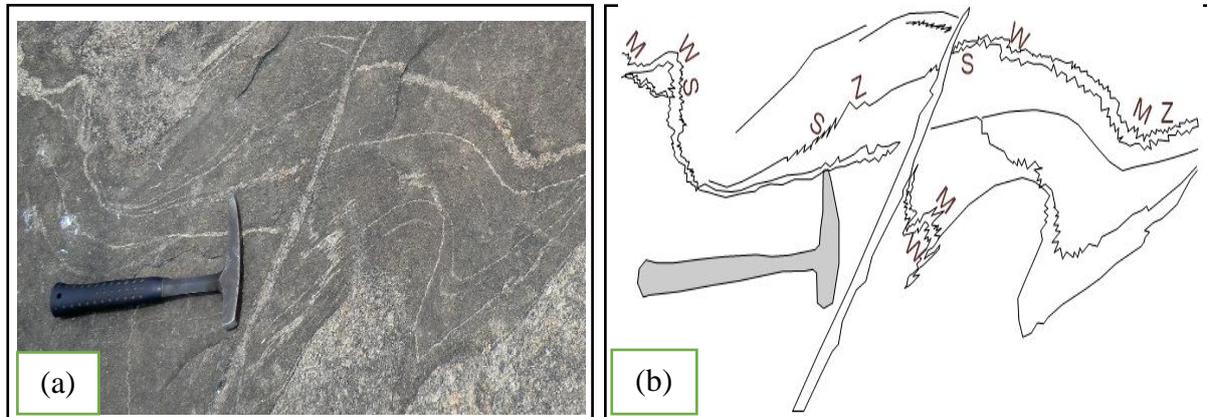
### IV.2.3- Troisième phase de déformation D<sub>3</sub>

La phase de déformation D<sub>3</sub> bien qu'étant aussi ductilo-fragile, est typiquement une phase de superposition tectonique. En effet, les structures associées à cette phase résultent d'une transposition ou d'une réorientation des structures D<sub>2</sub>. Ces éléments structuraux sont des plis P<sub>3</sub> et des cisaillements C<sub>3</sub>

#### IV.2.3.1- Plissements P<sub>3</sub>

Le plissement P<sub>3</sub> mis en évidence ici est polyphasé. C'est en effet une reprise des plis P<sub>2</sub> en P<sub>3</sub>. D'où la variation de l'amplitude desdits plis à leurs charnières révélant ainsi la présence des présumés plis parasites P<sub>2</sub> de départ. Ce sont donc des plis superposés issus du développement tardif du plissement à grande amplitude dans les structures précoces. Ces méso-plis P<sub>3</sub> comportent ainsi des microplis asymétriques (plis parasites P<sub>2</sub>) qui sont soit sous forme de « S », soit sous forme de « Z », ceci en fonction de leur localisation sur les méso-

plis. De plus les microplis associés dessinent des structures symétriques en forme de « M » et « W » selon qu'ils soient observés au niveau des charnières antiformes et synformes respectivement. La forme géométrique des plis P<sub>3</sub> est typiquement celle des structures parasites (Fig. 4.21a-b ; Fig. 4.22d).



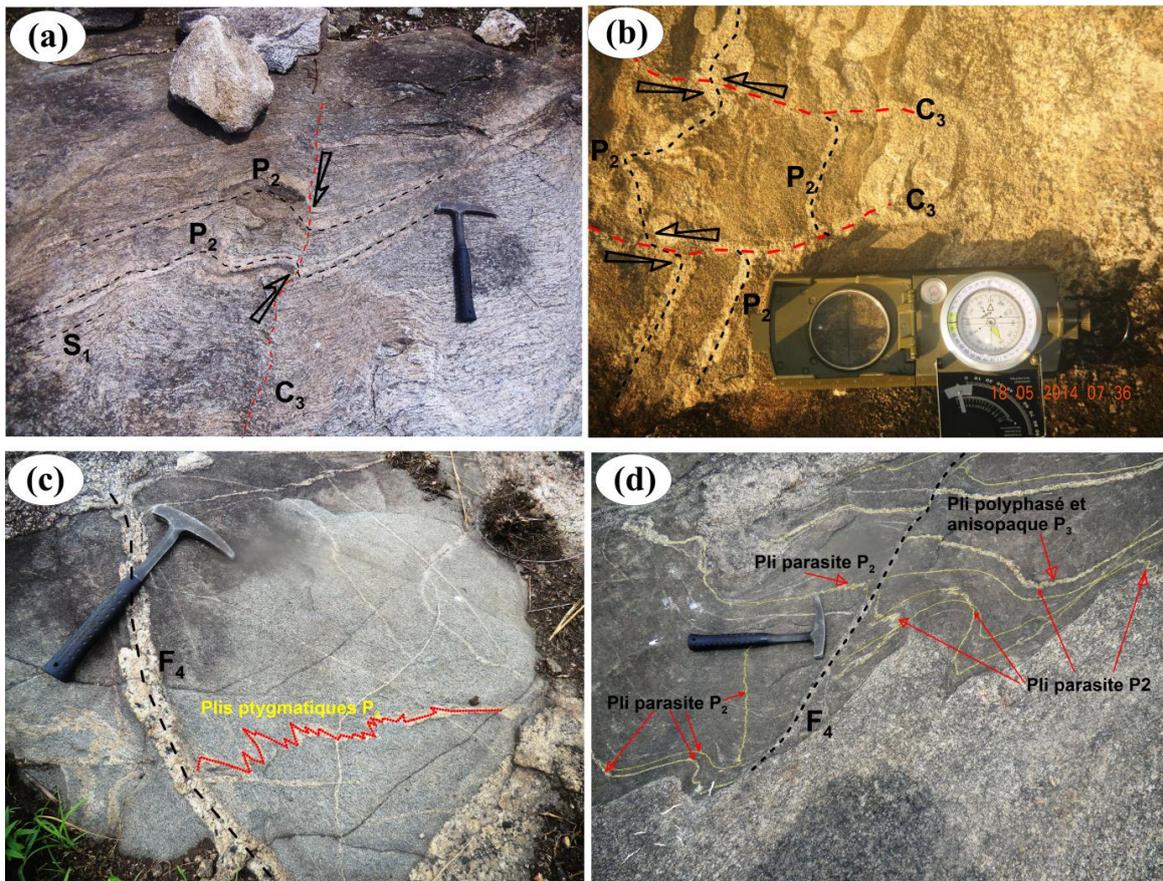
**Figure 4.22.** Plis P<sub>3</sub> observés dans les enclaves d’amphibolite de Ndembara (a et b). Notez la forme « S » et « Z » des micro-plis associés ainsi que la forme « W » et « M » des charnières.

#### IV.2.3.2- Cisaillements C<sub>3</sub>

Les plans de cisaillement C<sub>3</sub> sont responsables du décalage de la foliation S<sub>1</sub> plissée en P<sub>2</sub>. Ces plans C<sub>3</sub> ont été principalement observés sur l’affleurement en dôme de Ndembara où ils laminent les flancs des plis P<sub>2</sub>, induisant ainsi le rebroussement des structures à leurs contacts dans le sens horaire ou dextre (Fig. 4.21a). Par endroits, l’on note la présence d’une famille de cisaillements senestres (deux cisaillements conjugués) et dont le re-jeu laisse transparaître des structures en tablettes de chocolat (Fig. 4.21b). Attitude moyenne de C<sub>3</sub> est de N 45°E 30SE.

#### IV.2.4-Quatrième phase de déformation D<sub>4</sub>

La phase de déformation D<sub>4</sub> est essentiellement cassante et responsable de la mise en place des joints F<sub>4</sub> de toutes sortes (certaines sont sèches, d’autres sont nourries de matériaux de composition aplitique et pegmatitique). Ils sont orientés globalement N140E64NE. On note aussi la présence dans cette phase ultime des veines de quartz minéralisées V<sub>4</sub> d’épaisseur variable et soit sécantes, soit parallèles à la foliation régionale mais toujours bourrées de sulfures notamment pyrite et chalcoppyrite. Ces veines sont tantôt en place dans la roche saine (granitoïde), tantôt démantelées mais encore bien visibles dans les profils d’altération.



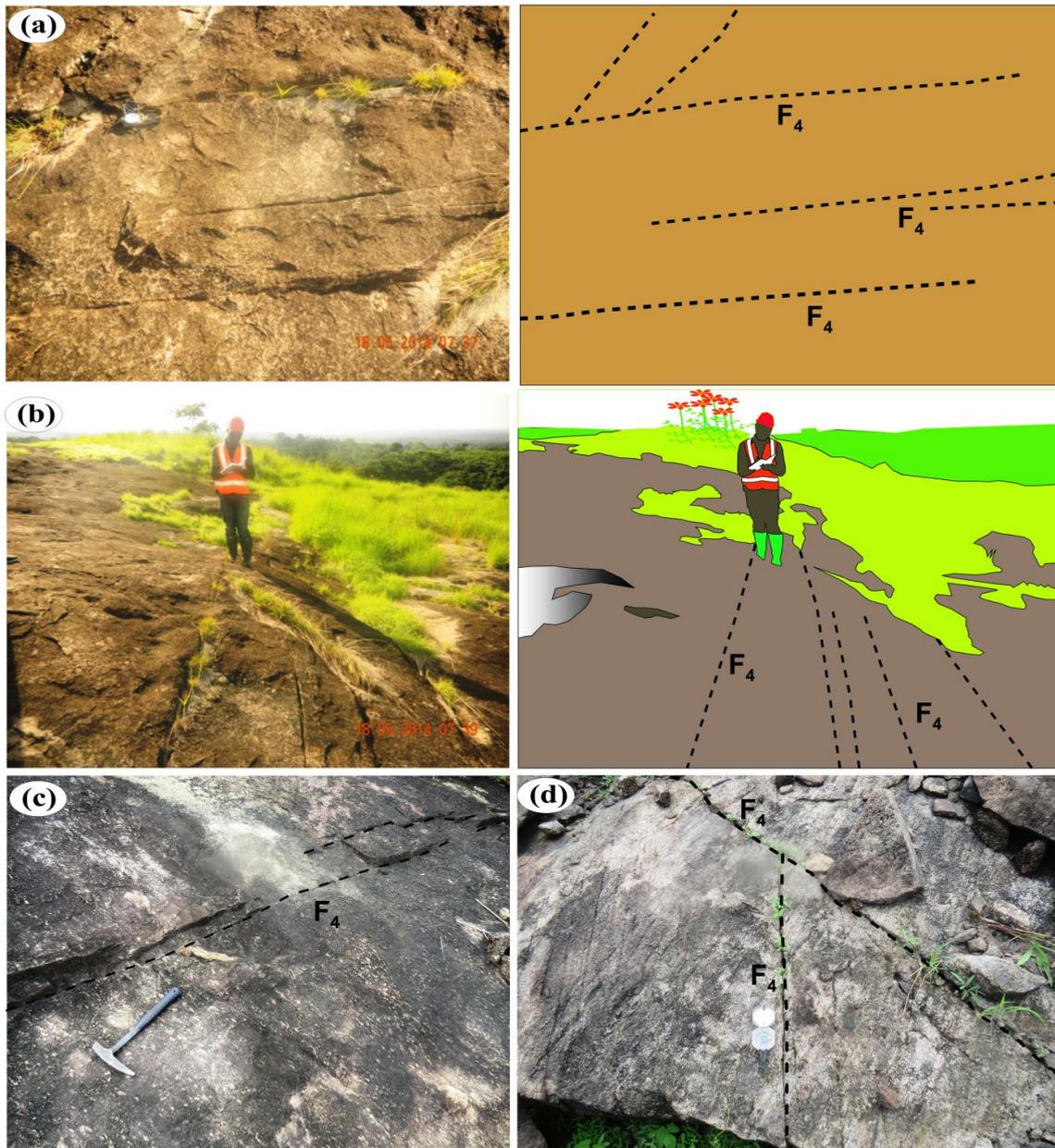
**Figure 4.23.** Quelques éléments structuraux des phases D<sub>3</sub> et D<sub>4</sub>, (a): Cisaillement C<sub>3</sub> dextre, (b): Famille de cisaillements C<sub>3</sub> senestres, (c): Plis ptygmiques dans les enclaves d'amphibolites et fracture nourrie F<sub>4</sub>; (d): Fracture nourrie F<sub>4</sub> affectant les plis P<sub>3</sub> anisopaques et plis parasites P<sub>2</sub>.

#### IV.2.4.1- Fractures F<sub>4</sub>

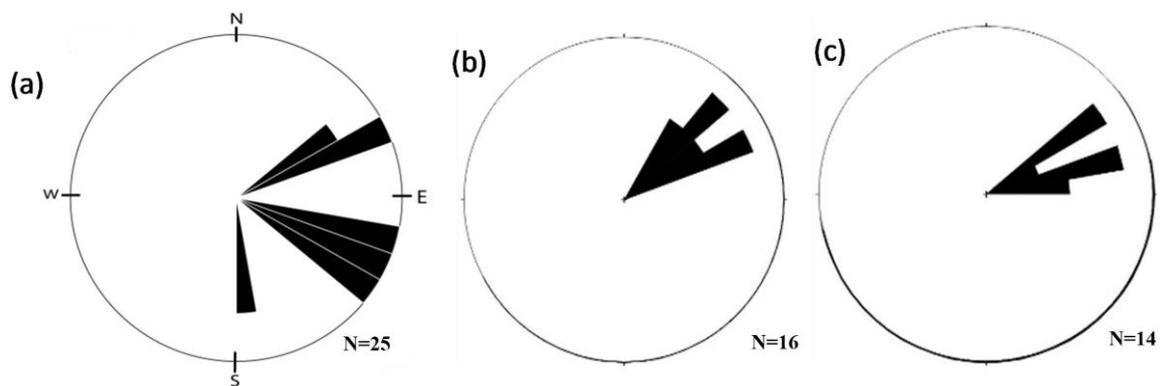
Les plans de fractures nourries F<sub>4</sub> ont été observés sur l'affleurement en dôme de Ndembara. Ces plans laminent les flancs des plis P<sub>3</sub> (Fig. 4.22d et Fig. 4.23). Ces plans de discontinuité décalent la charnière des plis qu'ils affectent. Le mouvement cisailant associé à la phase tectonique D<sub>4</sub> est senestre et la direction moyenne des plans F<sub>4</sub> est N 030°E.

#### IV.2.4.2 - Diaclases

Les diaclases ou joints secs F<sub>4</sub> ont été observés sur la quasi-totalité des affleurements investigués (Fig. 4.23). Par exemple, ils compartimentent les affleurements granitiques de Yangosso, Ngogon-goubou et de Ndembara. L'orientation des diaclases est variable, définissant trois familles de directions qui sont : N40°E à N80°E, N115E à N140E et N165E à N180E (Fig. 4.24).



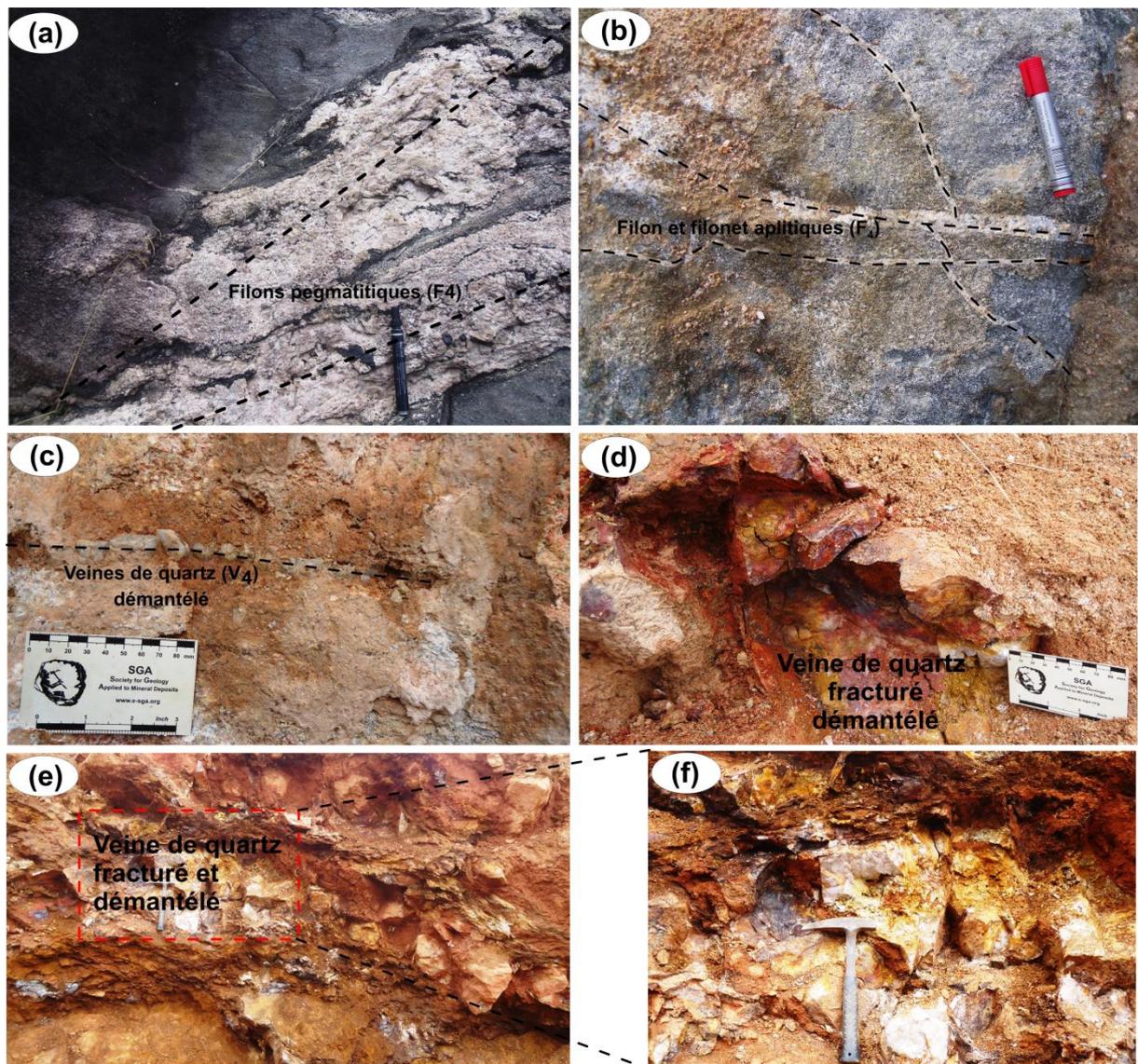
**Figure 4.24.** Quelques diaclasses  $F_4$  simples (b - c) et conjuguées (a et d).



**Figure 4.25.** Rosace de directions des joints secs dans les secteurs de Ndembara (a), de Yangosso (b) et de Ngogon-goubou (c).

#### IV.2.4.3- Filons et veines de quartz minéralisées

Les filons F<sub>4</sub> s'observent dans les granitoïdes de Tingou, Yangosso, Ngogon-goubou et Ndembara. Ce sont des filons aplitiques et/ou pegmatitiques d'épaisseur centimétrique à décimétrique, constitués de plusieurs familles, certaines précoces et d'autres tardives (Fig.4.25). Dans le manteau d'altération, on note la présence de veines minéralisées V<sub>4</sub> démantelé à quartz dominant et sulfures de texture massive (partie stérile) et alvéolaires (partie minéralisée). Ces veines sont de direction variable allant de NE-SW, ENE-SSW à pratiquement E-W (Fig. 4.25c-f). Les sulfures rencontrés sont essentiellement de la pyrite et chalcoppyrite qui sont dans certains cas directement associés à l'or.



**Figure 4.26.** Autres éléments structuraux de la phase D<sub>4</sub>. (a, b) Filons pegmatitiques et aplitiques tardifs F<sub>4</sub> entrecoupés. Notez le déplacement relatif dextre en b ; (c, d, e, f) veines minéralisées V<sub>4</sub> encore visible dans le manteau d'altération.

### IV.3- ANALYSE MICROSTRUCTURALE

Les figures de déformation sont aussi présentes à l'échelle microscopique et sont visibles aussi bien dans les roches magmatiques déformées que dans les roches métamorphiques du secteur d'étude. Les roches métamorphiques ayant été affectées par un métamorphisme de degré moyen (faciès amphibolite). Ceci a provoqué dans la plupart des cas, les déformations et la formation de quelques microstructures particulières depuis l'état magmatique à l'état post magmatique ou solide, en passant par l'état sub-magmatique.

#### IV.3.1- Microstructures de déformation à l'état magmatique

L'écoulement du magma contenant des matériaux rigides semble être le mécanisme de déformation typique dans ces roches. La déformation à l'état magmatique est celle que subit un bain silicaté contenant des cristaux et où la quantité du liquide est suffisamment grande pour minimiser l'interaction entre les grains et empêcher la formation des charpentes solides (Tommasi et al., 1994). Cette déformation peut se caractériser comme étant l'écoulement du magma contenant des cristaux sans déformation de ces derniers.

Dans la localité de Ngoura, les microstructures de déformation à l'état magmatique s'observent uniquement sur les roches des ensembles magmatiques. Elle est à l'origine de l'allongement préférentiel des cristaux de feldspath non déformés, soulignant la fluidalité planaire ou foliation magmatique dans les granitoïdes (Figs. 4.26a-b).

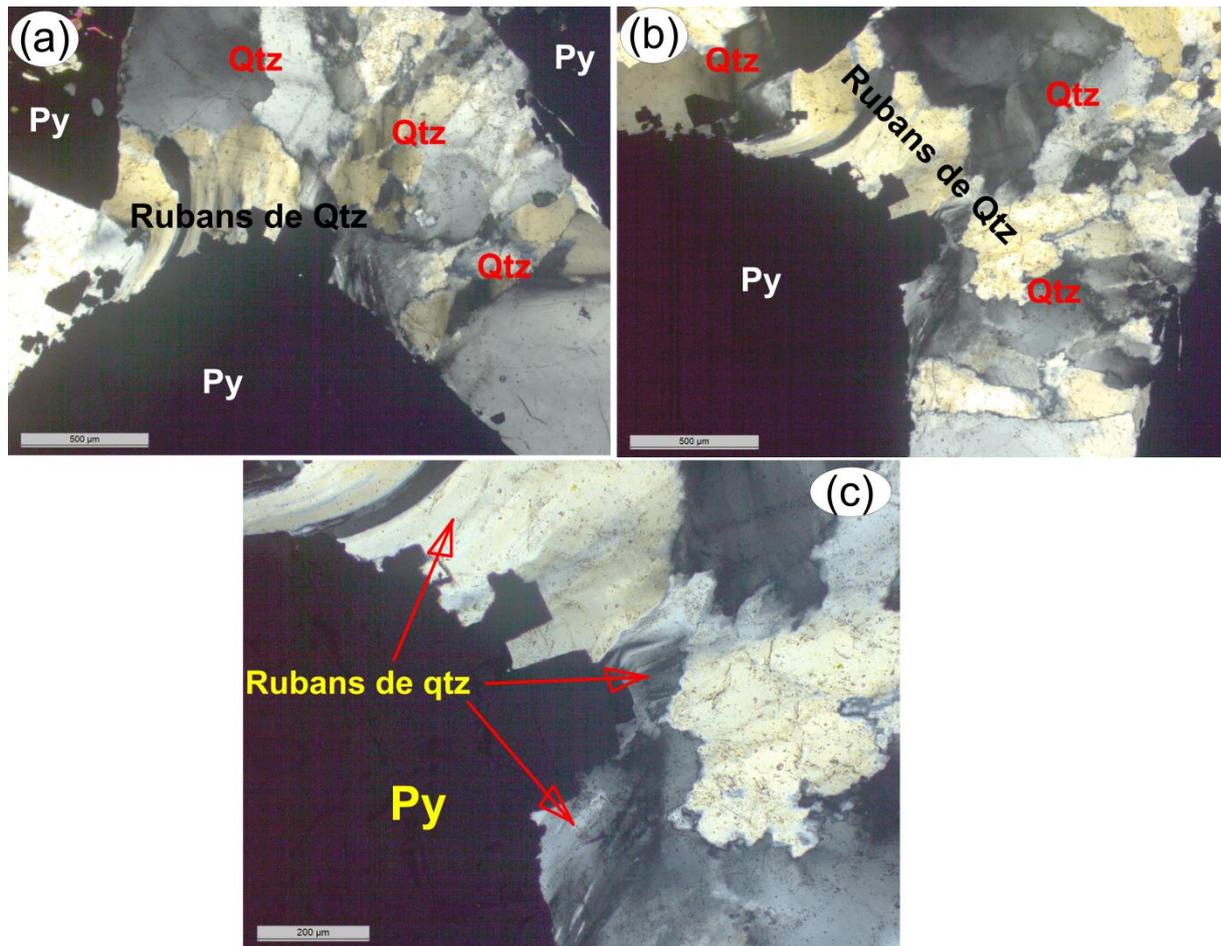


**Figure 4.27.** Quelques marqueurs de la déformation de l'état magmatique. (a) Allongement préférentiel des cristaux de feldspath non déformés et (b) Notez la macle simple de l'orthose encore visible.

#### IV.3.2- Microstructures de déformation à l'état sub-magmatique

L'état sub-magmatique peut être défini comme des déformations qui prennent en compte l'écoulement du magma et des cristaux avec déformation de ces derniers. L'état sub-magmatique marque donc la transition entre l'état magmatique et l'état solide.

Dans le secteur Ngoura-Colomines, les marqueurs de la déformation à l'état sub-magmatique s'expriment par le comportement des cristaux précoces de quartz et feldspath. Ces marqueurs sont représentés ici par des rubans de quartz étirés et ployés, certains rubans pouvant atteindre plus de 900  $\mu\text{m}$  de long (Figs. 4.27a-c). La gamme de températures envisageables pour cette déformation est d'environ 300-450° ceci parce que la température de ductilité et/ou d'ondulosité du quartz est connue et se situe généralement entre < 300 et 350°C.

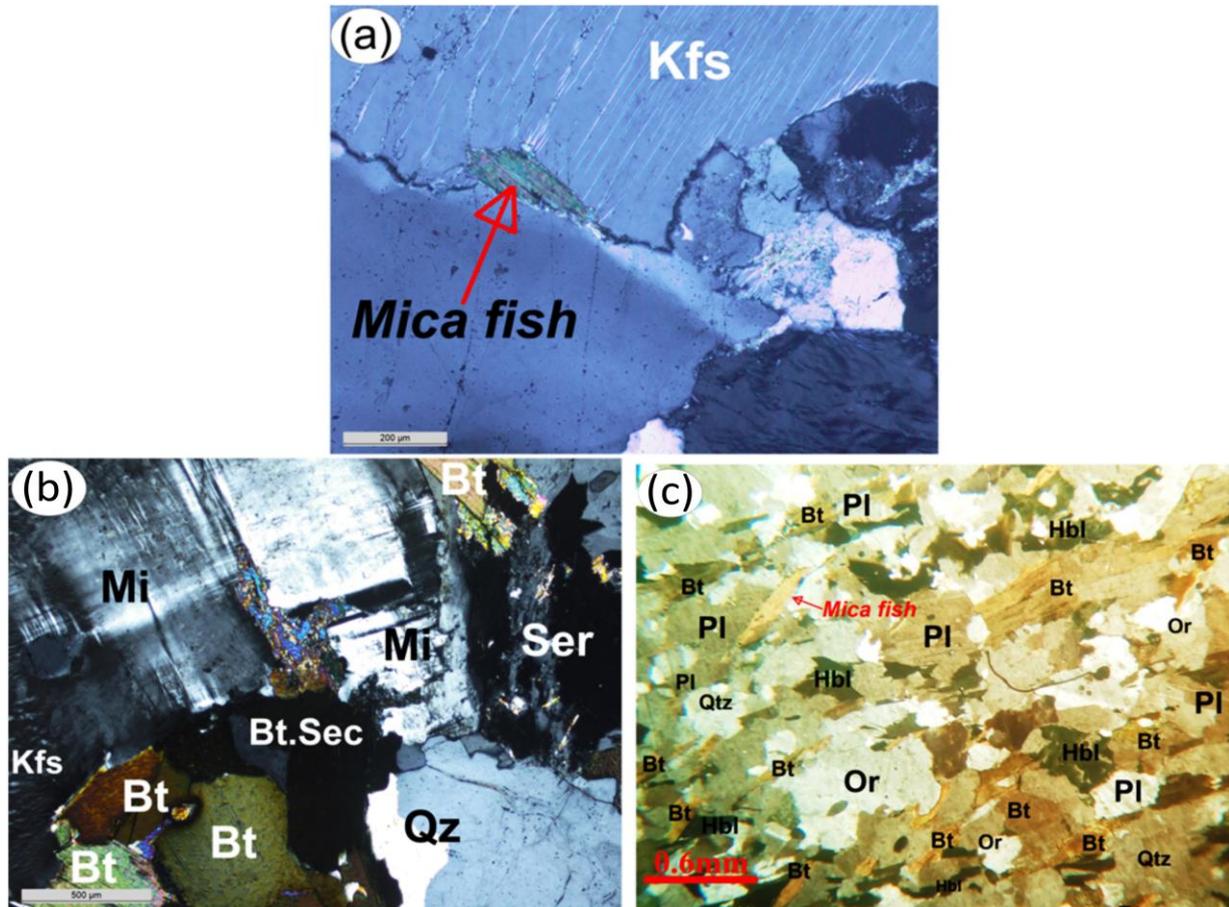


**Figure 4.28.** Quelques marqueurs de la déformation de l'état sub-magmatique. Notez les rubans de quartz étirés et ployés.

#### IV.3.3- Microstructures de déformation a l'état solide

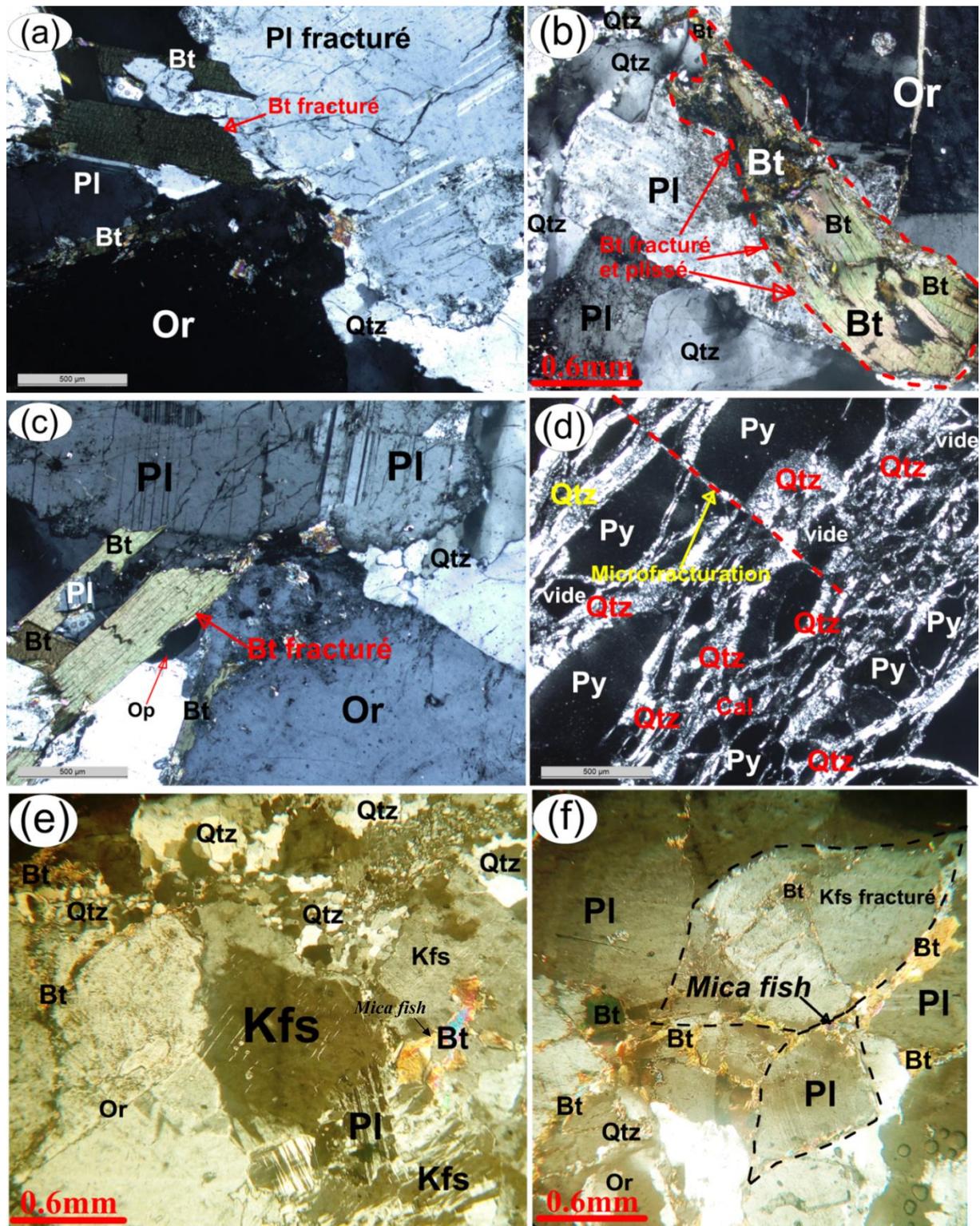
Dans la zone d'étude, ce type de déformation a été observée sur les roches magmatiques et métamorphiques et est matérialisée par : (1) les macles mécaniques (en fuseau ou en biseau) de certains cristaux de plagioclase (Figs. 4.28b-c et Fig. 4.29); (2) les sigmoïdes asymétriques de feldspath alcalin, plagioclase et pyrite micro-fracturés (Fig. 4.29) dans les orthogneiss; (3) les agrégats polycristallins (avec des sous grains) composés essentiellement de quartz et de feldspath alcalin (Fig. 4.28b et Fig. 4.29 a,b et e) ; (4) la présence des cristaux

de biotite en forme de poisson («*mica fish*») qui colmatent les zones d'ombre des porphyroblastes de feldspath alcalin et soulignent de la schistosité mylonitique  $S_2$ . Ceci étant une caractéristique particulière de la déformation a l'état solide dans les zones de cisaillement (Fig.4.28a, c et 4.29f).



**Figure 4.29.** Les marqueurs de la déformation de l'état solide. (a et c) Notez les « *mica fish* » disposées suivant la direction de la schistosité mylonitique  $S_2$ , (b) Eextinction ondulante des cristaux de quartz.

L'on note aussi dans le même type de déformation, l'extinction ondulante des cristaux de quartz (Figs.4.28b et Figs.4.29a-c et e), des myrmékites et des macles du pericline dans les cristaux de microcline (Fig. 3.3b, Fig. 3.3c et Fig. 3.5d du chapitre précédent Figs.4.28b) préférentiellement disposés en bordure des feldspaths alcalins suggérant ainsi qu'une contrainte locale aurait favorisé le processus de substitution. Les porphyroblastes de feldspath alcalin et de plagioclase, les cristaux de pyrite et les paillettes de biotite présentent aussi des micro-fractures transversales (Figs.4.28 et 4.29).



**Figure 4.30.** Autres marqueurs de la déformation de l'état solide. (a) Micro-fractures transversales dans les cristaux de plagioclase, (b) Lamelle de biotite fracturée et plissoté, (c) Paillettes de biotite présentant des micro-fractures transversales, (d) Micro-fractures transversales dans les cristaux de pyrite, (e et f) Porphyroblastes de feldspath asymétriques, cristaux de biotite en forme de poissons (*mica fish*) qui colmatent les zones d'ombre des porphyroblastes de feldspath, micro-fractures transversales dans les porphyroblastes de feldspath alcalin.

**Tableau 4. 3.** Répartition des éléments structuraux par phase de déformation

<b>Phase de déformation</b>	<b>Éléments structuraux</b>	<b>Nature des formations affectées</b>
D <sub>1</sub>	Foliation S <sub>1</sub> , linéation minérale Lm <sub>1</sub> , linéation d'étirement minérale Le <sub>1</sub> , pli P <sub>1</sub> , boudin B <sub>1</sub>	Gneiss et amphibolite
D <sub>2</sub>	boudins en échelons tardi-D <sub>1</sub> à syn-D <sub>2</sub> , Schistosité mylonitique S <sub>2</sub> , plis P <sub>2</sub> , cisaillement C <sub>2</sub> , linéation Lm <sub>2</sub> et Le <sub>2</sub> , <i>Strain-Slip</i> et les structures S-C	Granite à biotite, granodiorite, orthogneiss
D <sub>3</sub>	Pli P <sub>3</sub> , cisaillement C <sub>3</sub>	Granite à biotite et amphibolite
D <sub>4</sub>	Diaclases et filons F <sub>4</sub> et Veines minéralisées V <sub>4</sub>	Gneiss, amphibolite, granite à biotite, granodiorite, orthogneiss

## CONCLUSION

L'analyse morpho-structurale, au moyen des techniques de la télédétection à travers les images Landsat-7 ETM+ a permis de mettre en évidence les réseaux de fracture d'échelle kilométrique. Ces différentes anomalies linéaires ont ensuite été confrontées aux données de terrain et validées sur la carte litho-structurale.

L'analyse structurale aux échelles méso à micro-copiques a permis de mettre en évidence une chronologie à quatre (04) phases de déformation affectant le secteur de Ngoura-Colomines (Tab. 4.3). Une phase de déformation D<sub>1</sub> de tectonique compressive, une phase D<sub>2</sub> dite de tectonique transcurrente en transpression, une phase D<sub>3</sub> dite de superposition tectonique compressive et une phase de déformation D<sub>4</sub> dite de tectonique cassante.

Par ailleurs, l'analyse microstructurale montre une déformation de certains minéraux tels que: (1) les porphyroblastes de feldspaths alcalins dont les cristaux sont sigmoïdales, micro-fracturés et fragmentés; (2) le plagioclase dont les cristaux présentent des macles mécaniques et des fractures perpendiculaires au plan de macle; (3) la biotite dont les cristaux présentent des micro-fracturations perpendiculaires au plan de clivage; (4) les rubans de quartz étirés et tordues. Ces résultats mettent en évidence l'évolution de la déformation depuis la phase magmatique jusqu'à la phase post-magmatique en contexte de cisaillement.

**CHAPITRE V.**  
**ETUDE GÉOCHIMIQUE**

*«L'espoir est une étrange chose qui se pense dans notre âme et inlassablement chante un air sans paroles et à jamais.»*  
-Emily Dickinson

## INTRODUCTION

Ce chapitre se propose d'étudier les principaux caractères chimiques des différents faciès lithologiques identifiés sur le terrain et confirmés lors de l'étude pétrographique. Vingt-trois (23) échantillons ont fait l'objet des analyses géochimiques sur roche totale à la Division des Sciences Géologiques et Planétaires de la *Californian Institute of Technology* aux Etats-Unis d'Amérique. Les conditions analytiques sont celles présentées au chapitre II.

L'étude pétrographique ainsi que la classification géochimique de [Debon et Le Fort \(1983\)](#) nous ont permis de subdiviser les roches magmatiques en granites, granodiorites, adamellites et tonalites ([Fig. 5.1a](#)). Le diagramme triangulaire des feldspaths de [O'connor \(1965\)](#) permet de constater que les adamellites sont en réalité des monzonites à quartz ([Fig. 5.1b](#)). Les roches métamorphiques analysées sont essentiellement les amphibolites. Les données géochimiques des échantillons représentatifs des granitoïdes et des roches métamorphiques sont consignées dans les [tableaux 5.1](#) et [5.2](#) respectivement. Le SiO<sub>2</sub> a été utilisé comme élément de corrélation des oxydes ce qui nous a permis de construire les diagrammes discriminants. Le terme ferromagnésien utilisé dans ce chapitre désigne la somme FeOt+MgO et le terme alcalin renvoie à la somme NaO+K<sub>2</sub>O.

Les concentrations en terres rares des roches plutoniques ont été normalisées aux chondrites en utilisant les valeurs d'[Evensen et al. \(1978\)](#) tandis que les éléments des diagrammes multi-éléments sont normalisés en utilisant les valeurs de [Thompson et al. \(1984\)](#).

L'ensemble des résultats présentés dans ce chapitre permettent de ressortir les caractéristiques géochimiques essentielles des formations étudiées et ainsi de discuter de leur nature, leur origine et leur contexte géotectonique.

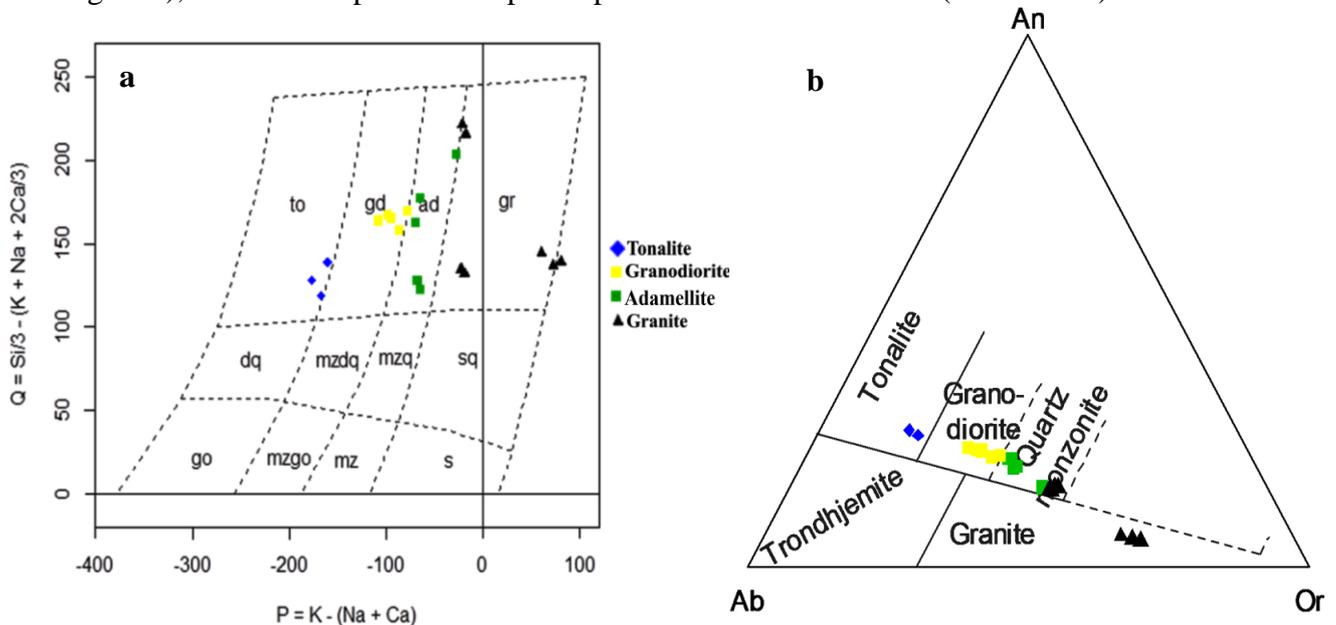
## V.I- ENSEMBLE MAGMATIQUE

### V.1.1- Granites

#### V.1.1.1- *Eléments majeurs*

Les granites ([Tab. 5.1](#)) sont caractérisés par des teneurs élevées et variables en silice ( $66,67 < \text{SiO}_2 < 77,66\%$ ). Les teneurs en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> sont comprises entre 12,67 et 15,50%. Ces roches sont riches en alcalins (NaO + K<sub>2</sub>O > 6%) et pauvres en ferromagnésiens (FeOt + MgO < 5%). Ces fortes teneurs en alcalins sont accompagnées de faibles teneurs en CaO (0,85–2,25%). Les teneurs en TiO<sub>2</sub> sont faibles (< 1%). Les variations de SiO<sub>2</sub> avec d'autres

éléments majeurs sont illustrées sur les diagrammes binaires de type Harker (Fig. 5.2). Dans ces diagrammes, les points représentatifs des granites de Ngoura-Colomines montrent une diminution des teneurs en  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  et  $\text{MgO}$  lorsque  $\text{SiO}_2$  augmente (corrélation négative), mais une dispersion des points pour le  $\text{CaO}$  et les alcalins ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ).

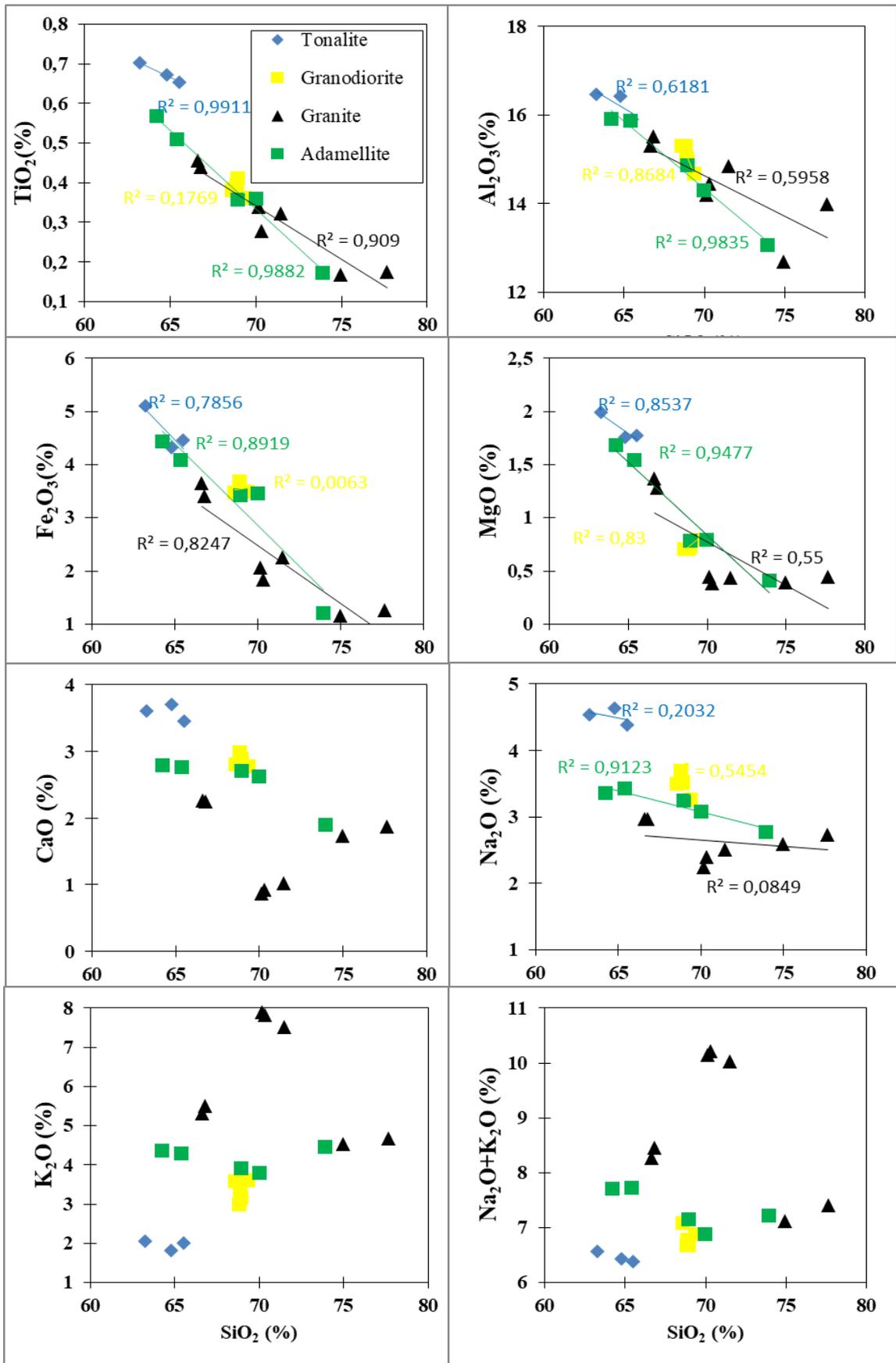


**Figure 5.1.** (a) Localisation des granitoïdes de Ngoura-Colomines dans le diagramme millicationique de Debon Le Fort (1983). (*gr* = granite; *ad* = adamellite; *gd* = granodiorite et *to* = tonalite); (b) Position des granitoïdes de Ngoura-Colomines dans le diagramme triangulaire des feldspaths normatifs de O'Connor (1965).

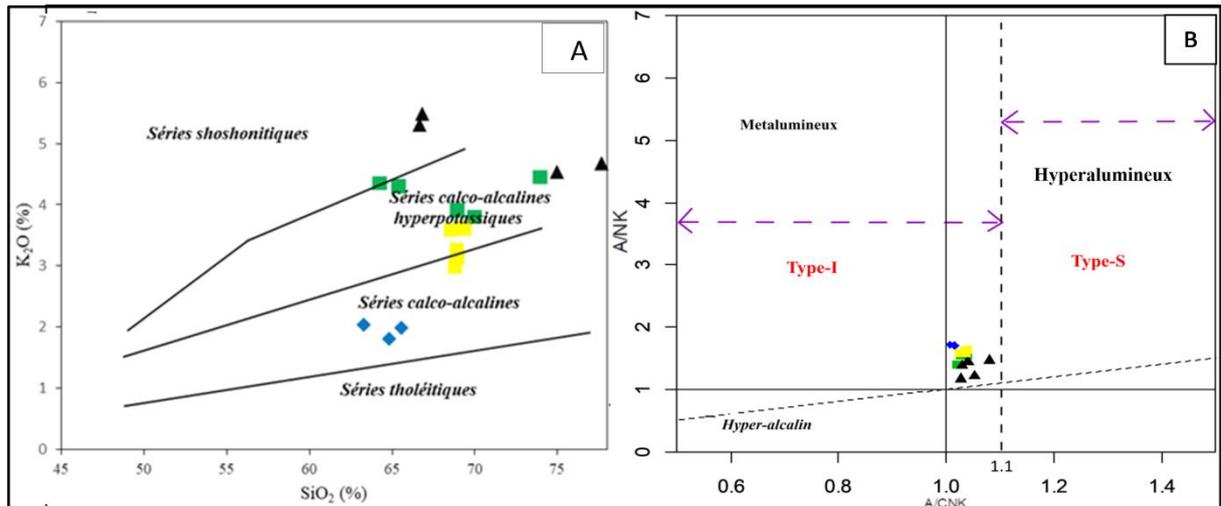
Les teneurs élevées en alcalins et faibles en  $\text{TiO}_2$  caractérisent les séries calco-alcalines. Cependant la forte richesse en  $\text{K}_2\text{O}$  (1,80-7,90%) de ces roches est indicatrice des séries calco-alcalines hyperpotassiques à shoshonitiques. Cette interprétation est confirmée par le diagramme  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  où les points représentatifs des granites tombent dans les champs des séries fortement calco-alcalines et shoshonitiques (Fig. 5.3a). Dans le diagramme molaire  $\text{A/NK}$  vs.  $\text{A/CNK}$  (Fig. 5.3b), les granites étudiés sont hyperalumineux de type-I.

#### V.1.1.2- Éléments en trace

Les granites de Ngoura-Colomines (Tab. 5.1) présentent des teneurs fortes en éléments lithophiles notamment en Ba (657,53-993,32 ppm), Rb (126,15-253,79 ppm) et Sr (155,15-244,53). Par contre les teneurs en éléments de transition de ces roches varient de faibles à modérées (Co: 6,30-13,86 ppm; Cr: 0,62-94,59 ppm et Y: 7,97-17,85 ppm) à fortes (Zr: 176,40-269,42 ppm). Les rapports Rb/Sr sont faibles dans ces granites (0,23-1,32).



**Figure 5.2.** Diagrammes de variation de quelques éléments majeurs en fonction de SiO<sub>2</sub> des granitoïdes de Ngoura-Colomines.



**Figure 5.3 :** a) Diagramme de variation de K<sub>2</sub>O en fonction de SiO<sub>2</sub> (Peccerillo et Taylor, 1976); b) Diagramme molaire A/NK en fonction de A/CNK (Shand, 1943) montrant le caractère hyperalumineux de type-I des granitoïdes de Ngoura-Colomines (même légende que la figure 5.1).

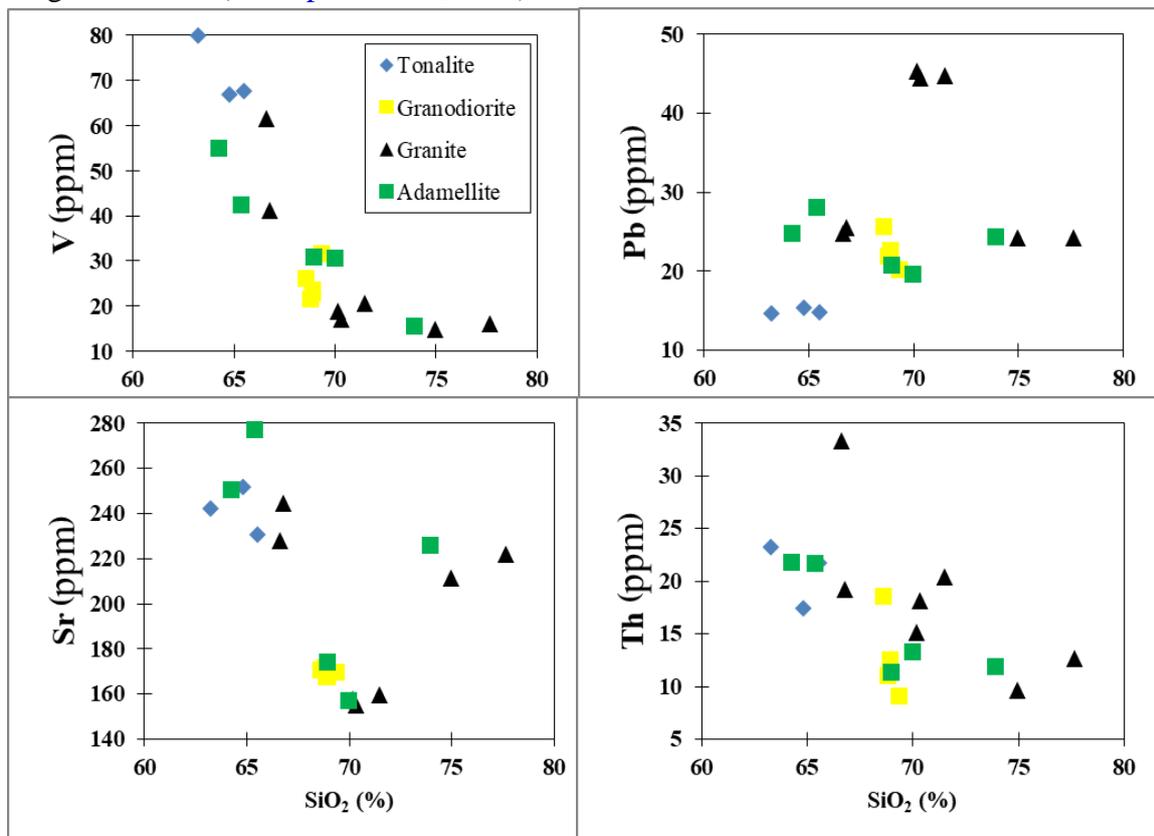
Dans les diagrammes binaires de variation des teneurs de quelques éléments en trace, notamment les éléments compatibles (V, Sr) et incompatibles (Pb, Th), avec la silice, des corrélations négatives s'observent pour le V et Th alors que Pb et Sr montrent plutôt des dispersions des points (Fig. 5.4). Les éléments de transition (éléments qui changent de comportement au cours de la différenciation), montre soit des corrélations négatives (Nb et Sc), soit des corrélations positives (Zr, Hf) avec SiO<sub>2</sub>, tandis que Co, Y, Ta, Rb montrent une légère dispersion des points (Fig. 5.5).

### V.1.1.3- Terres rares

Les concentrations en terres rares des granites sont variables ( $\Sigma\text{REE} = 94,869 - 276,850$  ppm). Les spectres des terres rares (Fig. 5.6A) montrent que les granites étudiés sont caractérisés par un enrichissement en terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes avec un fractionnement faible ( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 11,1-40,27$ ;  $\text{Ce}_N/\text{Sm}_N = 4,30-5,41$ ;  $\text{Gd}_N/\text{Yb}_N = 2,10-7,27$ ). L'on note aussi des anomalies positives en Ce et des anomalies faiblement à fortement négatives en europium ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,23-0,67$ ). Les anomalies positives en Ce seraient dues à l'altération des roches étudiées en conditions oxydantes, tels que révélées par les études pétrographiques, notamment l'abondance de la séricite et autres minéraux secondaires. Les anomalies négatives en europium traduisent le fractionnement du plagioclase.

Les spectres multi-éléments (Fig. 5.6B) montrent des anomalies négatives en TiO<sub>2</sub>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, Nb, Sr, Ta et Th, à l'exception de l'échantillon TAG2-4 qui présente des anomalies

faiblement positives en ces éléments; ces anomalies sont une caractéristique des roches d'origine crustale (Thompson et al., 1994).

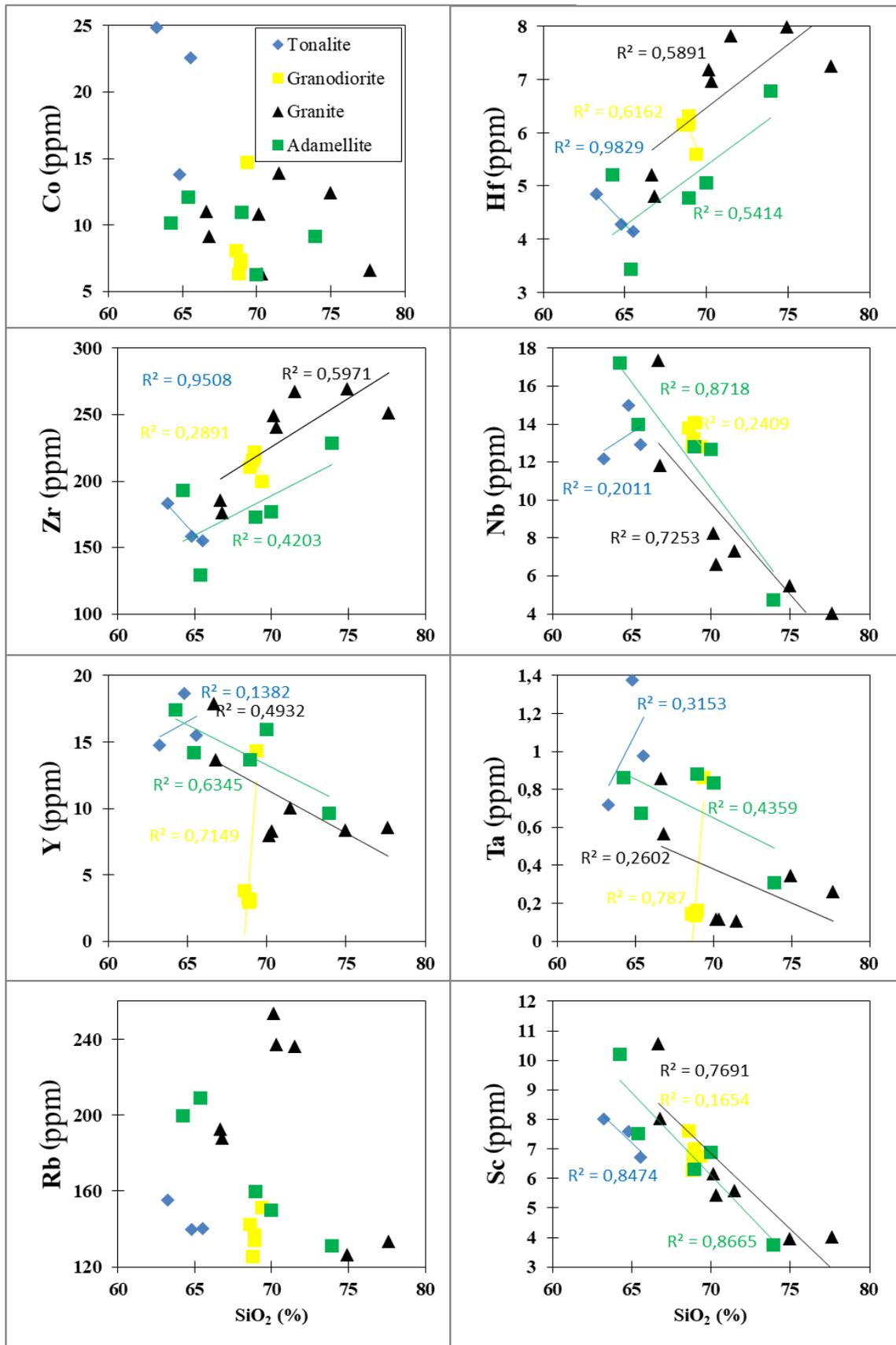


**Figure 5.4.** Diagramme de Harker de quelques éléments compatibles (colonne de gauche) et incompatibles (colonne de droite) des granitoïdes de Ngoura-Colomines.

## V.1.2- Granodiorites

### V.1.2.1- Éléments majeurs

Les teneurs en silice des granodiorites sont élevées et peu variables ( $68,57 < \text{SiO}_2 < 69,34\%$ ), mais relativement moins élevées par rapport à celles des granites (Tab. 5.2). Ces roches sont riches en  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (14,67-15,30%), en alcalins (6,67-7,08%) et très pauvres en  $\text{MgO}$  (0,70-0,79%) et en  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  (3,45-3,69%). Des corrélations négatives très peu prononcées existent entre la plupart des oxydes ( $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$  et  $\text{Na}_2\text{O}$ ) et le  $\text{SiO}_2$ . L'on note aussi une corrélation positive entre le  $\text{MgO}$  et le  $\text{SiO}_2$  tandis que les alcalins ( $\text{NaO}+\text{K}_2\text{O}$ ) montrent plutôt un regroupement des points (Fig. 5.2). Dans le diagramme  $\text{SiO}_2$  vs.  $\text{K}_2\text{O}$  de Peccerillo et Taylor (1976), tous les points représentatifs des granodiorites tombent dans le champ de la série calco-alcaline hyper-potassique (Fig. 5.3a). Tout comme les granites, les granodiorites ont la signature géochimique des granites de type-I (Fig. 5.3b).



**Figure 5.5.** Diagrammes de Harker des quelques éléments de transition des granitoïdes de Ngoura-Colomines.

### ***V.1.2.2- Éléments en trace***

Les granodiorites sont caractérisées par leur richesse en Rb (125,33-151,22 ppm), Ba (539,26-743,68 ppm), Sr (167,47-171,67 ppm), Zr (199,81-221,66 ppm), Nb (27,39-81,25 ppm) et leur pauvreté en Y (2,92-14,33 ppm) et Cr (4,07-13,80 ppm). Aucune corrélation n'est observée entre la plupart des éléments en trace et la silice car ces éléments montrent soit un regroupement des points (cas du Sr), soit une légère dispersion des points (Co, Hf, Zn, Nb, Y, Ta, et Rb). Le Pb quant à lui présente des teneurs qui diminuent avec l'augmentation des teneurs en SiO<sub>2</sub> (Figs 5.4 et 5.5).

### ***V.1.2.3- Terres rares***

Les granodiorites sont légèrement moins riches en REE (moyenne  $\Sigma\text{REE} = 133,59$  ppm) que les granites (moyenne  $\Sigma\text{REE} = 171,37$  ppm). Les spectres des terres rares des granodiorites sont fractionnés (Fig. 5.6c) et montrent tout comme ceux des granites un enrichissement en terres rares légères ( $\text{La}_N/\text{Yb}_N = 12,41-61,47$ ) par rapport aux terres rares moyennes lourdes ( $\text{Ce}_N/\text{Sm}_N = 3,74-5,64$ ) et aux terres rares lourdes ( $\text{Gd}_N/\text{Yb}_N = 1,96-7,00$ ). L'on note aussi des anomalies positives très peu prononcées en Ce comparées à celles des granites et des anomalies faiblement négatives à nulles en europium ( $\text{Eu}/\text{Eu}^* = 0,73-0,91$ ). Les spectres multi-éléments montrent des anomalies négatives en Ta, Sr, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et TiO<sub>2</sub> (Fig. 5.6d). Les anomalies en Ti renvoient très souvent à la destabilisation des biotites, celles du phosphore et du strontium étant typiquement liées au fractionnement cristallin. Ce qui traduit dans l'ensemble, d'une part, un degré de différenciation avancé, et d'autre part, une importante participation crustale dans leur genèse.

## **V.1.3- Adamellites**

### ***V.1.3.1- Éléments majeurs***

Les teneurs en silice des adamellites sont variables ( $64,22 < \text{SiO}_2 < 73,92\%$ ). Tout comme les granites et granodiorites, les adamellites sont riches en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (13,06-15,92%), en alcalins (6,87-7,71%) et pauvres en MgO (0,40-1,54%) et en Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (1,20-4,08%). En dehors du K<sub>2</sub>O qui présente une corrélation constante avec une légère dispersion des points, tous les autres oxydes montrent une corrélation négative avec le SiO<sub>2</sub>. Dans le diagramme SiO<sub>2</sub> vs. K<sub>2</sub>O, les points représentatifs des adamellites tombent dans le champ des séries calco-alcalines hyperpotassiques à l'exception de deux échantillons (TAG2-1 et TAG2-2) qui tombent à la transition entre les champs calco-alcalin hyperpotassique et shoshonitique (Fig.5.3a).

### **V.1.3.2- Éléments en trace**

Les adamellites sont riches en Rb (131,03-209,24 ppm), Ba (662,06-1079,77 ppm), Sr (156,88-277,30 ppm), Zr (129,54-228,25 ppm) et pauvres en Y (9,61-17,42 ppm), Nb (04,71-17,20 ppm) et Cr (1,85-48,89 ppm). Le Co, Nb, Y, Ta, Rb, et Sc montrent une corrélation négative avec le SiO<sub>2</sub> tandis que les éléments tels que Hf et Zr présentent des teneurs qui croissent avec l'augmentation des teneurs en SiO<sub>2</sub> (Figs 5.4 et 5.5).

### **V.1.3.3- Terres rares**

Les spectres des terres rares des adamellites sont fractionnés (Fig. 5.6e) montrent un enrichissement en terres rares légères  $La_N/Yb_N = 14,20 - 34,93$  par rapport aux terres rares lourdes ( $Gd_N/Yb_N = 2,12 - 4,71$ ). Ces spectres montrent également des anomalies positives en cerium et négatives en europium ( $Eu/Eu^* = 0,27 - 0,89$ ). Les spectres multi-éléments montrent des anomalies négatives très prononcées en Nb, Sr, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> et TiO<sub>2</sub> communément associées à importante participation crustale dans la genèse de ces roches (Fig. 5.6f).

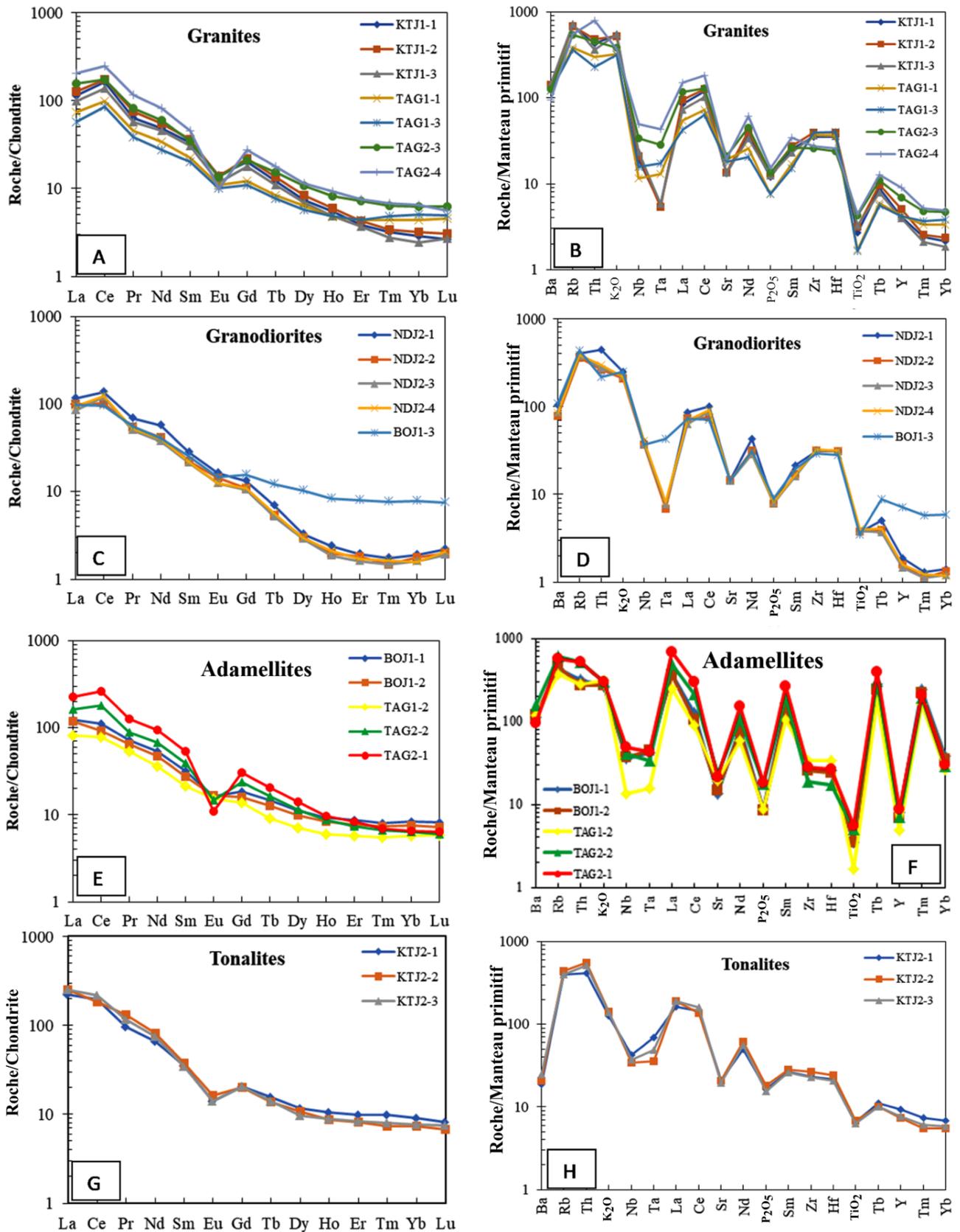
## **V.1.4- Tonalites**

### **V.1.4.1- Éléments majeurs**

Les teneurs en silice des tonalites sont modérées ( $63,27 < SiO_2 < 65,54\%$ ) caractéristiques des roches intermédiaires. Ces roches sont riches en Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (15,88-16,41%), en alcalins (6,37-6,56%). Les teneurs en ferromagnésiens (MgO: 1,75-1,99% ; Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> : 4,31-5,09%) sont plus élevées que dans les autres granitoïdes (granites, granodiorites et adamellites) précédemment décrits. Tous les oxydes montrent une corrélation négative avec le SiO<sub>2</sub>, exception faite des alcalins (Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O) et du K<sub>2</sub>O qui montrent une légère dispersion des points. Dans le diagramme molaire A/NK vs A/CNK (Shand, 1943), tous les échantillons de tonalites étudiées tombent dans le champ des roches peralumineuses de type-I (Fig.5.3b) ; tandis que dans le diagramme binaire K<sub>2</sub>O vs SiO<sub>2</sub>, les points représentatifs des tonalites tombent dans le champ des séries calco-alcalines (Fig.5.3a).

### **V.1.4.2- Éléments en trace**

Les tonalites sont plus riches en Rb (139,60-154,95 ppm), Ba (129,14-168,86 ppm), Sr (230,66-251,42 ppm), Zr (154,99-182,59 ppm), Nb (12,13-14,95 ppm), mais sont tout aussi riches en Y (14,71-18,65 ppm) et Cr (38,17-53,24 ppm) comparé aux granites, granodiorites et adamellites décrits ci-dessus. Le Co, Nb, Y, Ta montrent une dispersion des points tandis que Rb, Sc, Hf, Zr, présentent des corrélations négative avec l'augmentation des teneurs en SiO<sub>2</sub> (Figs 5.4 et 5.5).



**Figure 5.6.** Spectres des terres rares normalisés par rapport à la chondrite (A, C, E, G) et multi-éléments normalisés par rapport au manteau primitif (B, D, F, H) des granitoïdes de Ngoura-Colomines.

### V.1.4.3- Terres rares

Les spectres des terres rares des tonalites (Fig. 5.6g) sont homogènes et bien fractionnés ( $La_N/Yb_N = 24,43-34,75$  ;  $Ce_N/Sm_N = 4,94-6,21$  ;  $Gd_N/Yb_N = 2,27-2,76$ ) avec des anomalies négatives en europium ( $Eu/Eu^*=0,52-0,59$ ). Les spectres multi-éléments montrent des anomalies négatives très prononcées en Nb, Ta, Sr,  $P_2O_5$  et en  $TiO_2$  ce qui indique une importante participation crustale dans la genèse des roches étudiées (Fig. 5.6h).

## V.2- ENSEMBLE MÉTAMORPHIQUE

Les roches métamorphiques étudiées sont essentiellement des amphibolites qui affleurent en enclaves et en dalles dans les granitoïdes précédemment décrits. Ce sont des roches mafiques d'origine ignée comme le montre les diagrammes des figures 5.7 et 5.8 (De la Roche, 1965) où leurs points représentatifs sont alignés suivant la dorsale magmatique, tout près des basaltes. L'origine ignée de ces amphibolites est confirmée par le diagramme  $Na_2O$  vs  $K_2O$  de Smith (1982) où elles occupent le champ des roches magmatiques (Fig. 5.9a). Les rapports Cr/Th nuls ainsi que les rapports Th/La faibles (0,08-0,11), sont caractéristiques des volcanites typiques (Taylor and McLennan, 1985 ; Rollinson, 1996). Dans le diagramme AFM (Fig. 5.9b), ces roches appartiennent à la série tholéitique.

### V.2.1- Eléments majeurs

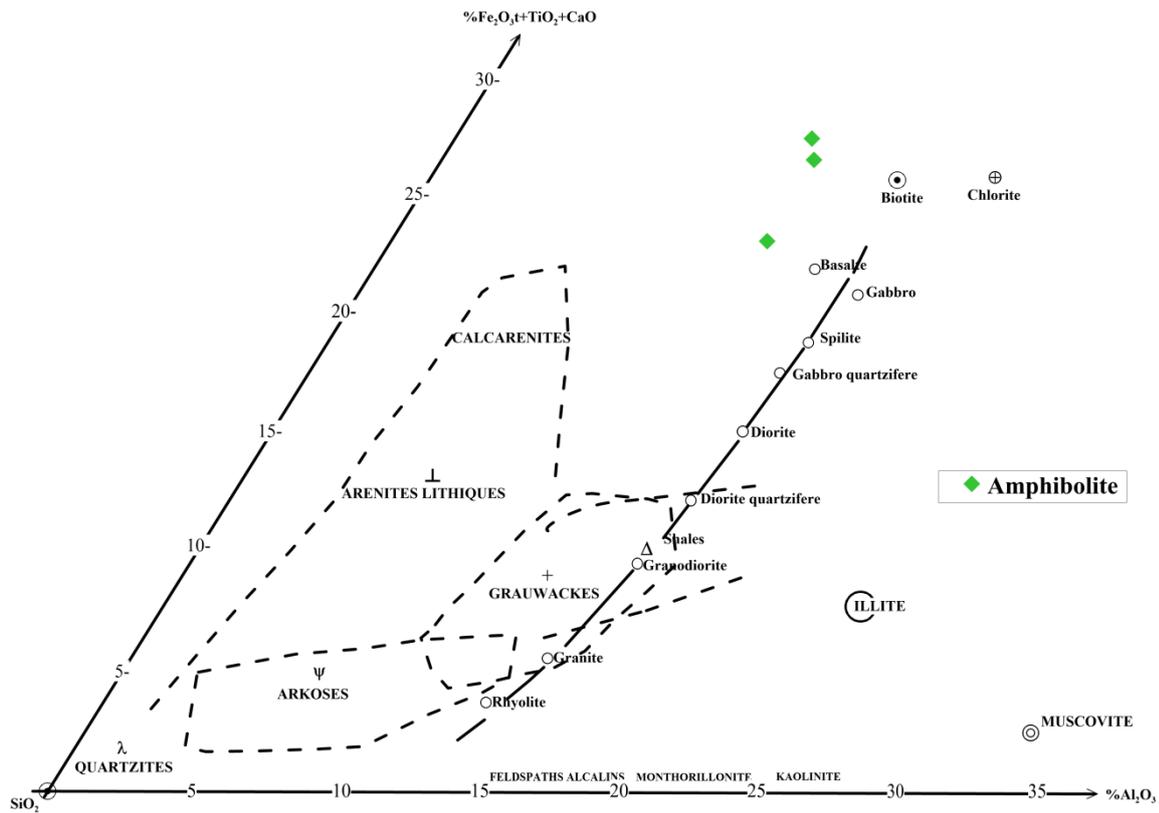
Les amphibolites de Ngoura-Colomines sont mafiques comme l'indique leurs teneurs en silice comprises entre 47, 47 et 48,85% (Tab. 5.2). Ce sont donc des métamafiques ou metabasites. Les faibles teneurs en silice sont compensées par des concentrations relativement élevées en  $Fe_2O_3$  (13,75-14,22%), MgO (6,36 – 6,74%) et CaO (9,98 – 10,71%). Les autres éléments majeurs sont en très faibles proportions dans la roche ( $TiO_2$ : 1,86 - 1,96%;  $K_2O$  : 1,11 – 1,21% ;  $Na_2O$  : 2,56 – 2,80%).

Dans les diagrammes de variation de quelques éléments majeurs en fonction de MgO (Fig. 5.10),  $Al_2O_3$ ,  $Na_2O$  et  $K_2O$  montrent une corrélation négative tandis que les corrélations positives sont observées pour le  $TiO_2$ , CaO,  $Fe_2O_3$  MnO et contrairement au  $P_2O_5$  qui montre plutôt une dispersion des points.

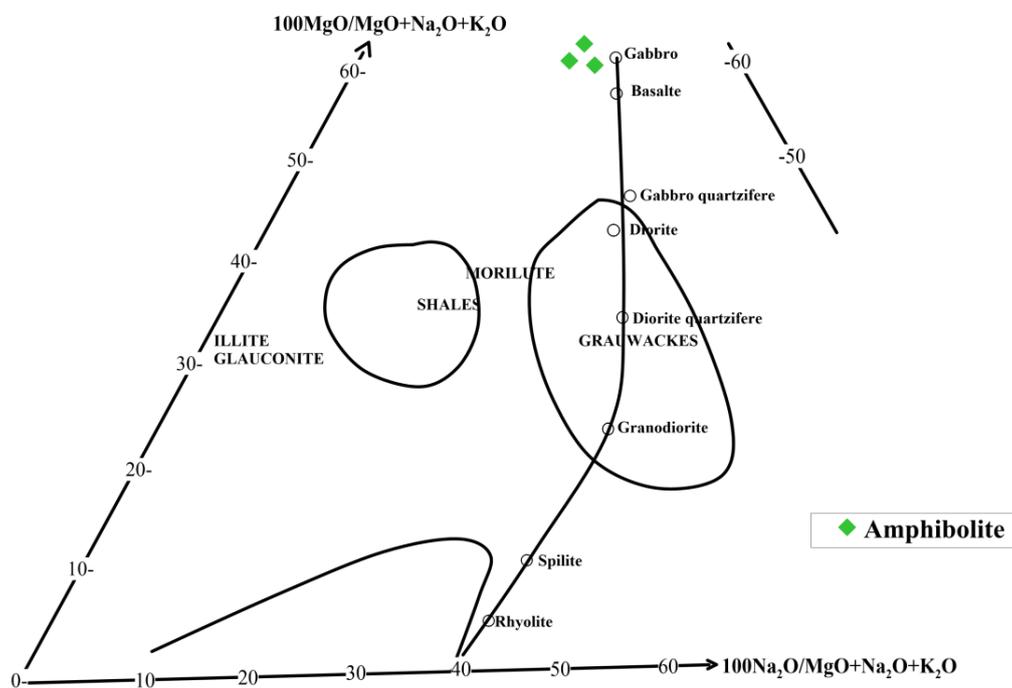
**Tableau 5.1 :** Compositions chimiques et rapports inter-éléments des échantillons représentatifs des granitoïdes de Ngoura-Colomines.

	Adamelite					Granite							Tonalite			Granodiorite				
Echant.	BOJ1-1	BOJ1-2	TAG1-2	TAG2-2	TAG2-1	KTJ1-1	KTJ1-2	KTJ1-3	TAG1-1	TAG1-3	TAG2-3	TAG2-4	KTJ2-1	KTJ2-2	KTJ2-3	NDJ2-1	NDJ2-2	NDJ2-3	NDJ2-4	BOJ1-3
<b>SiO<sub>2</sub></b>	69,99	68,95	73,93	65,37	64,23	70,35	71,50	70,17	77,66	74,96	66,81	66,65	64,81	63,27	65,55	68,58	68,80	68,90	68,92	69,35
<b>TiO<sub>2</sub></b>	0,36	0,36	0,17	0,51	0,57	0,28	0,32	0,34	0,17	0,17	0,44	0,46	0,67	0,70	0,65	0,38	0,39	0,39	0,41	0,36
<b>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	14,30	14,86	13,06	15,88	15,92	14,44	14,86	14,19	13,99	12,68	15,51	15,31	16,41	16,45	15,89	15,30	15,30	15,04	14,95	14,68
<b>Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	3,45	3,42	1,20	4,08	4,43	1,83	2,26	2,07	1,26	1,15	3,40	3,65	4,32	5,10	4,45	3,48	3,45	3,61	3,69	3,49
<b>MgO</b>	0,79	0,78	0,41	1,55	1,68	0,38	0,44	0,44	0,44	0,39	1,28	1,37	1,76	1,99	1,77	0,71	0,70	0,73	0,75	0,79
<b>CaO</b>	2,62	2,71	1,89	2,76	2,80	0,92	1,02	0,86	1,86	1,73	2,24	2,26	3,70	3,60	3,45	2,81	2,98	2,88	2,89	2,78
<b>Na<sub>2</sub>O</b>	3,08	3,24	2,77	3,42	3,36	2,39	2,51	2,25	2,73	2,59	2,97	2,97	4,62	4,53	4,38	3,50	3,69	3,51	3,53	3,26
<b>K<sub>2</sub>O</b>	3,80	3,91	4,45	4,30	4,35	7,81	7,51	7,90	4,68	4,54	5,49	5,31	1,81	2,04	1,99	3,59	2,99	3,26	3,15	3,61
<b>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub></b>	0,09	0,09	0,09	0,18	0,19	0,13	0,14	0,13	0,08	0,08	0,14	0,16	0,17	0,19	0,16	0,08	0,08	0,08	0,09	0,09
<b>MnO</b>	0,05	0,05	0,01	0,05	0,05	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04	0,04	0,06	0,07	0,06	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05
<b>LOI</b>	0,50	0,51	0,49	0,48	0,51	0,48	0,60	0,55	0,53	0,45	0,47	0,45	0,65	0,69	0,60	0,53	0,43	0,50	0,43	0,46
<b>Somme</b>	98,68	98,51	98,17	98,28	97,81	98,77	100,79	98,59	103,08	98,48	98,54	98,39	98,46	98,06	98,48	98,62	98,56	98,60	98,56	98,62
<b>Na<sub>2</sub>O+K<sub>2</sub>O</b>	6,88	7,15	7,23	7,72	7,71	10,21	10,02	10,15	7,41	7,13	8,46	8,28	6,43	6,57	6,37	7,09	6,68	6,77	6,68	6,88
<b>Trace</b>																				
<b>Sc</b>	6,875	6,319	3,747	7,523	10,209	5,430	5,583	6,147	4,008	3,966	8,043	10,574	7,574	7,989	6,703	7,619	6,279	6,764	7,009	6,774
<b>V</b>	30,559	30,758	15,630	42,494	55,000	17,150	20,517	18,895	16,066	14,778	41,196	61,608	66,798	79,839	67,423	26,087	21,658	22,840	23,466	31,712
<b>Cr</b>	1,852	12,067	14,961	38,182	48,898	n.d.	8,090	0,624	5,977	29,383	33,197	94,599	38,172	53,241	40,962	12,297	5,595	7,151	4,071	13,801
<b>Co</b>	6,252	10,927	9,143	12,088	10,117	6,310	13,866	10,842	6,563	12,418	9,144	10,999	13,739	24,811	22,526	8,068	6,350	7,385	7,168	14,694
<b>Rb</b>	150,031	159,878	131,036	209,244	199,719	237,232	236,340	253,797	133,443	126,514	187,733	192,811	139,608	154,957	140,121	142,151	125,333	133,786	136,836	151,223
<b>Sr</b>	156,883	173,916	226,004	277,308	250,771	155,158	159,747	157,434	222,089	211,181	244,535	227,911	251,429	242,055	230,668	170,528	171,672	167,475	167,748	169,825
<b>Y</b>	15,932	13,684	9,610	14,201	17,425	8,280	10,060	7,977	8,578	8,329	13,675	17,857	18,652	14,719	15,471	3,788	3,189	2,925	3,159	14,332
<b>Zr</b>	177,178	172,785	228,256	129,541	192,663	240,552	267,158	249,290	251,528	269,430	176,407	185,433	158,022	182,595	154,999	210,295	216,073	218,770	221,668	199,812
<b>Nb</b>	12,682	12,796	4,713	13,969	17,203	6,620	7,301	8,236	4,040	5,472	11,809	17,356	14,956	12,138	12,902	13,780	12,835	13,219	14,057	12,828
<b>Mo</b>	0,163	0,300	n.d.	0,356	0,173	0,366	0,775	n.d.	n.d.	0,251	0,042	0,390	0,343	0,377	0,221	0,182	0,041	0,066	n.d.	0,218
<b>Cs</b>	6,136	6,416	1,884	4,509	5,427	2,285	2,270	2,671	1,869	1,704	4,156	4,674	5,076	5,403	4,814	2,991	2,884	3,011	3,108	6,431
<b>Ba</b>	773,006	820,086	827,453	1079,770	662,062	972,679	971,397	993,328	842,711	843,674	863,988	657,538	129,142	141,751	168,869	724,505	539,266	590,087	581,652	743,685
<b>Hf</b>	5,056	4,775	6,775	3,422	5,215	6,971	7,814	7,178	7,253	7,991	4,806	5,204	4,274	4,838	4,130	6,150	6,154	6,174	6,307	5,590

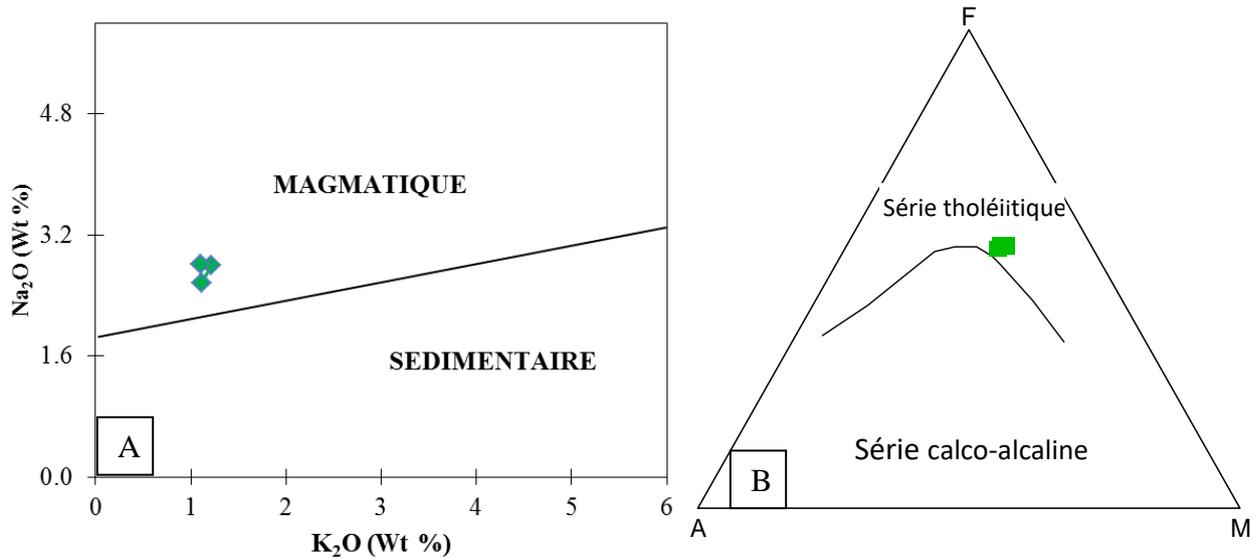
<b>Ta</b>	0,834	0,881	0,310	0,675	0,861	0,115	0,106	0,116	0,259	0,346	0,567	0,857	1,375	0,718	0,974	0,142	0,137	0,155	0,164	0,862
<b>W</b>	0,290	1,656	0,752	0,795	0,635	0,558	1,116	1,668	0,526	0,653	0,807	0,496	0,656	1,289	1,433	0,459	0,558	1,205	0,529	2,530
<b>Tl</b>	0,526	0,522	0,871	0,813	0,753	1,960	2,242	2,571	1,001	0,892	0,847	1,244	0,711	1,051	1,001	0,868	0,431	0,520	0,342	0,580
<b>Pb</b>	19,663	20,778	24,322	28,116	24,753	44,413	44,689	45,345	24,215	24,224	25,466	24,719	15,326	14,524	14,717	25,644	21,955	22,660	22,033	20,139
<b>Th</b>	13,288	11,370	11,845	21,727	21,799	18,188	20,405	15,129	12,665	9,593	19,210	33,326	17,359	23,244	21,663	18,546	11,009	11,465	12,498	9,129
<b>U</b>	1,785	1,838	1,315	1,202	2,000	3,003	2,847	2,713	1,394	1,458	1,391	2,048	2,273	1,794	1,770	1,108	1,125	1,122	1,152	1,621
<b>REE</b>																				
<b>La</b>	29,963	29,005	20,027	39,478	55,380	27,592	30,932	23,993	17,936	13,853	38,151	49,637	53,793	62,090	62,008	28,373	24,391	20,793	22,824	23,927
<b>Ce</b>	70,590	58,755	49,312	115,956	166,165	103,622	109,995	88,069	63,219	54,615	110,387	157,570	125,918	117,440	137,121	87,265	64,856	76,430	79,172	60,806
<b>Pr</b>	6,972	6,228	5,142	8,578	12,132	6,143	7,162	5,518	4,343	3,697	7,769	11,200	9,180	12,544	11,203	6,693	5,315	4,838	5,063	5,402
<b>Nd</b>	25,129	22,266	17,219	31,961	44,620	22,779	25,926	21,311	16,145	12,979	28,122	38,500	31,237	38,572	35,133	26,997	19,933	17,951	18,998	19,472
<b>Sm</b>	4,842	4,229	3,259	6,034	8,263	5,108	5,582	4,704	3,411	3,066	5,323	7,021	5,432	5,732	5,328	4,333	3,451	3,279	3,384	3,917
<b>Eu</b>	0,940	0,967	0,888	0,859	0,641	0,823	0,799	0,677	0,637	0,579	0,788	0,577	0,823	0,940	0,815	0,944	0,829	0,714	0,714	0,848
<b>Gd</b>	3,748	3,284	2,799	4,869	6,242	4,072	4,472	3,618	2,457	2,235	4,279	5,627	4,178	4,124	4,147	2,671	2,226	2,132	2,252	3,159
<b>Tb</b>	0,543	0,473	0,341	0,605	0,762	0,456	0,501	0,410	0,310	0,287	0,571	0,666	0,582	0,520	0,522	0,259	0,203	0,193	0,210	0,458
<b>Dy</b>	2,858	2,501	1,790	2,915	3,560	1,863	2,141	1,754	1,605	1,469	2,742	2,904	2,971	2,725	2,447	0,826	0,756	0,728	0,748	2,585
<b>Ho</b>	0,524	0,474	0,336	0,491	0,551	0,314	0,336	0,275	0,268	0,275	0,459	0,524	0,590	0,498	0,501	0,134	0,113	0,106	0,119	0,474
<b>Er</b>	1,435	1,270	0,958	1,231	1,372	0,637	0,707	0,610	0,727	0,725	1,193	1,237	1,638	1,350	1,388	0,320	0,301	0,264	0,282	1,339
<b>Tm</b>	0,206	0,190	0,141	0,169	0,177	0,081	0,087	0,071	0,112	0,125	0,163	0,174	0,253	0,189	0,205	0,045	0,038	0,038	0,042	0,195
<b>Yb</b>	1,364	1,251	0,952	1,057	1,070	0,471	0,521	0,402	0,727	0,836	1,027	1,072	1,486	1,206	1,278	0,312	0,295	0,264	0,260	1,301
<b>Lu</b>	0,206	0,183	0,149	0,152	0,162	0,067	0,077	0,068	0,115	0,127	0,159	0,141	0,207	0,170	0,189	0,055	0,050	0,048	0,052	0,192
<b>ΣREE</b>	149,322	131,076	103,313	214,355	301,098	174,027	189,238	151,480	112,012	94,869	201,135	276,850	238,289	248,100	262,284	159,228	122,757	127,779	134,120	124,075
<b>Lan/YbN</b>	14,827	15,643	14,204	25,203	34,937	39,533	40,044	40,274	16,658	11,184	25,072	31,268	24,435	34,760	32,746	61,474	55,832	53,063	59,261	12,412
<b>CeN/SmN</b>	3,519	3,354	3,653	4,640	4,855	4,898	4,757	4,520	4,474	4,300	5,007	5,418	5,596	4,947	6,213	4,862	4,536	5,628	5,648	3,748
<b>GdN/YbN</b>	2,220	2,121	2,376	3,722	4,715	6,985	6,932	7,271	2,732	2,160	3,367	4,244	2,272	2,764	2,622	6,928	6,101	6,515	7,002	1,962
<b>Eu/Eu*</b>	0,675	0,793	0,899	0,484	0,273	0,551	0,489	0,502	0,673	0,676	0,505	0,281	0,528	0,591	0,530	0,848	0,914	0,825	0,791	0,737
<b>Ce/Ce*</b>	1,175	1,052	1,169	1,516	1,542	1,915	1,778	1,8421	1,723	1,836	1,543	1,608	1,363	1,012	1,252	1,524	1,370	1,834	1,772	1,287



**Figure 5.7.** Position des amphibolites de Ngoura-Colomines dans le diagramme triangulaire de De la Roche (1965).



**Figure 5.8.** Position des amphibolites de Ngoura-Colomines dans le diagramme des silico-aluminates  $100\text{MgO}/(\text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  en fonction de  $100\text{Na}_2\text{O}/(\text{MgO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})$  (De la Roche, 1965).



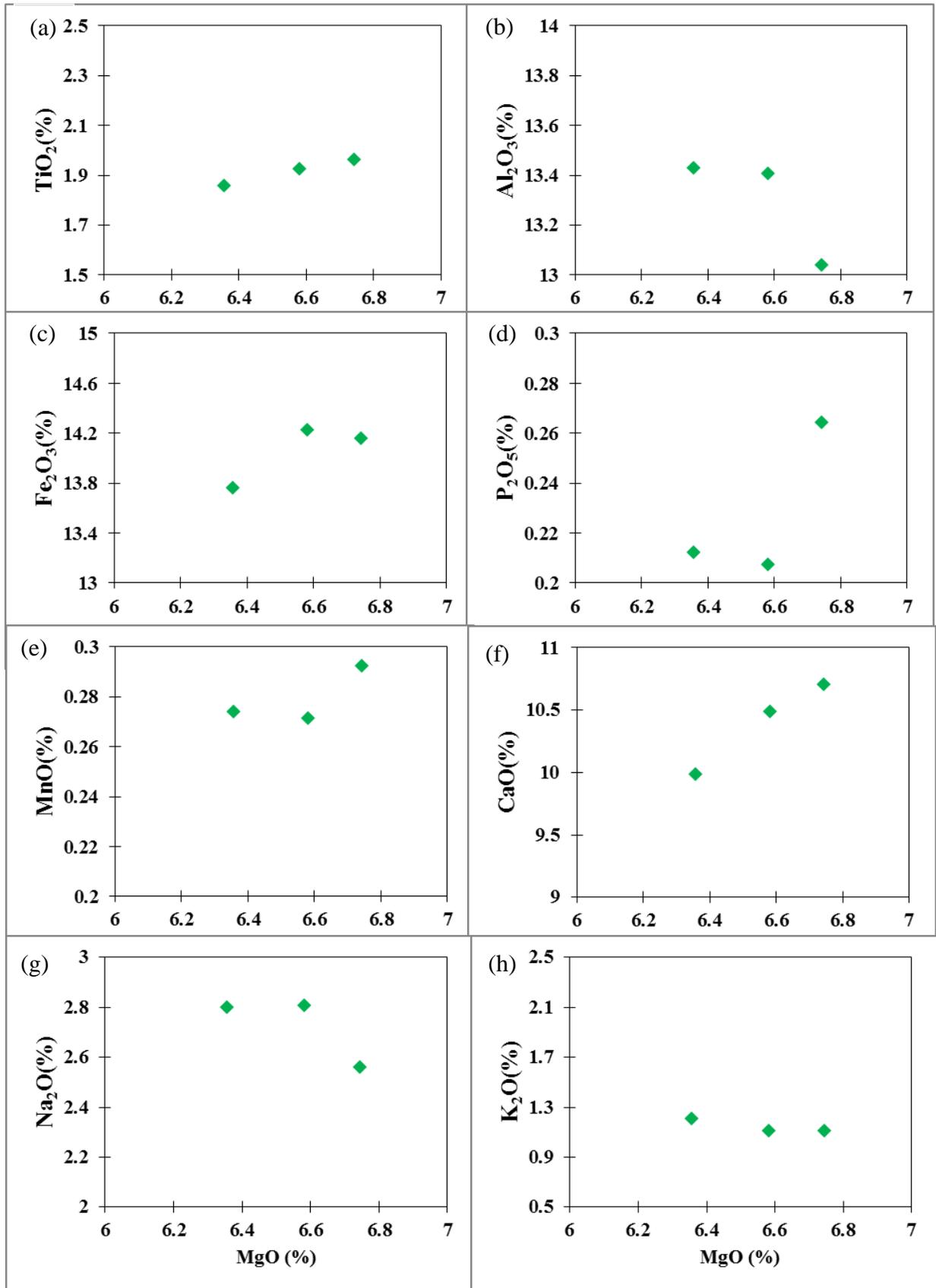
**Figure 5.9.** (a) Diagramme  $\text{Na}_2\text{O}$  en fonction de  $\text{K}_2\text{O}$  de discrimination des ignées et sédimentaires (d'après Smith, 1982); (b) Position des metabasites de Ngoura-Colomines dans le diagramme AFM ( $(\text{K}_2\text{O} + \text{Na}_2\text{O})\text{-FeO}_T\text{-MgO}$ ) de Irvine et Baragar (1971).

## V.2 2- Eléments en trace

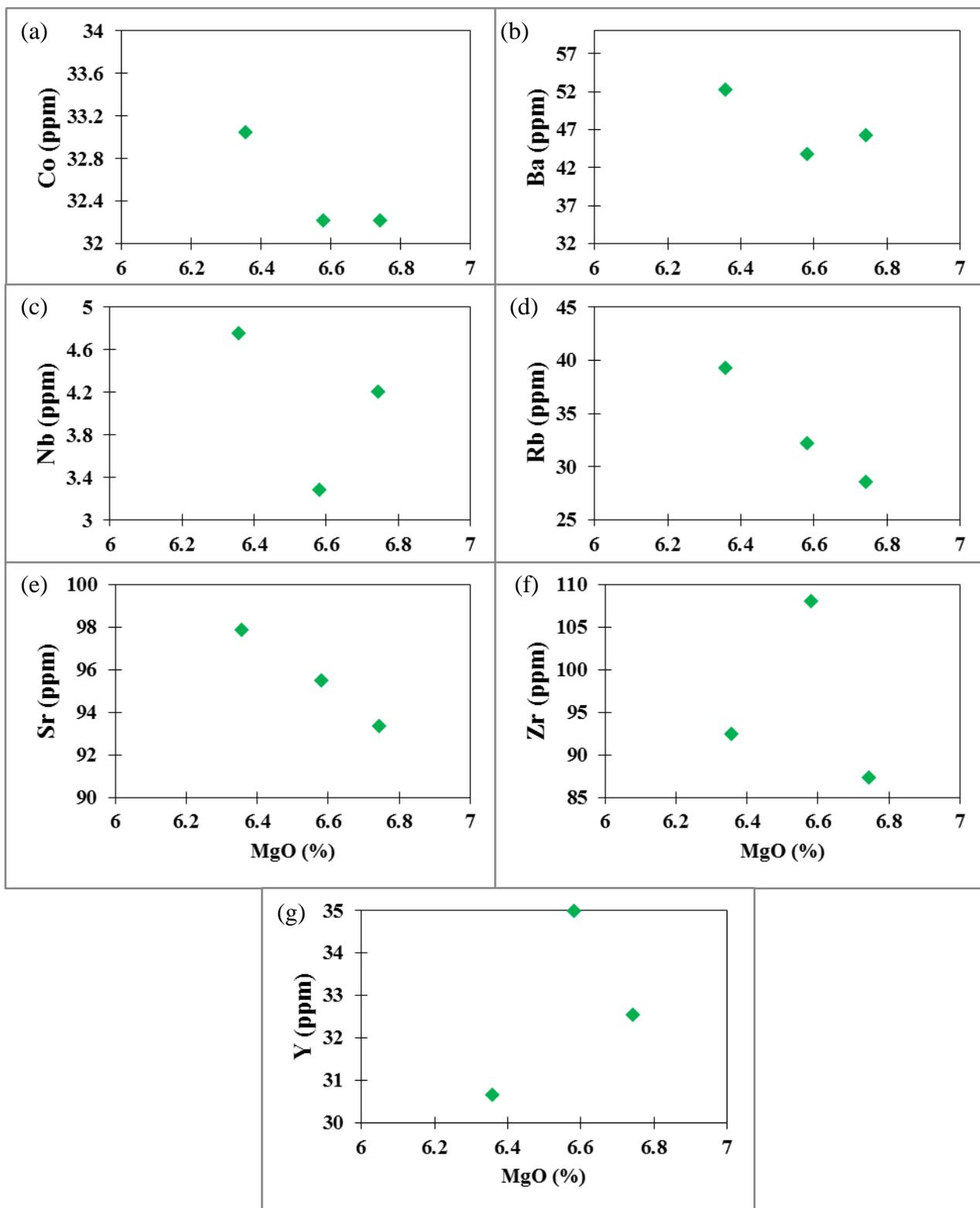
Les enclaves d'amphibolites de Ngoura-Colomines sont caractérisées par des teneurs relativement élevées en V (267,62 – 279,90 ppm), Zn (87,33-108,04 ppm), Sr (93,37 - 97,87 ppm) et Ba (43,67 -52,26 ppm), modérées en Rb(28,53 -39,23 ppm) et Co (32,21 – 33,04 ppm). Les teneurs en Nb sont très faibles comprises entre 0,30 et 0,53 ppm et celles du Cr sont inférieures à la limite de détection. La plupart des éléments en trace (Co, Ba, Rb, Sr) ont des teneurs qui diminuent avec l'augmentation des teneurs en MgO tandis que pour les autres éléments en trace notamment le Nb, Zr et Y l'on observe plutôt une dispersion des points (Fig. 5.11).

## V.2.3- Terres rares

Les spectres des terres rares des amphibolites (Fig. 5.12a) sont plats. Ces spectres sont très peu fractionnés, ce qui se traduit par des rapports  $\text{La}_N/\text{Yb}_N$  (1,67 - 1,93) et  $\text{Gd}_N/\text{Yb}_N$  (1,15 - 1,42) très proches et peu variables, traduisant un enrichissement presque dans les mêmes proportions en LREE et HREE. Cet enrichissement quasi-proportionnel en LREE et en HREE est indicateur du fractionnement de l'apatite, du sphène et du zircon. De plus, ces spectres montrent des anomalies négatives en cérium et pas d'anomalie en Eu ( $\text{Eu}/\text{Eu}^*$  :0,93-1,04). Les spectres multi-éléments sont homogènes dans l'ensemble, avec des anomalies positives en Rb et  $\text{K}_2\text{O}$  et des anomalies négatives en Nb, Sr et Th (Fig. 5.12b).



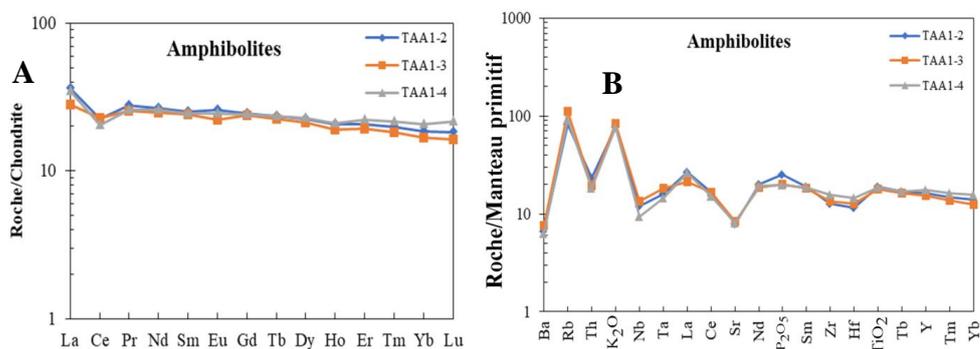
**Figure 5.10.** Diagrammes de variation de quelques éléments majeurs des amphibolites en fonction de MgO. Notez les corrélations négatives en b, g et h, les corrélations positives en a, c, e et f et une dispersion des points en d.



**Figure 5.11.** Diagrammes de variation de quelques éléments traces en fonction de MgO des métabasites de Ngoura-Colomines. Notez les corrélations négatives en a, b, d et e et une dispersion des points en c, f, et g.

**Tableau 5.2 :** Compositions chimiques des échantillons représentatifs des amphibolites de Ngoura-Colomines.

Echant.	TAA1-2	TAA1-3	TAA1-4	Echant.	TAA1-2	TAA1-3	TAA1-4
SiO <sub>2</sub>	48,33	48,86	47,75	REE			
TiO <sub>2</sub>	1,96	1,86	1,93	La	8,801	6,911	8,532
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	13,04	13,43	13,41	Ce	14,316	14,461	13,095
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	14,15	13,76	14,23	Pr	2,689	2,441	2,503
MgO	6,74	6,36	6,58	Nd	12,538	11,691	12,259
CaO	10,71	9,98	10,49	Sm	3,862	3,736	3,776
Na <sub>2</sub> O	2,56	2,80	2,80	Eu	1,507	1,296	1,429
K <sub>2</sub> O	1,11	1,21	1,11	Gd	5,004	4,851	4,923
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	0,26	0,21	0,21	Tb	0,877	0,847	0,880
MnO	0,29	0,27	0,27	Dy	5,753	5,437	5,787
LOI	0,38	0,46	0,42	Ho	1,166	1,081	1,195
Somme	99,54	99,20	99,19	Er	3,432	3,204	3,668
<i>Trace</i>				Tm	0,508	0,467	0,555
Sc	39,037	37,745	38,361	Yb	3,074	2,760	3,434
V	279,539	267,621	279,908	Lu	0,461	0,413	0,550
Cr	n.d.	n.d.	n.d.				
Co	32,217	33,047	32,211	∑REE	63,989	59,596	62,585
Rb	28,534	39,230	32,132	La <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	1,932	1,690	1,677
Sr	93,375	97,873	95,488	Ce <sub>N</sub> /Sm <sub>N</sub>	0,895	0,934	0,837
Y	32,544	30,661	34,989	Gd <sub>N</sub> /Yb <sub>N</sub>	1,315	1,420	1,159
Zr	87,335	92,426	108,048	Eu/Eu*	1,04	0,93	1,01
Nb	4,202	4,749	3,275	Ce/Ce*	0,70	0,84	0,68
Mo	0,533	0,308	0,489				
Cs	1,248	1,846	1,270				
Ba	46,169	52,270	43,678				
Hf	2,331	2,532	2,881				
Ta	0,321	0,367	0,293				
W	1,884	1,891	1,781				
Tl	0,027	0,075	0,036				
Pb	7,361	7,061	7,214				
Th	0,987	0,805	0,760				
U	1,740	1,046	1,081				



**Figure 5.12.** Spectres des terres rares normalisés par rapport à la chondrite (A) et multi-éléments normalisés par rapport au manteau primitif (B) des amphibolites de Ngoura-Colomines.

## CONCLUSION

Les roches magmatiques de Ngoura-Colomines sont des roches calco-alkalines hyperpotassiques (tonalites et granodiorites) à shoshonitiques (adamellites et granites). Toutes ces roches sont hyperalumineuses de type-I. Les caractères géochimiques des éléments majeurs et traces associés aux différents diagrammes pétrologique montrent que les granitoïdes de Ngoura-Colomines sont identiques à celles des séries calco-alkalines hyperpotassiques des domaines orogéniques. Les spectres des terres rares sont fractionnés dans l'ensemble, avec des anomalies positives en Ce et négatives en Eu.

Les caractères géochimiques des roches métamorphiques de Ngoura-Colomines montrent que ces roches sont d'origine ignée. Les protolites probables de ces amphibolites sont des gabbros ou des basaltes. Leurs rapports Cr/Th nuls ainsi que les rapports Th/La faibles (0,08-0,11), sont caractéristiques des suites magmatiques typiques. Les spectres des terres rares des amphibolites sont plats, très peu fractionnés, avec des anomalies négatives en Ce et nulles en Eu.

**CHAPITRE VI.  
POTENTIALITÉS MÉTALLOGÉNIQUES  
DE NGOURA-COLOMINES**

*«Le monde est une **épiphanie**, une splendide manifestation de la divinité; cependant,  
pour obtenir le salut, il faut se détacher du monde sensible.»*

- Eugène Ionesco

## INTRODUCTION

Le secteur Ngoura-Colomines est célèbre de par sa richesse en or, essentiellement rencontré sous forme de placers. Afin de circonscrire les meilleures cibles ou prospects susceptibles de renfermer la minéralisation primaire, une approche pluridisciplinaire combinant la géostatistique minière par krigeage couplée au système d'Information Géologique (SIG) et la cartographie par télédétection de l'altération hydrothermale associée à la minéralisation aurifère en surface a été adoptée, c'est l'objet du chapitre. L'approche géostatistique est basée sur les données de 72 puits d'exploration. Les résultats de télédétection sont ensuite corrélés aux données de terrain et aux données minéralogiques (diffraction des rayons X et spectroscopie par réflectance). L'objectif principal de cette étude est de contraindre succinctement le potentiel aurifère du secteur Ngoura-Colomines.

## VI.1 ANALYSE GÉOSTATISTIQUE PAR KRIGEAGE

### VI.1.1 Description des puits

Soixante-douze (72) puits ont été réalisés, étudiés puis échantillonnés. Ces puits sont localisés principalement à proximité des cours d'eau, et quelques-uns sur les talus. Un exemple des sites d'échantillonnage est présenté à la [figure 6.1](#). Dans l'ensemble, trois principaux horizons ont été distingués. Ceux-ci comprennent, de la surface vers la profondeur, (i) une latérite nodulaire grossière de couleur brunâtre, (ii) une latérite nodulaire fine (les deux constituent des couches stériles) et (iii) une zone tachetée qui est une couche de gravier minéralisée ([fig.6.1c](#)). L'horizon nodulaire grossier a une épaisseur variant de 0,5 à 1 m. C'est un horizon graveleux qui contient des nodules dont la taille varie de 0,8 à 4,7 cm. L'horizon nodulaire fin est de couleur brune à brun rougeâtre, sableux à graveleux et contient des nodules dont la taille varie de 0,4 à 0,7 cm. Son épaisseur varie de 2 à 3,5 m. Cet horizon passe brusquement vers les niveaux plus profonds en une zone tachetée d'épaisseur comprise entre 0,3 et 0,9 m. Ce dernier horizon est limoneux, argileux à sableux et sa couleur varie du jaune à brun jaunâtre puis au brun rougeâtre. La zone tachetée se transforme progressivement en saprolite, elle a été échantillonnée pour la caractérisation des minéraux lourds qui ont fait l'objet des études pétrographiques et morphoscopiques.

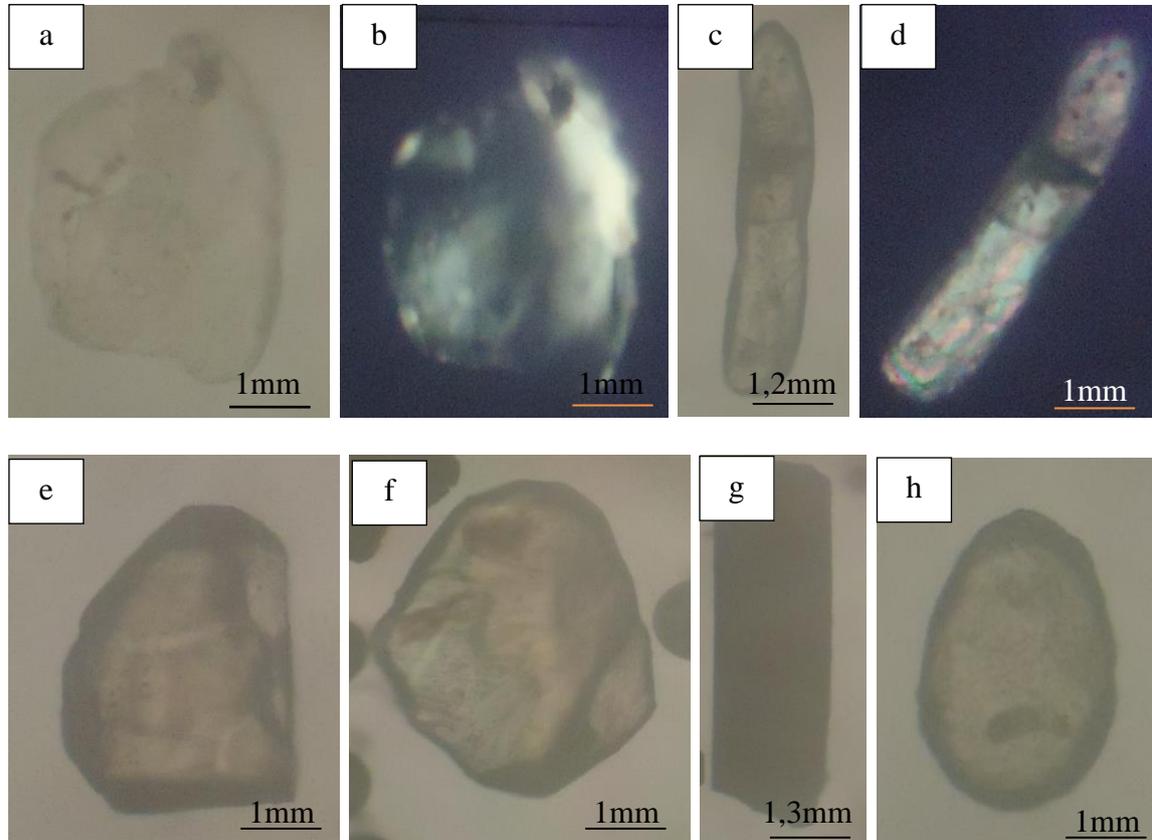


**Figure 6.1.** Sites d'exploitation artisanale d'or montrant des puits d'échantillonnage à Colomines (A) et le long de la rive de la rivière Kadei (B et C). Notez la position relative des couches de gravier stérile (gangue) et minéralisée ainsi que leurs épaisseurs en C).

### VI.1.2 Étude pétrographique des fonds de batées

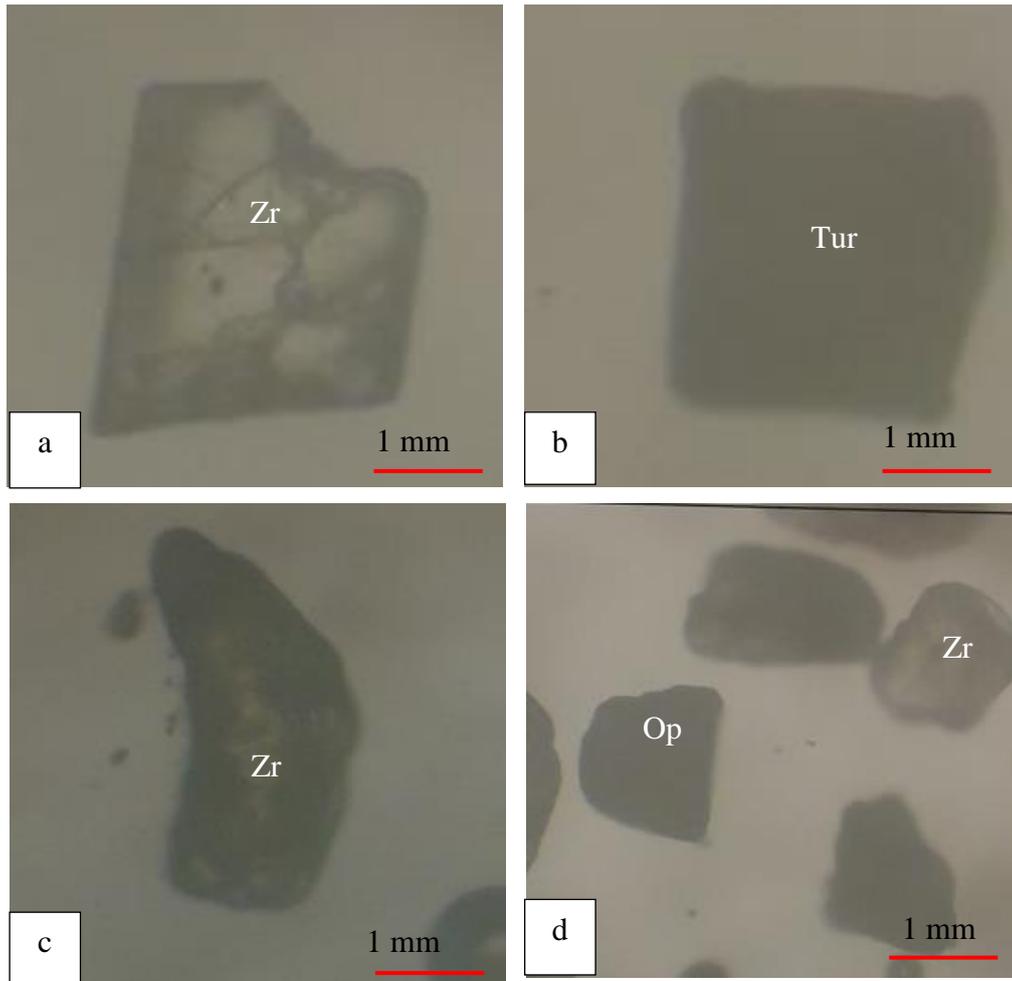
Au microscope, l'analyse des échantillons de fond de batée prélevés sur dix puits représentatifs montre que des minéraux lourds qui accompagnent l'or sont essentiellement les opaques, le zircon, la muscovite et la tourmaline (Figs 6.2-6.5). Ces minéraux sont présents en des proportions variables d'un échantillon à un autre.

A Colomines, les cristaux de zircon sont anguleux à sub-anguleux et parfois arrondis, rarement zonés et souvent tronqués (Figs 6.2c-6.2f). La muscovite est rare et essentiellement en lamelles sub-anguleuses (Figs 6.2a-6.2b). Tout comme la muscovite, la tourmaline est rare et en prismes anguleux de couleur sombre (Fig. 6.2g).



**Figure 6.2.** Aspect microscopique des minéraux lourds de Colomines. (a et b) Muscovite en LPNA et LPA, (c et d) Zircon allongé en LPNA et LPA, (e) Zircon tronqué en LPNA, (f) Zircon trapez en LPNA, (g) Tourmaline noire en LPNA, (h) Zircon arrondi en LPNA

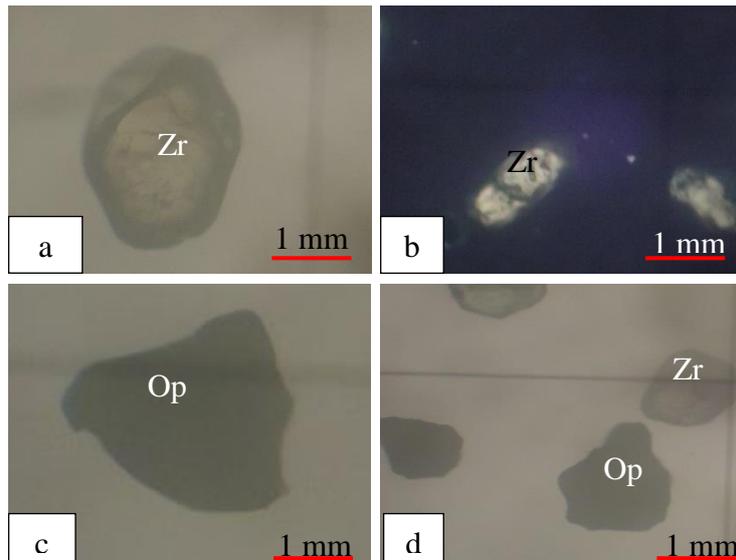
A Madubal, le zircon (55-60%) représente le minéral le plus abondant des échantillons étudiés. Il se présente sous deux principales formes, anguleuse et arrondie, de dimension moyenne 1 x 2,4 mm. Les cristaux de forme anguleuse sont dominants et dispersés dans la lame. Certains cristaux sont zonés, alors que d'autres sont soit tronqués, soit fissurés (Fig. 6.3a) parfois déformés (Fig. 6.3c). Les opaques (30-35%) sont moins abondant que le zircon mais plus abondant que la tourmaline. Ils se présentent sous forme de cristaux anguleux à sub-arrondis de dimensions comprises entre 0,9 x 1 mm et 0,5 x 0,7 mm (Fig. 6.3d). Ces cristaux de couleurs sombres sont généralement associés aux grains d'or. La tourmaline (<5%) est très rare dans la lame. Elle se présente sous forme de cristaux très anguleux (Fig.6.3b) de dimension moyenne 1,1 x 2,2 mm.



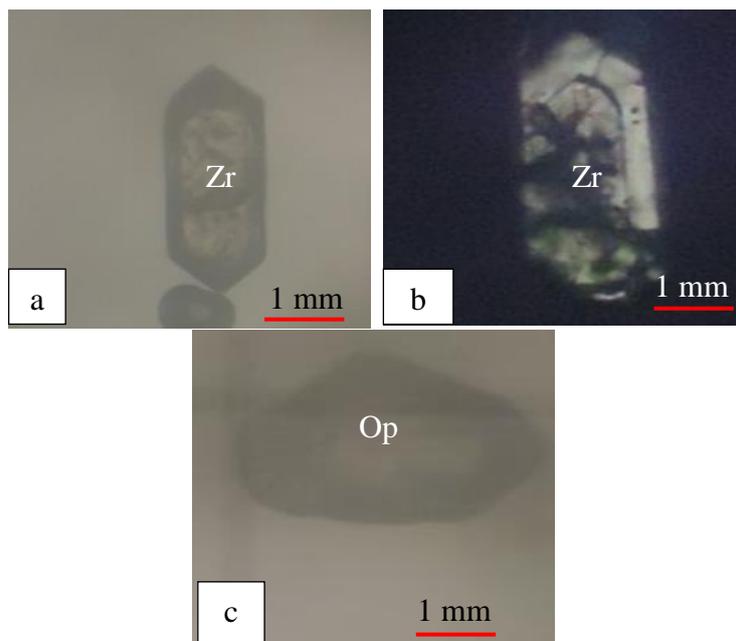
**Figure 6.3.** Aspect microscopique des minéraux lourds de Madubal. a) Zircon anguleux, tronqué et fissuré ; b) Tourmaline noire ; c) Zircon déformé ; d) Association zircon-opaque. Zr : zircon, Tur : tourmaline ; Op : opaque

À Tassongo et Boutou, le zircon (50-55%) est aussi le minéral le plus abondant dans les échantillons étudiés. Il se présente sous forme de cristaux de forme anguleuse à sub-arrondie de dimensions comprises entre 1 x 2,4 mm et 1 x 2,6 mm. Ces cristaux, parfois très déformés sont soit zonés, soit fracturés (Figs 6.4a-b, d). Les opaques (35-40%) se présentent sous forme de grains anguleux à sub-arrondis (Figs 6.4c, d) de dimension moyenne 2,6 x 1,7 mm.

À Garoua-Colomines, les minéraux lourds qui accompagnent l'or sont essentiellement les opaques et le zircon. Le zircon (60-65%) représente le minéral le plus abondant. Il se présente sous forme de cristaux de forme anguleuse souvent zonés (Figs 6.5a-b) de dimension moyenne 1 x 2,4 mm. Quelques rares cristaux de zircon sont maclés. Les opaques (35-40%) représentent le second minéral de la fraction lourde. Ils se présentent sous forme de cristaux anguleux à arrondis (Fig. 6.5C) de dimensions moyennes 2,6 x 1,7 mm.



**Figure 6.4.** Aspects microscopiques des minéraux lourds de Tassongo et Boutou. A) zircon sub-arrondi et fissuré ; B) zircon fissuré et déformé ; C) opaque de forme sub-arrondie ; D) association zircon-opaque.

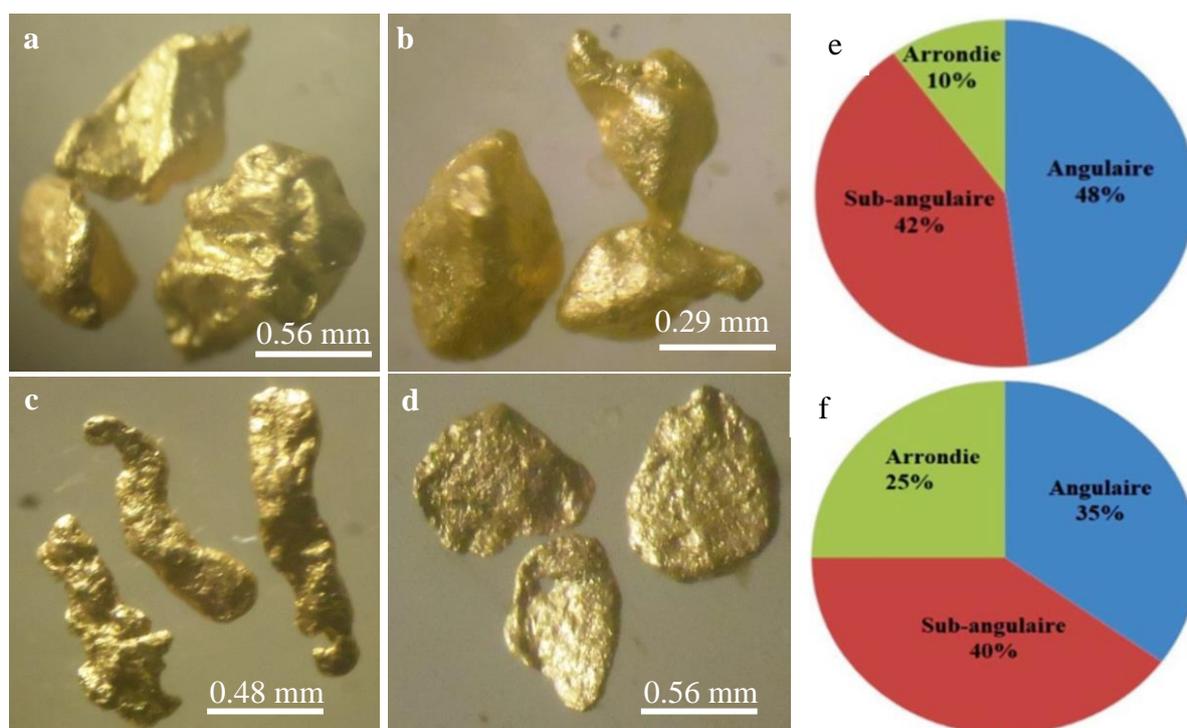


**Figure 6.5.** Aspect microscopique des minéraux lourds de Garoua-Colomines. A et B : zircon très anguleux et zoné; C : opaque de forme sub-arrondie.

### VI.1.3. Morphologie des grains d'or

Dix échantillons de concentré des fonds de batées d'un poids total de 3 g (0,3g chacun) et renfermant de grains d'or ont été examinés au microscope. L'étude morphoscopique des grains d'or de ces puits a révélé que les grains de forme irrégulière prédominent, avec des proportions plus faibles de formes dendritiques et prismatiques (Figs 6.6-6.7).

La morphologie générale des grains d'or des puits de Colomines, Tassongo, Madubal et Boutou varie d'angulaire à ronde et leurs surfaces sont rugueuses à émoussées (Figs. 6.6a-b). Les grains d'or des dix puits sont jaunes vifs. Leur taille varie de 0,12 à 1,4 mm. Les échantillons des puits aux alentours de Madubal montrent des grains avec des formes angulaires, sub-angulaires, sub-arrondies à arrondies. Certains grains sont allongés, avec un axe long de 1,36 mm (Fig. 6.6c). A Tassongo, les grains d'or présentent une large gamme de formes, allant des grains allongés aux grains aplatis (Figs 6.6c-d). Les surfaces sont généralement rugueuses. Les grains aplatis présentent des vides (cavités), probablement liés à la dissolution lors de l'altération. L'étude de la distribution des formes des grains d'or a Colomines-Tassongo (Fig 6.6e) montre une prédominance des grains anguleux (48%) suivie des grains sub-anguleux (42%), les grains arrondis étant minoritaires (10%). Par contre à Madubal-Boutou, l'on note plutôt une prédominance des formes sub-anguleuses (40%) au détriment des formes anguleuses (35%) et arrondies (25%) (Fig 6.6f).

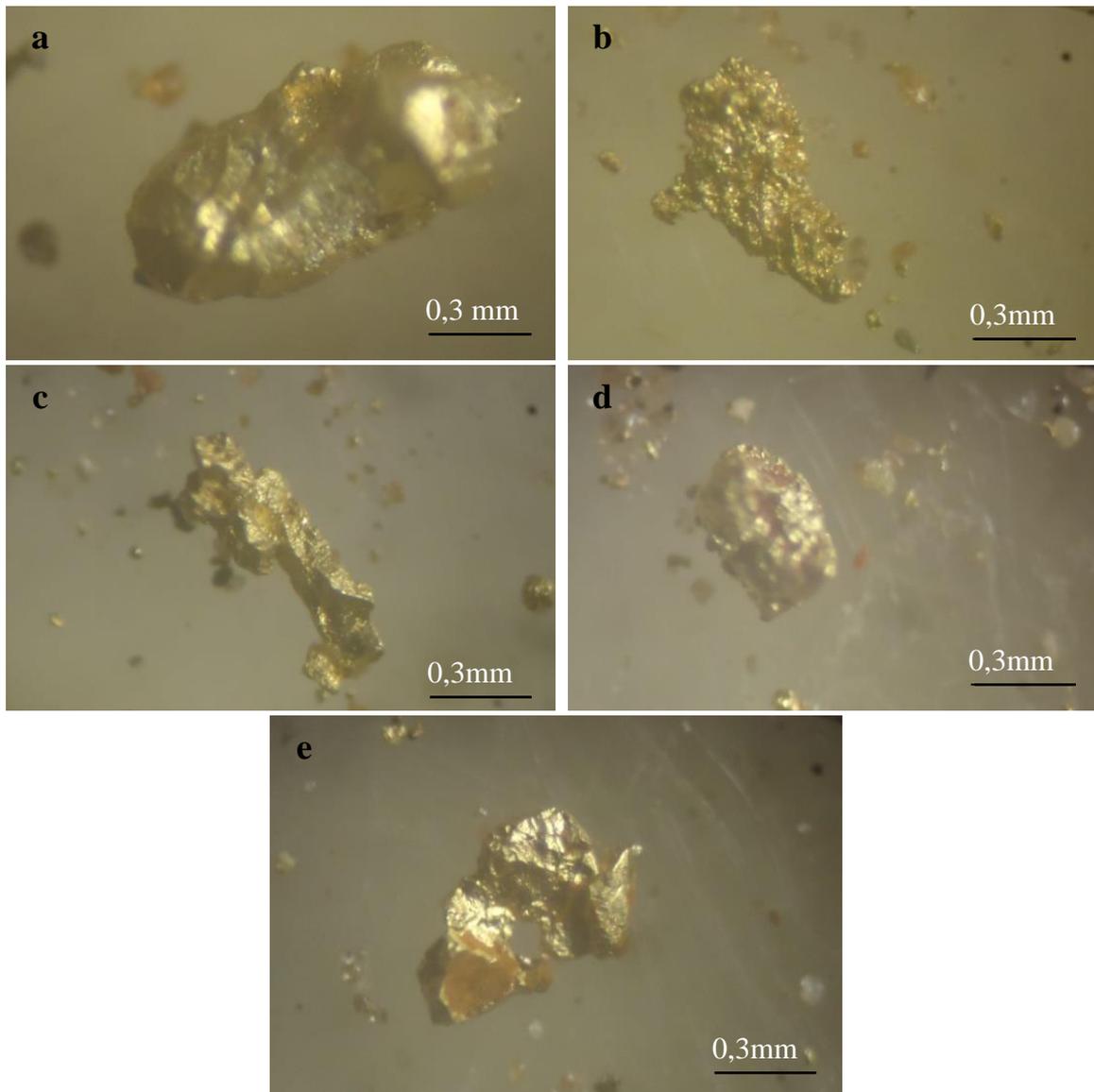


**Figure 6.6.** Caractéristiques morphologiques (a- d) et distribution (e-f) des grains d'or. (a) forme angulaire, Notez les surfaces rugueuses des grains d'or; (b) Forme arrondie à surfaces émoussées des grains d'or; (c) Grains d'or allongés; (d) Grains d'or aplatis; (e et f) Pourcentages des différentes formes de grains d'or des puits de Colomines-Tassongo et des puits de Madubal- Boutou respectivement.

La morphologie générale des grains d'or des puits de Garoua et Trou du rat est assez variée. L'or ici est en grains allongés, aplatis et sub-arrondis souvent criblés de cavités (Fig. 6.7). On distingue : (i) des grains allongés en forme d'ellipsoïde avec des cavités remplies de

quartz (Fig. 6.7a) ; (ii) des grains aplatis avec des stries et des microcavités (Fig. 6.7b); (iii) des grains anguleux et allongés à cavités bourrés d'impuretés autre que le quartz (Fig. 6.7c); (iv) des grains sub-arrondis avec des impuretés rougeâtres (oxydes de fer ?) (Fig. 6.7d); et enfin (v) des grains de forme anguleuse avec des cavités (Fig. 6.7d).

Dans l'ensemble des sites étudiés, l'on note une prédominance des grains de forme anguleuse (95%) par rapport aux grains sub-arrondis et arrondis (<5%), ce qui traduirait une distance de transport relativement courte.



**Figure 6.7.** Caractéristiques morphologiques des grains d'or des puits de Garoua et Trou du rat. (a) Grains d'or allongés, notez la forme en ellipsoïde avec des cavités remplies de quartz, (b) Grains d'or aplatis avec des stries et des microcavités, (c) Grains d'or anguleux et allongés à cavités bourrés d'impuretés autre que le quartz, (d) Grains d'or sub-arrondis avec des impuretés rougeâtres, (e) Grains d'or anguleux et criblés de cavités

#### VI.1.4 Analyse géostatistique des données de terrain

Trois paramètres principaux ont été étudiés. Il s'agit essentiellement de la teneur en or, l'épaisseur du gravier minéralisée et l'épaisseur de la couche stérile (annexe I).

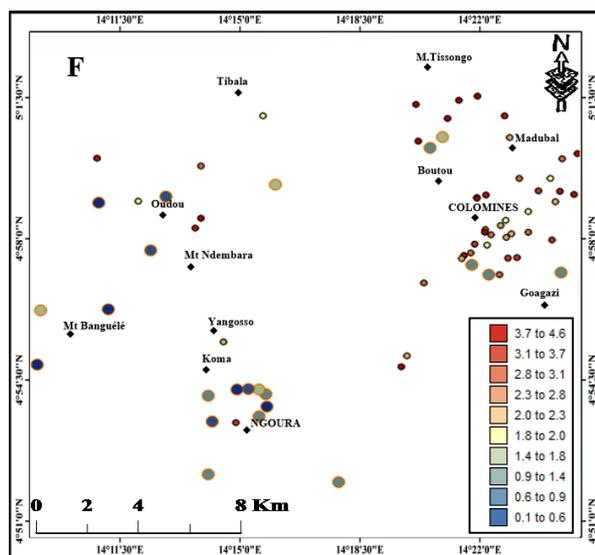
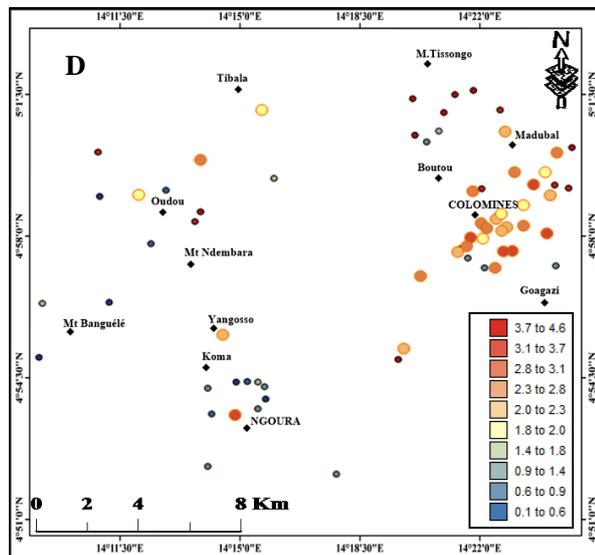
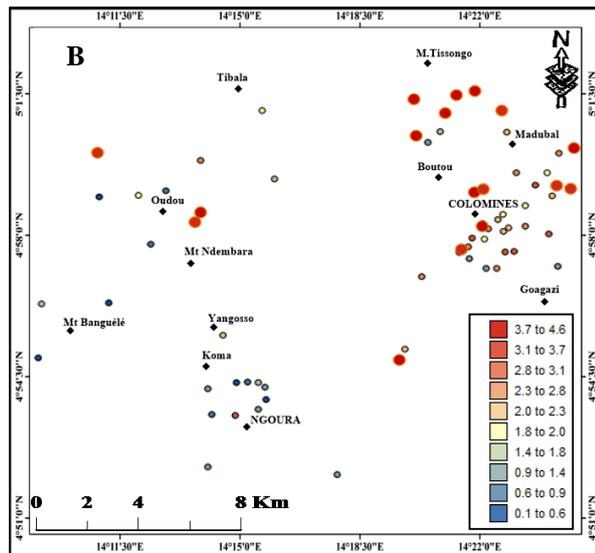
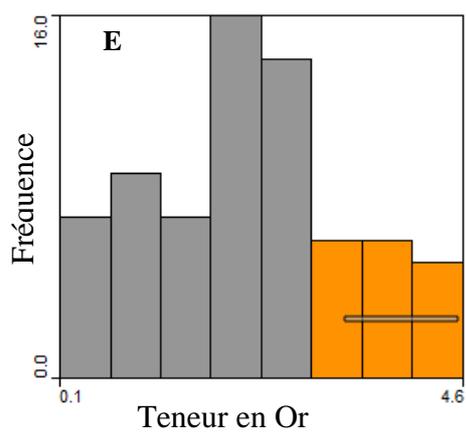
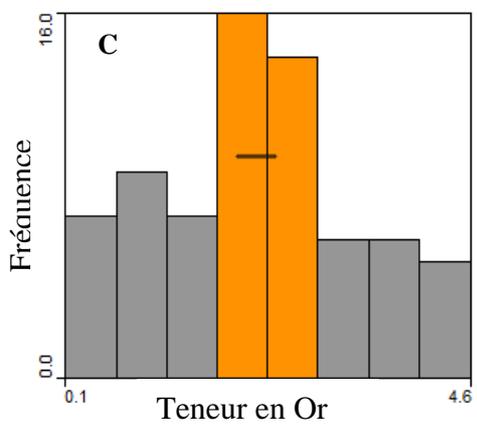
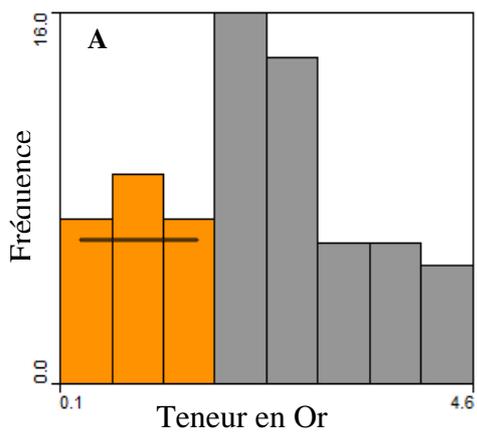
##### VI.1.4.1-Teneur en or

La teneur en or dans les 72 puits analysés varie entre 0,1 et 4,6 g/m<sup>3</sup>. Les fréquences de distribution (histogramme) des teneurs ainsi que leur distribution spatiale sont illustrées à la figure 6.8. Les histogrammes sont utilisés ici pour représenter les variations de teneur ayant un caractère continu qui sont subdivisées en classes à des fins de représentation graphique. Cela nous a permis d'esquisser une description statistique de la teneur en or en trois classes principales sur la base de l'histogramme à distribution uni-modale et symétrique et une courbe de distribution cumulative (Fig. 6.9).

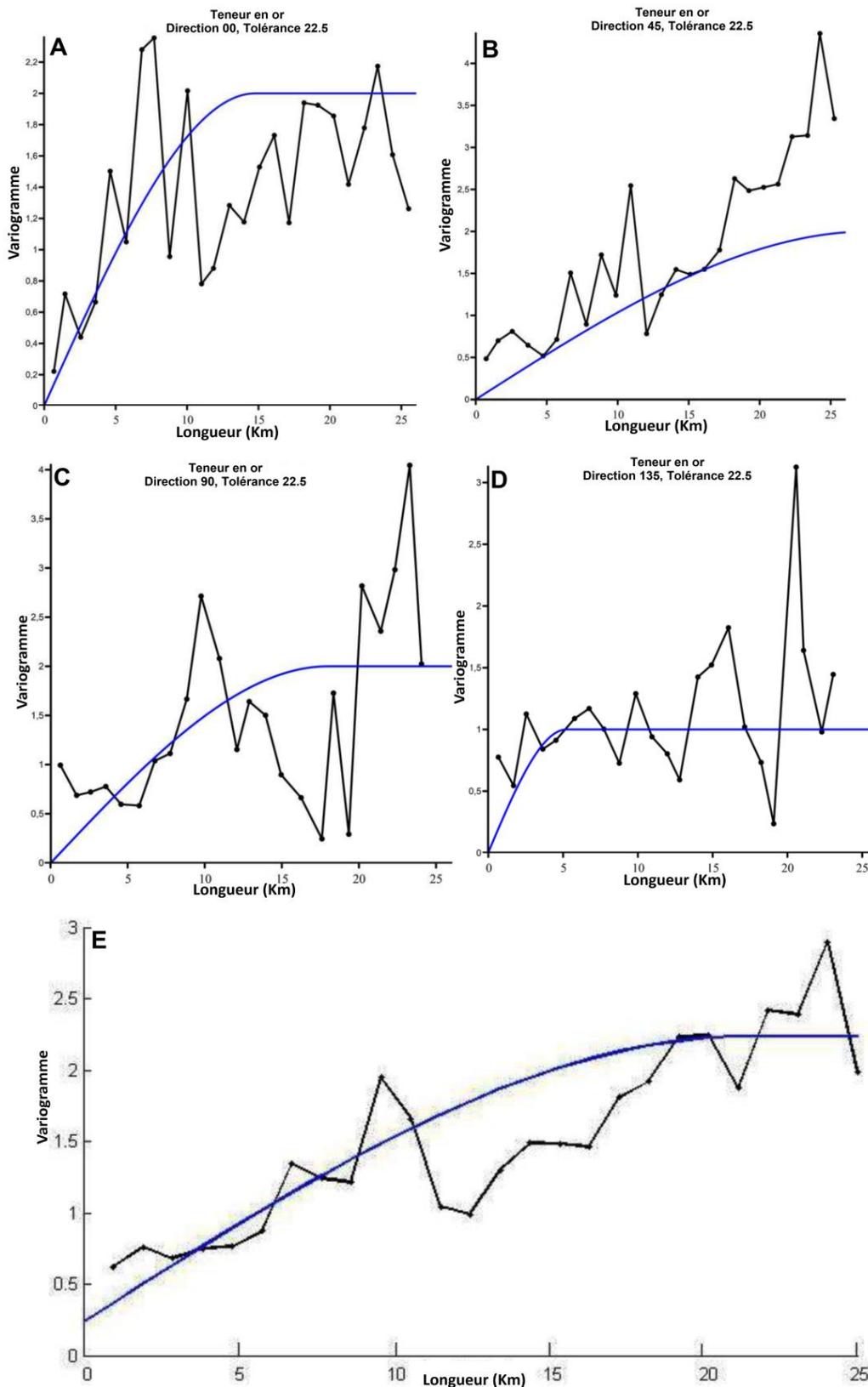
La distribution statistique des teneurs en or a une fourchette de 0,1 à 4,5 pour une moyenne de 2,28, une variance d'environ 1,351, le mode 2,9, la médiane 2,25, le quartile inférieur 1,375 et le quartile supérieur 3,1.

La première classe comprend les valeurs des teneurs comprises entre 0,1 à 1,78 g/m<sup>3</sup> (moyenne = 1,01 g/m<sup>3</sup>). Cette classe représente 31,50% de l'ensemble des données (Fig.6.8a). La teneur en or de la deuxième classe (42,46%) varie de 1,78 à 2,91 g/m<sup>3</sup> (Fig.6.8c) tandis que la troisième classe prend en compte des valeurs de concentration élevée en or (2,91 à 4,60 g/m<sup>3</sup> avec une moyenne de 3,62 g/m<sup>3</sup>) et représente 26,02% de l'ensemble des données (Fig. 6.8e). D'après la carte de distribution de la teneur en or, il apparaît que les échantillons avec les concentrations modérées (classe 2) à élevées (classe 3) sont principalement concentrés près du village Colomines (Figs 6.8b, d), tandis que les échantillons à faible teneur en or sont plus répandus avec la plus grande concentration autour du village Ngoura (Fig. 6.8f).

La continuité spatiale de la teneur en or a été évaluée par la méthode des variogrammes. La figure 6.9 présente un variogramme indicateur de la distribution spatiale de la modélisation de teneur en or avec une combinaison linéaire d'un effet pépité et d'une fonction gaussienne. La tolérance ici est de 90 dans quatre directions principales notamment NS (Fig. 6.9a), NE-SW (Fig. 6.9b), W-E (Fig. 6.9c), SE-NW (Fig. 6.9d) et le variogramme omnidirectionnel (Fig. 6.9e). La fonction gaussienne se caractérise ici par une échelle de 1,925, une longueur d'environ 0,127 et une anisotropie de 2,161.



**Figure 6.8.** Histogrammes (a, c et e) et distribution spatiale des teneurs de la minéralisation aurifère (b, d et f) dans la région de Ngoura-Colomines.



**Figure 6.9.** Variogramme de la distribution spatiale des teneurs en or dans le secteur Ngoura-Colomines avec une combinaison linéaire d'un effet pépite et d'une fonction gaussienne avec une tolérance de 90 dans quatre directions principales pour (A) NS, (B) NE-SW, (C) EW, (D) NW-SE et (E) variogramme omnidirectionnel. Le variogramme du modèle empirique est la ligne noire et l'indicateur du variogramme est en bleu (A, B, C et D) et inversement (E).

La figure 6.10 est la carte des iso-teneurs en or obtenue par le processus de krigeage. Les paramètres d'estimation et de variogramme du krigeage utilisés pour estimer la teneur en or et l'épaisseur des couches sont de 100 lignes x 45 colonnes pour la taille de la grille avec le type de composant linéaire, l'angle d'anisotropie (0) et le rapport d'anisotropie (1), tous les krigeages ont été effectués en utilisant les 72 puits voisins les plus proches pour estimer le nombre maximum de données de voisinage (3) et la pente du variogramme (1). La technique consiste en une interpolation spatiale de données localisées basée sur un jeu de variance, l'objectif étant de faire la cartographie d'un phénomène naturel. L'on constate que les villages Ngoura, Tingou et Yangosso de la zone d'étude sont les secteurs les moins minéralisés en or, tandis que les villages Naguimbi, Goagazi, Colomines, Madubal Boutou et Tissongo sont les plus enrichie. La partie centrale de la zone étudiée, en particulier autour des villages de Tido et Kambo, présente un enrichissement modéré en or. Deux principales tendances (direction principale NE-SW et secondaire NNE et ENE) de distribution des teneurs en or ont également été mises en évidence à partir de krigeage (Fig.6.10).

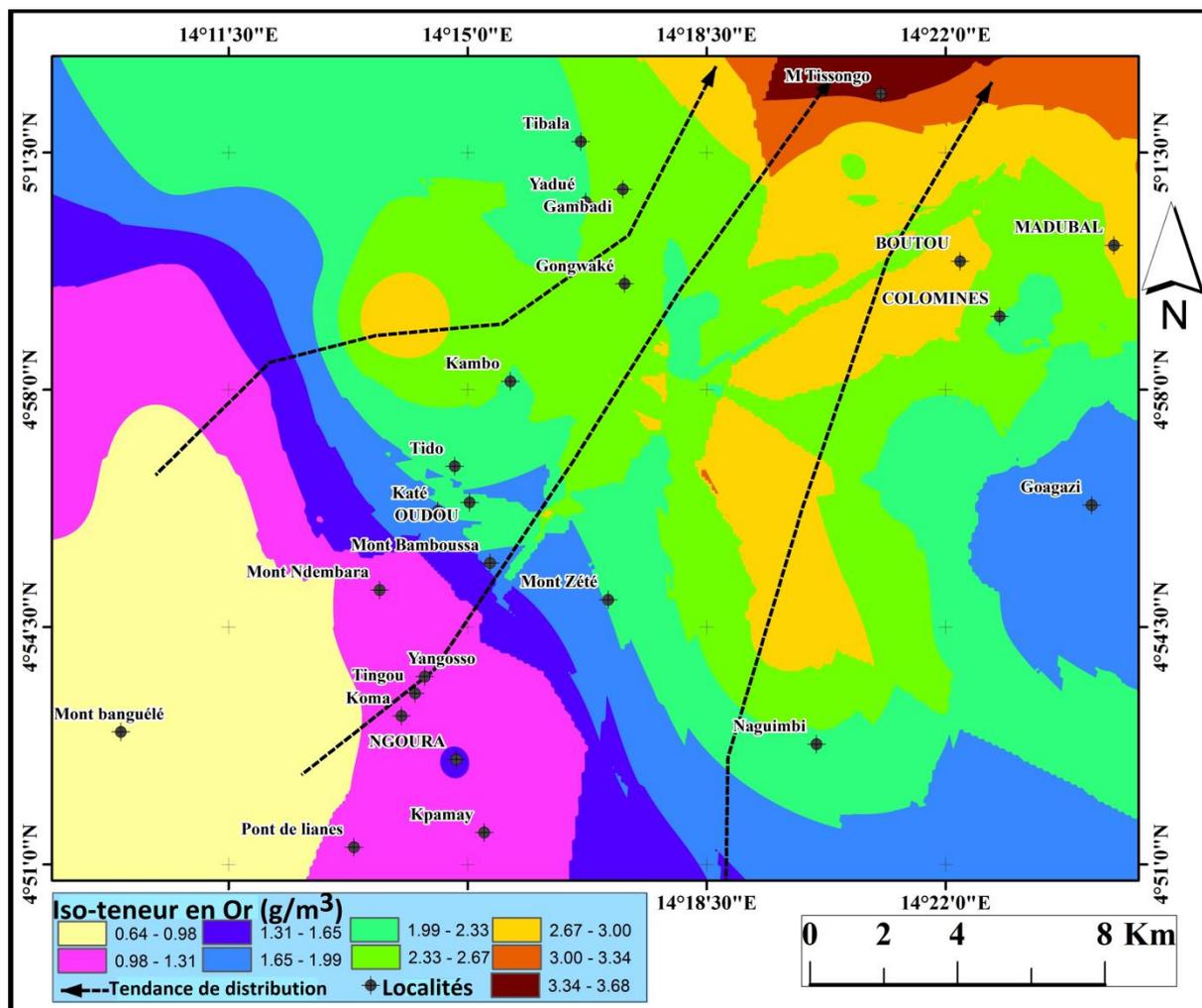


Figure 6.10. Carte des iso-teneurs en or obtenue par krigeage ordinaire.

#### VI.1.4.2-Épaisseurs de la couche minéralisée et du stérile

Les épaisseurs des couches minéralisées et du stérile ont été mesurées dans chaque puits d'exploration et la valeur obtenue est exprimée en mètre. Ces épaisseurs ont par la suite été vectorisées sous forme de points.

La couche de gravier minéralisé a une épaisseur qui varie entre 0,3 m et 0,9 m, avec une proportion élevée de valeurs allant de 0,3 à 0,5 m (tableau 6.1, en annexe). À partir de la carte d'iso-épaisseurs de gravier minéralisé (Fig. 6.11), nous constatons que les épaisseurs n'ont pas une distribution géographique préférentielle. Toutefois, les puits avec les plus fortes épaisseurs de couche minéralisée sont principalement situés dans la partie NE de la zone d'étude, en particulier autour du village de Madubal.

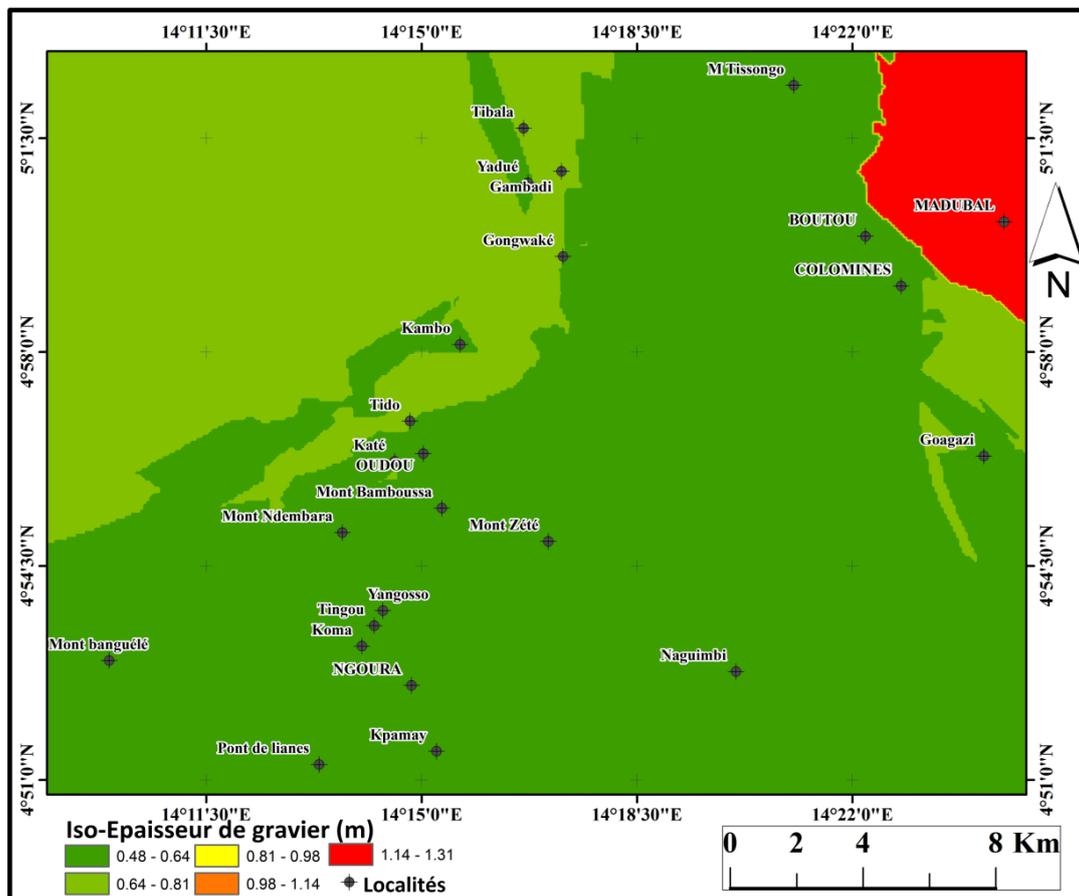


Figure 6.11. Carte des iso-épaisseurs de gravier minéralisé obtenue par krigeage.

L'épaisseur de la couche stérile se situe entre 2,1 et 4,7m (tableau 6.1, en annexe). L'application des techniques de modélisation par krigeage a conduit à la construction d'une carte d'iso-épaisseur de la couche stérile qui montre deux tendances géographiques préférentielles de distribution des épaisseurs relativement dans les directions NW-SE et NE-SW (Fig. 6.12).

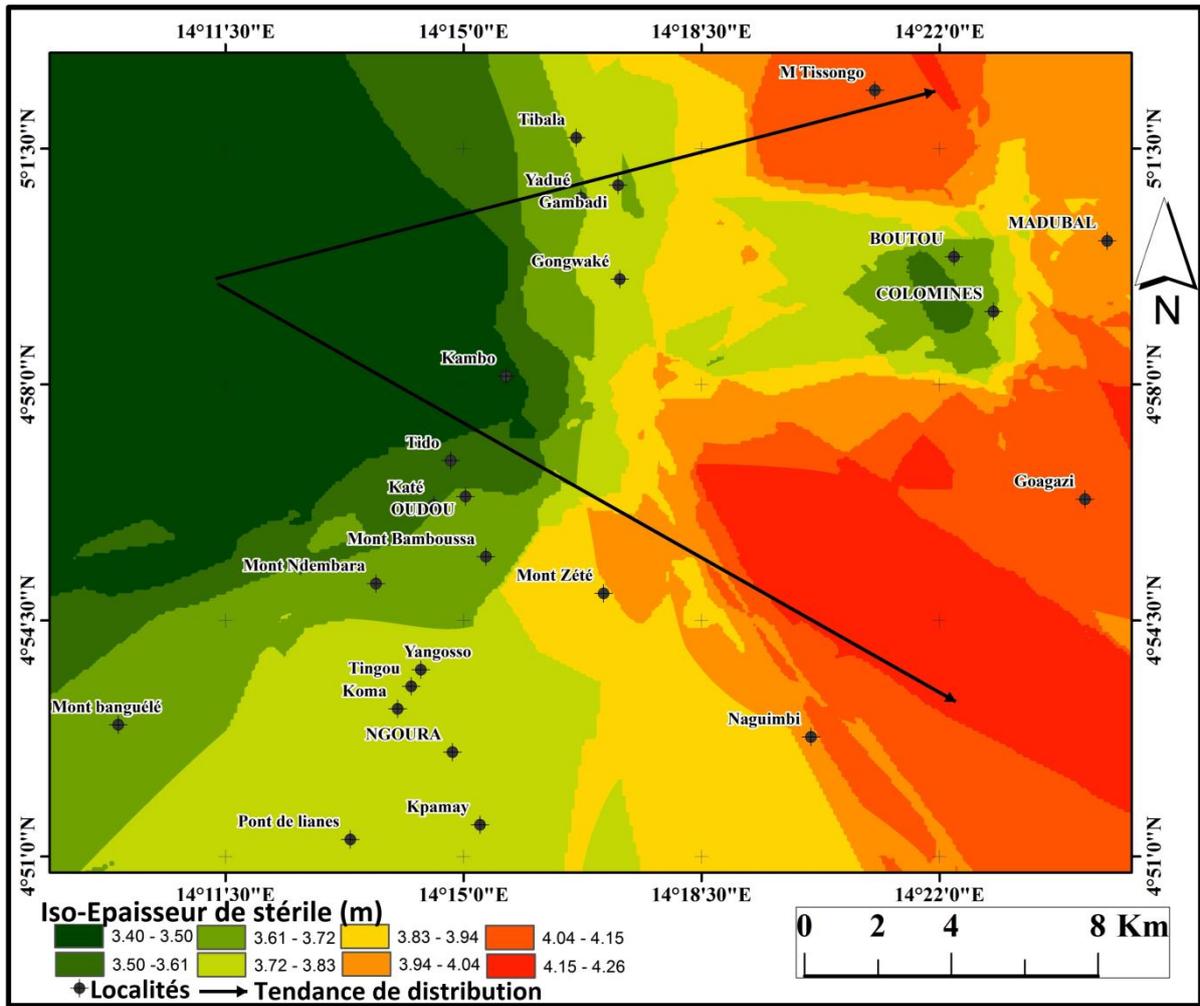


Figure 6.12. Carte des iso-épaisseurs de stérile obtenue par krigeage.

Les trois paramètres notamment la teneur en or, l'épaisseur de la couche minéralisée et l'épaisseur du stérile ne montrent aucune corrélation (Figs 6.13a-b). Cette observation montre que ces trois paramètres sont indépendants les uns des autres.

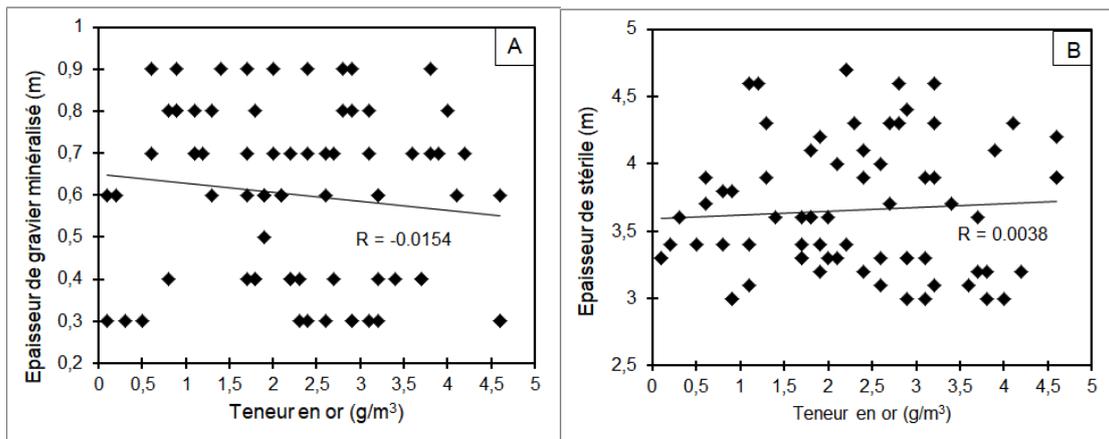


Figure 6.13. Diagrammes binaires de l'épaisseur des couches minéralisées (A) et stériles (B) en fonction de la teneur en or

### VI.1.5- Analyse des données SIG

Le modèle numérique d'altitude (MNA) de la zone d'étude a été dérivé d'images Landsat et SRTM à l'aide du logiciel ArcGIS. Le MNA a conduit à la construction de la carte des pentes qui montre la variation spatiale des pentes (exprimée en pourcentage) et permet une identification rapide des zones planes (Fig. 6.14).

La superposition des teneurs en or et des pentes montrent que les puits à forte teneur se trouvent autour des basses terres et que la teneur en or est également très élevée aux alentours des zones abruptes (environ 9 à 18%) dans la partie NE de la zone d'étude (Fig. 6.14). La principale observation faite est que les flancs de la colline de Colomines sont très raides avec des valeurs atteignant 24%. La conséquence principale d'un tel relief est un degré élevé d'érosion, ce qui pourrait expliquer la forte concentration de l'or dans les vallées autour de Colomines.

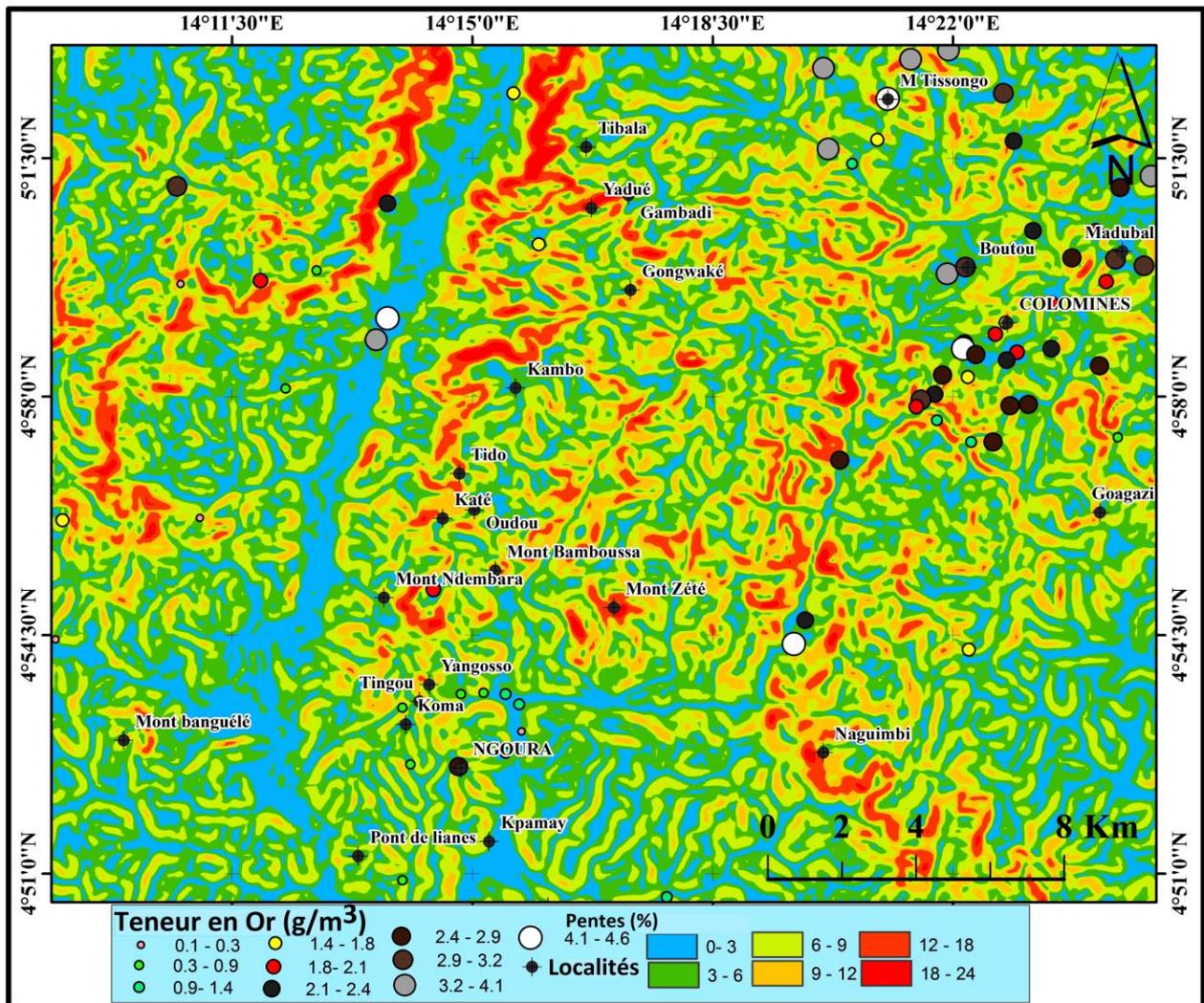
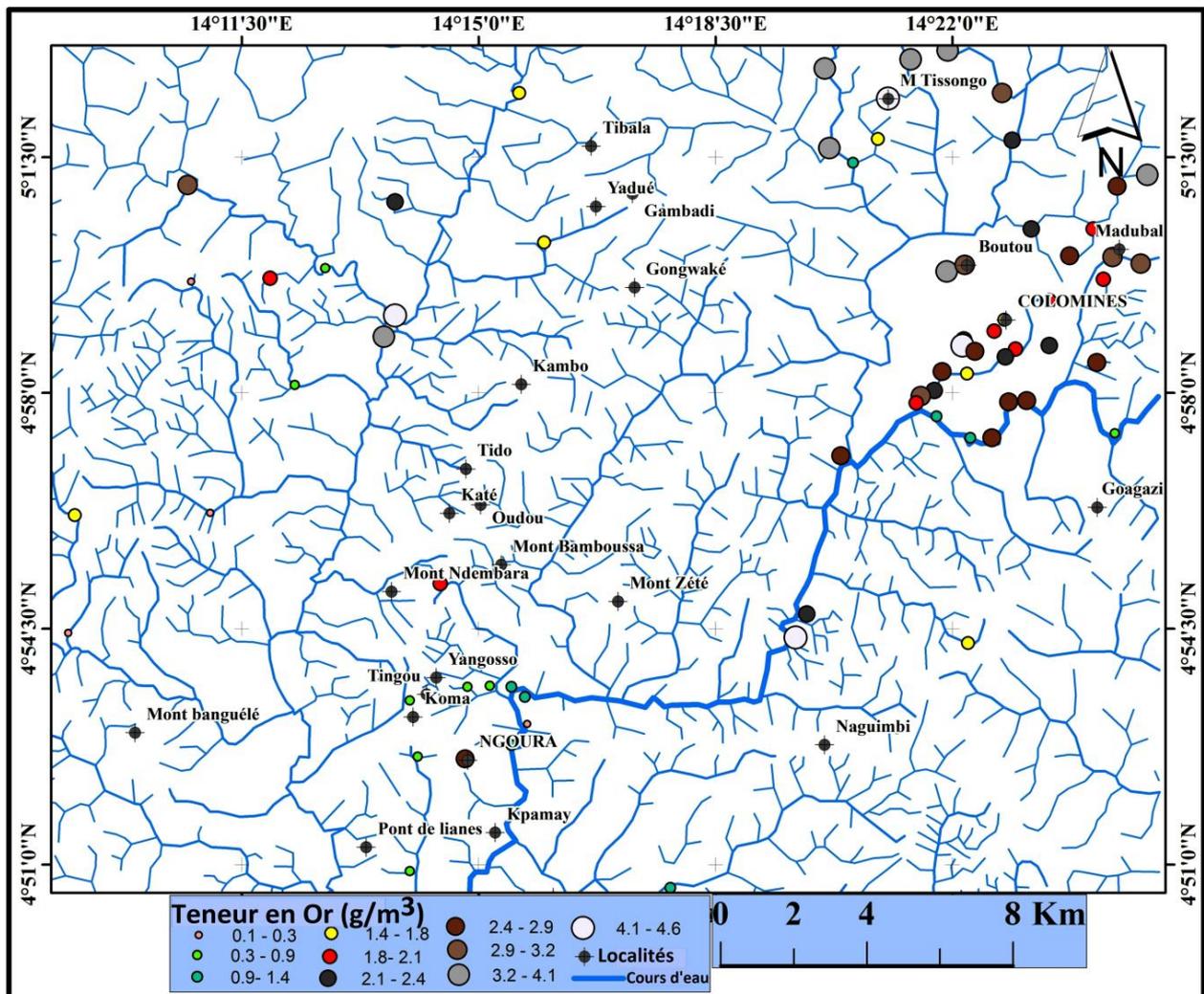


Figure 6.14. Superposition des teneurs en or sur la carte des pentes.

Le réseau hydrographique a été numérisé sous forme de polygones à partir de la carte topographique. La base de données contient ainsi le nom et l'ordre de chaque cours d'eau. L'eau étant le principal agent de transport de la minéralisation en zone intertropicale vers les vallées, nous avons jugé opportun d'évaluer son importance. La superposition des teneurs en or sur le réseau hydrographique montre que les principales rivières minéralisées de la zone d'étude sont la Kadei et Oudou avec leurs affluents (Fig. 6.15). Cette carte montre également que les puits fortement minéralisés sont situés sur les lits des cours d'eau et que les puits présentant les plus faibles teneurs en or sont localisés principalement à la confluence entre une rivière principale et ses affluents. On note cependant une distribution aléatoire entre l'épaisseur de la couche minéralisée, l'épaisseur du stérile, le réseau hydrographique et la topographie.



**Figure 6.15.** Carte du réseau hydrographique montrant l'emplacement des puits d'exploration et leurs teneurs en or.

## VI.2 CARTOGRAPHIE DE L'ALTÉRATION HYDROTHERMALE

### VI.2.1 Analyse par télédétection

#### VI.2.1.1 Caractéristiques des images utilisées

##### (a)-Landsat-8

Le satellite Landsat-8 se trouve sur une orbite circulaire de 705 km quasi synchrone avec le soleil, qui acquiert des données spectrales dans les parties du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge thermique du spectre électromagnétique (Roy et al., 2014). Il a été lancé le 4 février 2013 et comporte deux capteurs, dont l'imageur terrestre opérationnel (OLI) et le capteur infrarouge thermique (TIRS). L'OLI collecte des données spectrales dans neuf bandes (Tableau 6.2). Les bandes OLI ont une résolution spatiale de 30 m sauf la bande panchromatique qui a une résolution de 15 m. Le système TIRS collecte des données spectrales pour deux bandes thermiques, la bande 10 (10,60-11,19  $\mu\text{m}$ ) et la bande 11 (11,50-12,51  $\mu\text{m}$ ), avec une résolution spatiale de 100 m (Tableau 6.1). Les données Landsat-8 sont acquises par bandes de 185 km et segmentées en scènes de 185 km  $\times$  180 km, ce qui convient à la cartographie géologique régionale (Irons et al., 2012; Roy et al., 2014). Le tableau 5 présente les caractéristiques du satellite Landsat-8.

**Tableau 6.1.** Caractéristiques techniques du satellite Landsat-8.

Capteur	Sous-système	Numéro de bandes	Gamme spectrale ( $\mu\text{m}$ )	Résolution au sol (m)	Largeur de bandes (km)
OLI	VNIR	1	0.433-0.453	30	185
		2	0.450-0.515		
		3	0.530-0.590		
		4	0.640-0.670		
		5	0.850-0.880		
	SWIR	6	1.570-1.650		
		7	2.100-2.290		
		Pan	0.500-0.680	15	
	TIRS	TIR	10	10.60-11.19	
11			11.50-12.51		

Abréviations: Imageur terrestre opérationnelle (OLI), Capteur infrarouge thermique (TIRS), visible et proche infrarouge (VNIR), infrarouge à ondes courtes (SWIR), infrarouge thermique (TIR) (Irons et al., 2012; Roy et al., 2014)

## (b)-ASTER

Le radiomètre à réflexion et émission thermique spatiale avancée (ASTER) est un capteur multi-spectral à haute résolution spatiale, spectrale et radiométrique. Il a été lancé en décembre 1999 par la NASA. Il est exploité sur une orbite circulaire quasi polaire et synchrone à 705 km d'altitude. Le capteur se compose de trois sous-systèmes d'instruments distincts, comprenant le visible et proche infrarouge (VNIR) à trois bandes (0,52  $\mu\text{m}$  et 0,86  $\mu\text{m}$ ; résolution spatiale de 15m), l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) à six bandes (1,6 à 2,43  $\mu\text{m}$ ; résolution spatiale de 30m) et l'infrarouge thermique (TIR) comprenant 5 bandes (résolution spatiale de 8,125 à 11,65  $\mu\text{m}$ ; 90 m). Chaque scène individuelle d'ASTER a une largeur de bande de 60 km (60 km x 60 km), ce qui le rend très utile pour la cartographie géologique à l'échelle régionale (Abrams, 2000; Yamaguchi et al., 2001; Abrams et al., 2004). Les caractéristiques des données ASTER sont présentées dans le [tableau 6.2](#).

**Tableau 6.2.** Caractéristiques techniques des données ASTER

Sous-système	Bandes	Gamme spectrale ( $\mu\text{m}$ )	Resolution Radiometrique	Precision absolue	Résolution, gamme dynamique
VNIR	1	0.52-0.60	NE $\Delta\rho \leq 0.5\%$	$\leq 4\%$	15 m, 8 bits
	2	0.63-0.69	3N		
	3B	0.78-0.86			
SWIR	4	1.600-1.700	NE $\Delta\rho \leq 0.5\%$		$\leq 4\%$ 30 m, 8 bits
	5	2.145-2.185	NE $\Delta\rho \leq 1.3\%$		
	6	2.185-2.225	NE $\Delta\rho \leq 1.3\%$		
	7	2.235-2.285	NE $\Delta\rho \leq 1.3\%$		
	8	2.295-2.365	NE $\Delta\rho \leq 1.0\%$		
	9	2.360-2.430	NE $\Delta\rho \leq 1.3\%$		
TIR	10	8.125-8.475		$\leq 3\text{K}(200-240\text{K})$	90 m, 12 bits
	11	8.475-8.825		$\leq 2\text{K}(240-270\text{K})$	
	12	8.925-9.275	NE $\Delta T \leq 0.3 \text{ k}$	$\leq 1\text{K}(270-340\text{K})$	
	13	10.25-10.95		$\leq 2\text{K}(340-370\text{K})$	
	14	10.95-11.65			

Le numéro de bande 3N fait référence à la vue de pointage au nadir, tandis que 3B désigne la vue de pointage vers l'arrière. (Fujisada, 1995; Yamaguchi et al., 1999).

### **VI.2.1.2 Analyse en Composantes Principale (ACP)**

#### *(i) L'Analyse en Composante Principale (ACP) de l'image Landsat-8*

L'analyse des facteurs statistiques dérivés de l'ACP des bandes Landsat-8 du visible et proche infrarouge, de l'infrarouge à onde courte et de l'infrarouge thermique (VNIR+SWIR+TIR) (Tableau 6.3a-d) montre que certaines images en CP contiennent des informations spécifiques. Il s'agit par exemple de la végétation et des minéraux (oxyde/hydroxyde de fer, Al-OH, (Fe, Mg)-OH ; CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et de la silicification). Compte tenu des facteurs statistiques de base (Tableau 6.3a), l'ACP1 a (par définition) la plus grande valeur propre (0,025158) et l'ACP8 la plus petite (0,000003). Ainsi, l'ACP1 exprime d'avantage la variance des données que les autres composantes et l'ACP8 est principalement du bruit. Les matrices de covariance et de corrélation du jeu de données (Tableau 6.3b-c) confirment que les composantes principales sont orthogonales.

Les bandes 1, 8 et 9 de Landsat-8 n'ont pas été utilisées dans cette étude. Le Tableau 6.3d montre les charges de vecteurs propres des bandes 2 à 7, 10 et 11 dans chaque CP. La CP1 a des contributions modérées de la bande 4 (0,24 µm) et de la bande 5 (-0,37 µm) avec des signes opposés. Par conséquent, la CP1 de Landsat-8 devrait accentuer la couleur sombre de la végétation, en raison de la caractéristique d'absorption de la végétation verte de 0,45 à 0,68 µm (bande 4 de Landsat-8, 0,640 à 0,670 µm), associée à sa réflectance élevée dans le proche infrarouge autour de la bande 5 (0,850-0,880 µm) de Landsat-8 (Tableau 6.3). La CP1 a la plus grande valeur propre de toutes les bandes, ce qui indique que la couverture très variable de la végétation verte est la source de variance principale dans la zone d'étude. L'image de l'ACP1 affiche la végétation sous forme de pixels lumineux en supprimant les pixels sombres. La figure 6.16a montre une pseudo-couleur de l'image de l'ACP1, dans laquelle on peut observer la tendance de la végétation en bordure des cours d'eau et les concentrations de la végétation dans les parties nord-centre et sud-ouest de la zone d'étude.

Les magnitudes et les signes des charges de vecteurs propres pour la CP2, CP3 et CP4 (Tableau 6.3d) indiquent que ces composantes principales ne contiennent aucune contribution importante des bandes Landsat-8 susceptibles de marquer des minéraux d'altération, de la végétation ou des roches saines. La CP5 montre de fortes contributions des bandes 6 (0,52) et 7 (-0,48) de signes opposés (Tableau 6.3d).

**Tableau 6.3.** Facteurs statistiques de l'ACP pour les bandes du visible et proche infrarouge, de l'infrarouge à onde courte et de l'infrarouge thermique (VNIR+SWIR+TIR) de Landsat-8

(A) Facteurs statistiques de base					
	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type	Valeur propre
PCA 1	0,00	1,20	1,00	0,02	0,025158
PCA 2	0,00	1,38	1,00	0,02	0,004445
PCA 3	0,00	1,62	1,00	0,04	0,001437
PCA 4	0,00	1,44	1,00	0,08	0,000576
PCA 5	0,00	1,93	1,00	0,08	0,000311
PCA 6	0,00	6,47	1,00	0,11	0,000054
PCA 7	0,00	1,14	1,00	0,03	0,000005
PCA 8	0,00	1,12	1,00	0,03	0,000003

(B) Covariance								
	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 10	Band 11
PCA 1	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCA 2	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCA 3	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCA 4	-0,00	-0,00	-0,00	0,00	-0,00	-0,00	-0,00	-0,00
PCA 5	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCA 6	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	0,01	0,00	0,00
PCA 7	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCA 8	0,00	0,00	0,00	-0,00	0,00	0,00	0,00	0,00

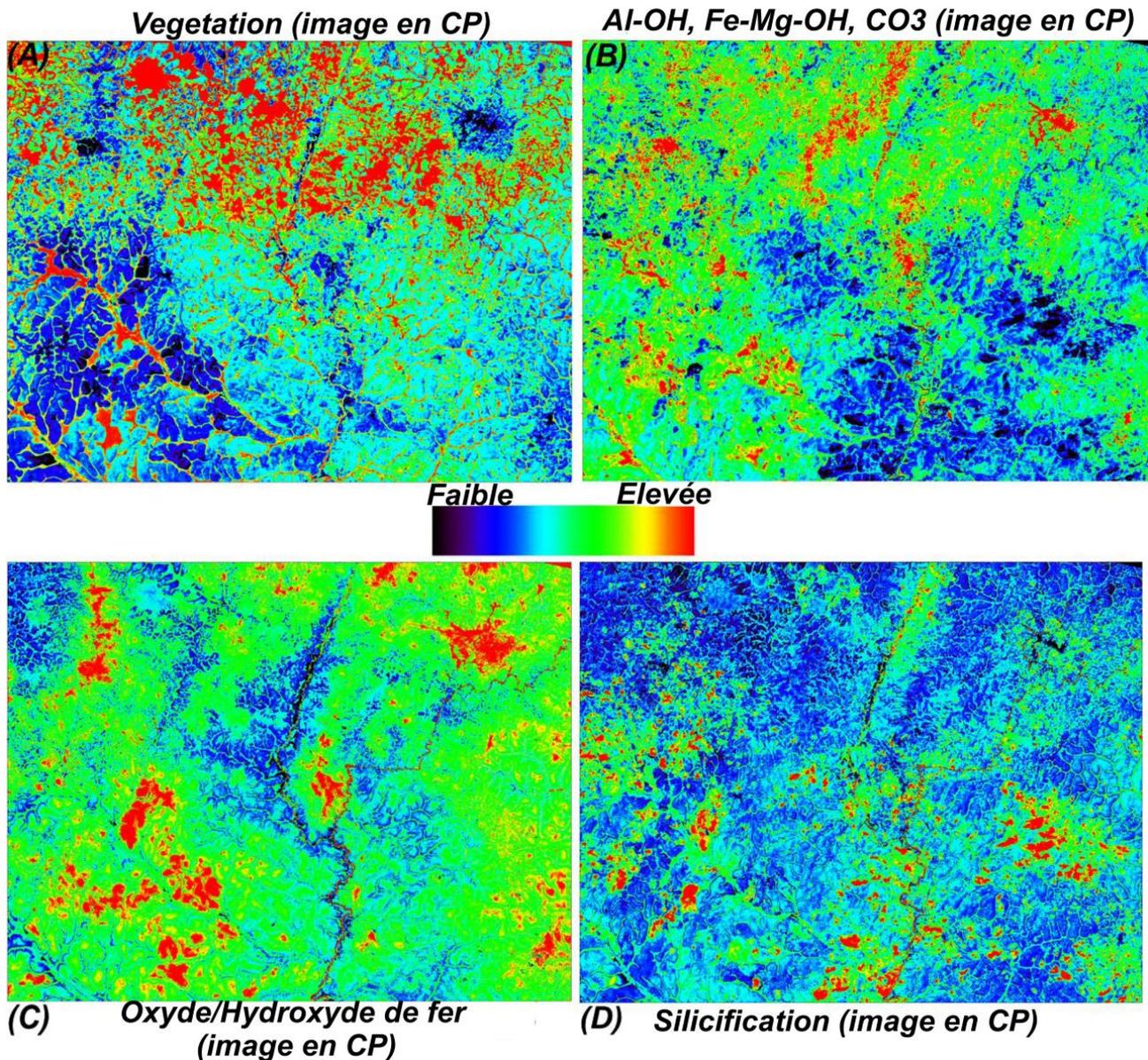
  

(C) Matrice de corrélation								
	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 10	Band 11
PCA 1	1,00	0,97	0,82	-0,15	0,53	0,54	0,72	0,75
PCA 2	0,97	1,00	0,89	-0,15	0,62	0,62	0,71	0,73
PCA 3	0,82	0,89	1,00	-0,46	0,84	0,86	0,79	0,78
PCA 4	-0,15	-0,15	-0,46	1,00	-0,49	-0,62	-0,40	-0,36
PCA 5	0,53	0,62	0,84	-0,49	1,00	0,93	0,63	0,62
PCA 6	0,55	0,62	0,86	-0,62	0,93	1,00	0,74	0,72
PCA 7	0,72	0,71	0,79	-0,40	0,63	0,74	1,00	0,99
PCA 8	0,75	0,73	0,78	-0,36	0,62	0,72	0,99	1,00

(D) Vecteurs propres								
	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 10	Band 11
PCA 1	0,08	0,10	0,24	-0,37	0,50	0,69	0,15	0,14
PCA 2	0,14	0,18	0,15	0,89	0,28	0,12	0,10	0,11
PCA 3	-0,35	-0,32	-0,30	0,11	0,49	0,08	-0,47	-0,44
PCA 4	0,33	0,38	0,40	-0,18	0,37	-0,50	-0,29	-0,24
PCA 5	-0,11	-0,21	-0,25	-0,09	0,52	-0,48	0,43	0,41
PCA 6	0,64	0,19	-0,72	-0,03	0,04	0,10	-0,13	0,04
PCA 7	0,08	-0,28	0,16	0,01	-0,01	0,00	-0,64	0,69
PCA 8	0,55	-0,73	0,23	0,03	-0,00	-0,00	0,18	-0,25

Les minéraux argileux, les sulfates, ainsi que les carbonates, sont tous très réfléchissants dans la bande 6 de Landsat-8 (1,57-1,65  $\mu\text{m}$ ) et fortement absorbants (Pour et al., 2018a, b, c) dans la bande 7 de Landsat-8 (2,11 à 2,29  $\mu\text{m}$ ). Par conséquent, l'image de l'ACP5 montrera probablement l'abondance à la surface des minéraux argileux et des carbonates sous forme de pixels brillants. La figure 6.16b présente l'image en CP5 sous forme de pseudo-couleur en rampe.



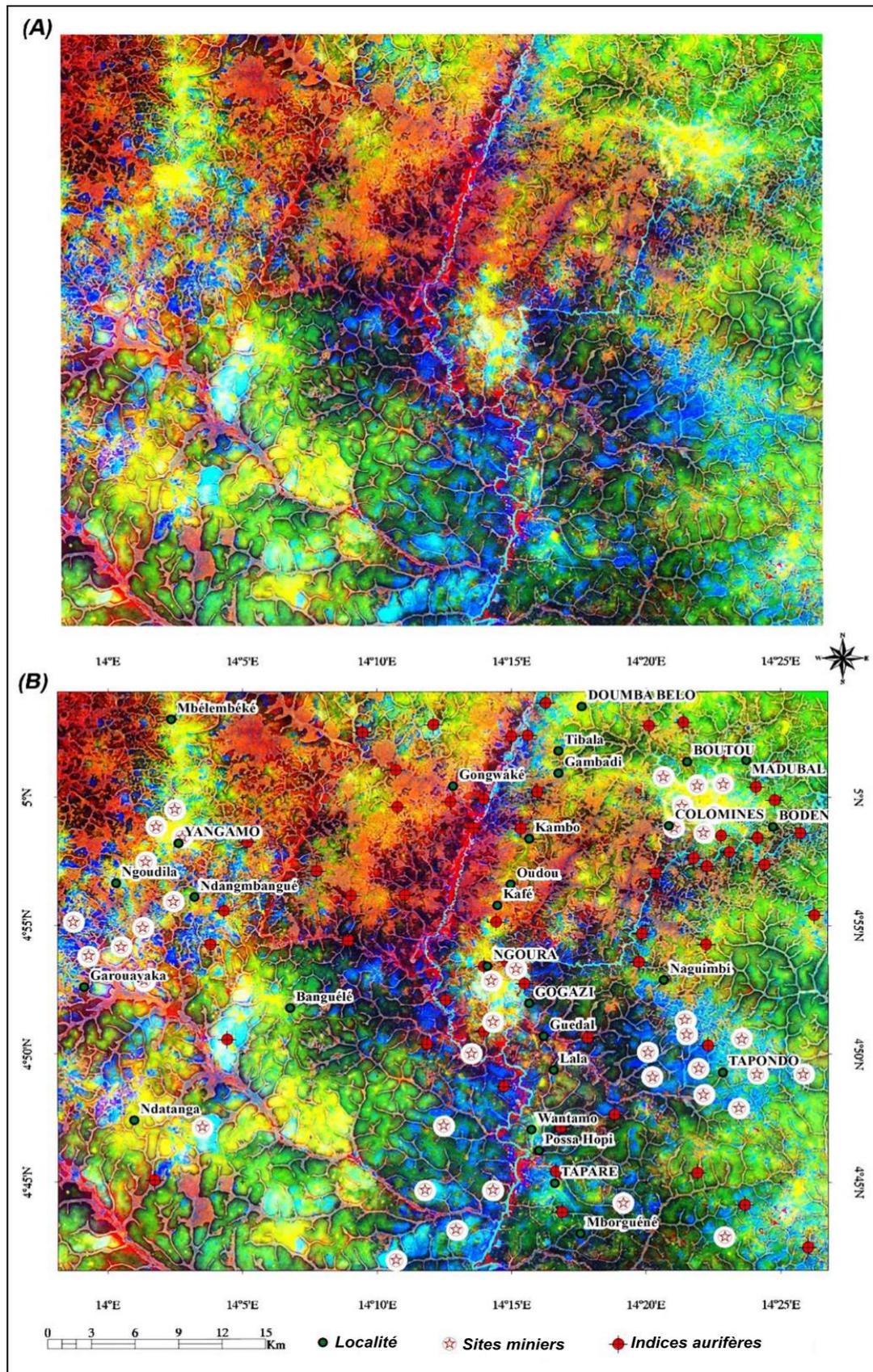
**Figure 6.16.** Images en CP dérivées des données d'ACP de Landsat-8 couvrant la zone d'étude. Une pseudo-couleur a été appliquée à chaque image: (A) végétation en pixels rouges dans l'image en CP1; (B) groupes de minéraux Al-OH, (Fe-Mg)-OH et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> sous forme de pixels rouges dans l'image en CP5; (C) des minéraux oxydes/hydroxydes de fer sous forme de pixels rouges dans l'image en CP6; (D) silicification (teneur élevée en quartz) en pixels rouges dans l'image en CP7.

Le vecteur propre de la CP6 présente une charge importante des bandes 2 (0,64) et 4 (-0,72) de signes opposés (Tableau 6.3d). Les groupes de minéraux oxyde/hydroxyde de fer présentent de fortes caractéristiques d'absorption dans la bande 2 de Landsat-8 (0,45 à 0,51  $\mu\text{m}$ ) et une forte réflexion dans la bande 4 de Landsat-8 (0,64 à 0,67  $\mu\text{m}$ ) (Pour et al., 2018a, b, c). En conséquence, une image en CP6 devrait renforcer les oxydes/hydroxydes de fer dans les tons sombres. Les pixels sombres de l'image en CP6 ont été inversés en pixels clairs par négation et une image en pseudo-couleur en rampe est présentée à la figure 6.16c.

L'ACP7 montre une forte contribution des bandes 10 (-0,64) et 11 (0,69) avec des signes opposés. Les bandes 10 (10,60-11,19  $\mu\text{m}$ ) et 11 (11,50-12,51  $\mu\text{m}$ ) de l'instrument Landsat-8 de l'infrarouge thermique (TIR) permettent de mesurer les caractéristiques d'émissivité spectrale des minéraux silicatés dans la région de 10,60 à 12,51  $\mu\text{m}$ . La courbe d'émissivité des minéraux riches en silice montre des minima significatifs à 8-9  $\mu\text{m}$  et des valeurs supérieures à 10-12  $\mu\text{m}$  (Lyon, 1972; Salisbury et Walter, 1989). Ainsi, l'image en CP7 devrait montrer des roches à forte émissivité (forte teneur en quartz) en pixels sombres par rapport aux roches à faible émissivité (faible teneur en quartz). La négation de la CP7 forme une image dans laquelle les zones de silicification (à haute teneur en quartz) se présentent sous la forme de pixels brillants; une image pseudo-couleur en rampe du négatif de la CP7 est représentée à la figure 6.16d.

Bien que les images pseudo-couleur de la rampe de l'ACP (Figs 6.16a-d) aident à souligner l'abondance des entités cibles et des minéraux d'altération, des cartes plus riches en informations peuvent être générées des compositions colorées rouge-vert-bleu (RVB). Une cartographie RVB des images en CP5, CP6 et CP7 forme une carte de classification unique basée sur la couleur de tous les groupes de minéraux d'altération de la zone d'étude (Fig. 6.17).

Les groupes de minéraux Al-OH, (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$  apparaissent en rouge, orange et jaune; les oxydes/hydroxydes de fer sont représentés en vert, vert clair et jaune, et les zones de silicification en bleu et bleu clair (Fig. 6.17a). Pour tester la relation spatiale des zones à minéraux d'altération détectées avec des sites miniers connus et des indices aurifères dans la zone d'étude, les cartes de classification RVB ont été construites (Fig. 6.17b). Ces cartes montrent que la plupart des sites miniers sont associés à des pixels jaunes (mélange de minéraux argileux/carbonates et oxydes/ hydroxydes de fer) et bleus (zones de silicification), mais ils se répartissent également dans les régions de pixels verts, rouges et bleus à saturation élevée et suivant le système de drainage de la région.



**Figure 6.17.** Carte en compositions colorées RVB des images en CP5, CP6 et CP7 de l'ACP Landsat-8. (A) Superposition de la carte de classification RVB, montrant une vue claire des zones d'altération. (B) Carte de classification RVB avec superposition de coordonnées géographiques des sites miniers et des indices aurifères connus.

**(ii) L'Analyse en Composante Principale (ACP) de l'image ASTER pour les bandes du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (VNIR + SWIR)**

Les facteurs statistiques de l'ACP pour les bandes du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (VNIR + SWIR) de l'image ASTER (Tableau 6.5) indiquent que plusieurs composants expriment des informations significatives pour la détection des minéraux d'altération. La CP1, avec la valeur propre la plus élevée (603,058060), consiste en des chargements négatifs de toutes les bandes du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (VNIR + SWIR) de l'image ASTER. Ainsi, la CP1 code la luminosité globale de la scène ou albédo, ce qui est responsable d'une forte corrélation entre les bandes spectrales (Loughlin, 1991). La CP2 exprime une composante d'anti-corrélation entre les bandes du visible et proche infrarouge (VNIR) (1, 2 et 3) et les bandes de l'infrarouge à onde courte (SWIR) (4, 5, 6, 7, 8 et 9) et n'est par conséquent pas utile dans ce contexte. La CP5 ne montre pas non plus de charge significative liée aux minéraux d'altération, les CP8 et CP9 étant probablement bourrées de bruits et contiennent peu d'informations en raison de leurs faibles valeurs propres.

La CP3 a une forte charge négative de la bande 2 (-0,44) et une contribution positive de la bande 3 (0,56), ce qui peut indiquer un signal de végétation dominant car la végétation présente une forte réflectance dans la bande 3 et une absorption dans la bande 2 de l'image ASTER (Ninomiya, 2003). La figure 6.18a montre une rampe de pseudo-couleur de l'image en CP3. La plus grande concentration apparente de végétation se situe dans la partie centrale et nord de la zone d'étude, mais la végétation est abondante partout dans le secteur d'étude, en particulier aux abords des cours d'eau.

Les oxydes/hydroxydes de fer peuvent être identifiés dans la CP4 en raison de la charge positive modérée de la bande 2 (0,25) ainsi que de la forte charge négative de la bande 4 (-0,73) (Tableau 6.4d). Une absorption élevée dans la bande 2 et une forte réflectance dans la bande 4 de l'image ASTER sont assez documentées pour les oxydes/hydroxydes de fer (Velosky et al., 2003; Pour et Hashim, 2011). La distribution spatiale des oxydes de fer/hydroxydes de fer a été cartographiée à l'aide d'une pseudo-couleur de l'image en CP4 (Fig. 6.18b). Les concentrations d'oxydes/hydroxydes de fer se trouvent dans les zones élevées du centre et nord, du NE, du SE et du SW de la zone d'étude. Cependant, des concentrations modérées en oxydes/hydroxydes de fer sont observables dans la majeure partie de la zone d'étude.

**Tableau 6.4.** Facteurs statistiques de l'ACP pour les bandes du visible et proche infrarouge, de l'infrarouge à onde courte (VNIR + SWIR) de l'image ASTER

<b>(A) Facteurs statistiques de base</b>						
	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart type	Numéro	Valeur propre
PCA 1	0,00	173,00	111,52	11,89	1	603,058060
PCA 2	0,00	149,00	84,94	11,92	2	128,863163
PCA 3	0,00	128,00	82,45	10,18	3	60,021016
PCA 4	0,00	110,00	67,74	7,21	4	6,014421
PCA 5	0,00	202,00	56,67	8,20	5	3,592924
PCA 6	0,00	238,00	57,84	8,91	6	2,207426
PCA 7	0,00	240,00	53,77	8,98	7	1,587878
PCA 8	0,00	255,00	52,00	9,36	8	0,899975
PCA 9	0,00	236,00	46,42	7,23	9	0,833369

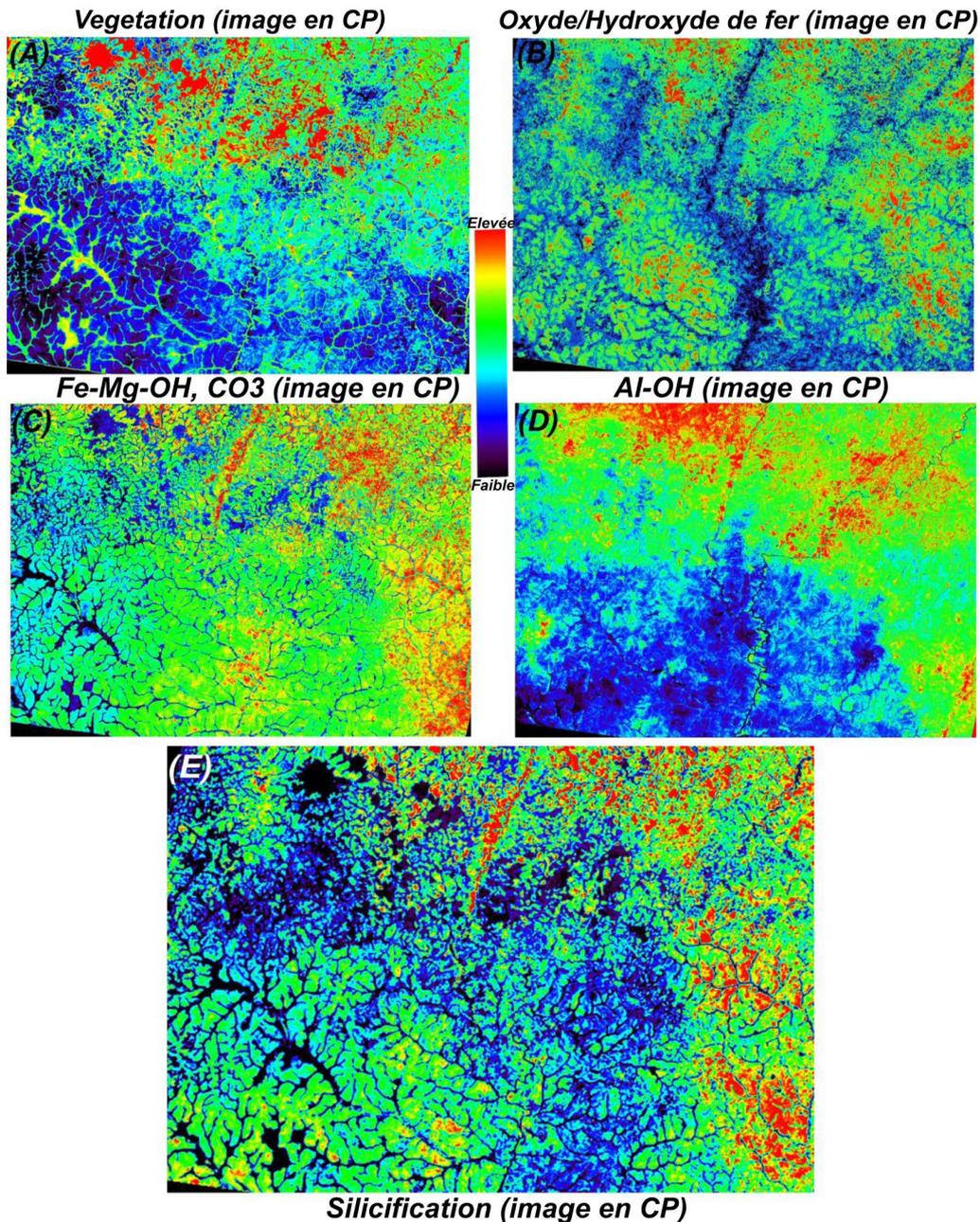
<b>(B) Covariance</b>									
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
PCA 1	141,47	132,15	10,12	63,56	69,60	72,55	73,22	69,26	45,16
PCA 2	132,15	142,16	-21,63	68,15	81,70	86,65	88,25	87,05	58,75
PCA 3	10,12	-21,63	103,69	-1,51	-22,81	-27,37	-29,45	-33,56	-20,89
PCA 4	63,56	68,15	-1,51	52,12	54,75	59,29	57,77	58,81	44,16
PCA 5	69,60	81,70	-22,81	54,75	67,28	72,20	71,96	74,59	55,17
PCA 6	72,55	86,65	-27,37	59,29	72,20	79,49	78,24	81,37	60,45
PCA 7	73,22	88,25	-29,45	57,77	71,96	78,24	80,72	82,73	60,91
PCA 8	69,26	87,05	-33,56	58,81	74,59	81,37	82,73	87,78	65,28
PCA 9	45,16	58,75	-20,89	44,16	55,17	60,45	60,91	65,28	52,33

<b>(C) Matrice de corrélation</b>									
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
PCA 1	1,00	0,93	0,08	0,74	0,71	0,68	0,68	0,62	0,52
PCA 2	0,93	1,00	-0,17	0,79	0,83	0,81	0,82	0,77	0,68
PCA 3	0,08	-0,17	1,00	-0,02	-0,27	-0,30	-0,32	-0,35	-0,28
PCA 4	0,74	0,79	-0,02	1,00	0,92	0,92	0,89	0,86	0,84
PCA 5	0,71	0,83	-0,27	0,92	1,00	0,98	0,97	0,97	0,92
PCA 6	0,68	0,81	-0,30	0,92	0,98	1,00	0,97	0,97	0,93
PCA 7	0,68	0,82	-0,32	0,89	0,97	0,97	1,00	0,98	0,93
PCA 8	0,62	0,77	-0,35	0,86	0,97	0,97	0,98	1,00	0,96
PCA 9	0,52	0,68	-0,28	0,84	0,92	0,93	0,93	0,96	1,00

<b>(D) Vecteur propre</b>									
	Band 1	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 8	Band 9
PCA 1	-0,40	-0,45	-0,10	-0,26	-0,32	-0,35	-0,35	-0,35	-0,25
PCA 2	-0,49	-0,20	-0,78	0,07	0,08	0,12	0,13	0,19	0,15
PCA 3	-0,42	-0,44	0,56	0,25	0,16	0,20	0,16	0,23	0,32
PCA 4	-0,08	0,25	0,18	-0,73	-0,15	-0,24	0,15	0,31	0,39
PCA 5	-0,61	0,70	0,10	0,27	-0,04	-0,05	-0,16	-0,11	-0,01
PCA 6	0,18	-0,04	-0,12	0,18	-0,11	-0,04	-0,57	-0,14	0,74
PCA 7	-0,07	0,05	0,08	-0,45	0,53	0,53	-0,44	-0,10	-0,10
PCA 8	0,03	-0,03	-0,00	0,13	0,04	-0,23	-0,49	0,77	-0,28
PCA 9	-0,00	-0,02	-0,02	0,03	0,73	-0,64	0,07	-0,16	0,08



**Figure 6.18.** Images en CP dérivées de la transformation d'ACP de l'image ASTER de la zone d'étude. (A) Végétation en pixels rouges dans l'image en CP3 du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (*VNIR + SWIR*) d'ASTER; (B) Oxydes/hydroxydes de fer sous forme de pixels rouges dans l'image en CP4 du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (*VNIR + SWIR*); (C) Groupe de minéraux (Fe, Mg)-OH et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> sous forme de pixels rouges dans l'image en CP6 du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (*VNIR + SWIR*); (D) Groupe de minéraux Al-OH sous forme de pixels rouges dans l'image en CP7 du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (*VNIR + SWIR*); (E) Silicification en pixels rouges dans l'image en CP2 de l'infrarouge thermique (*TIR*).

La CP6 a une forte charge négative de la bande 7 (-0,57) et une forte charge positive de la bande 9 (0,74). Les minéraux à (Fe, Mg)-OH et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> tels que la chlorite, l'épidote, la calcite et la dolomite ont une absorption distincte dans les bandes 8 et 9 (2,295 à 2,430 μm) et une absorption plus faible dans la bande 7 (2,235-2,285 μm) de l'image ASTER (Mars et

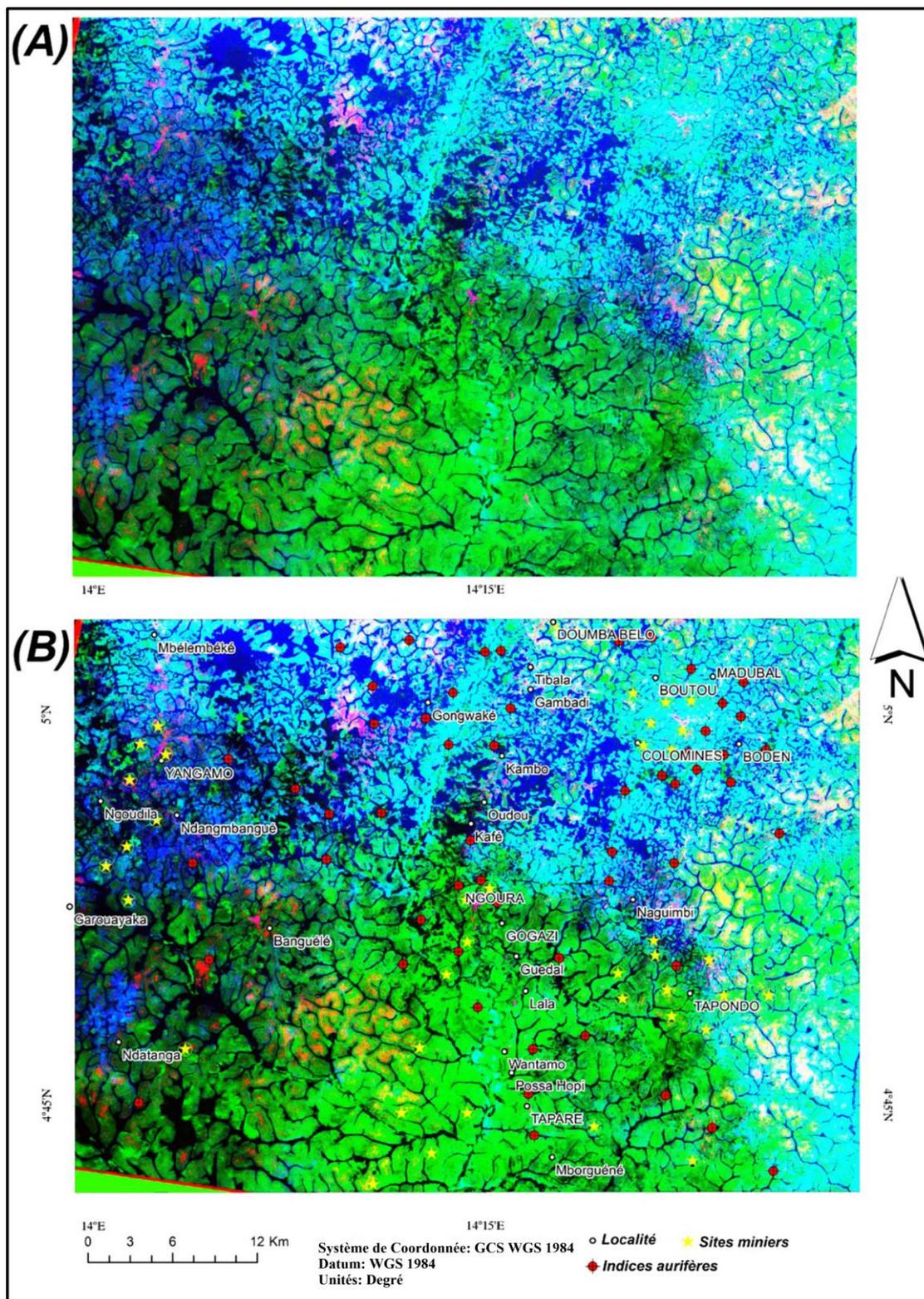
Rowan, 2010). Ainsi, les minéraux (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$  peuvent être cartographiés dans l'image en CP6, représentée par une image en pseudo-couleur en rampe sur la [figure 6.18c](#). Des concentrations élevées de minéraux (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$  apparaissent dans les secteurs NE et Est, nord-centre et sud. Une abondance modérée de ces minéraux est également visible dans les parties centre et sud de la zone d'étude.

Les charges de vecteurs propres de la CP7 indiquent son utilisation pour la cartographie de minéraux Al-OH tels que la kaolinite, l'alunite, la muscovite et l'illite, qui présentent une réflectance élevée dans la bande 4 (1,60-1,70  $\mu\text{m}$ ) et une absorption importante dans les bandes 5 et 6 (2.145-2.225  $\mu\text{m}$ ) de l'image ASTER (Mars et Rowan, 2010). La CP7 a une forte charge négative sur la bande 4 (-0,45) et de fortes charges positives sur les bandes 5 (0,53) et 6 (0,53), de sorte que les minéraux Al-OH apparaissent sous forme de pixels lumineux dans l'image en CP7. La pseudo-couleur en CP7 sur la [figure 6.18d](#) indique des concentrations élevées à modérées de minéraux Al-OH, principalement dans les parties NW et NE de la zone d'étude, bien que d'autres zones plus petites soient observables dans les parties SE et W.

La [figure 6.19a](#) présente une composition colorée en RVB des cartes ASTER en CP4, CP6 et CP7 dans le visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (VNIR + SWIR) de la zone d'étude. Les zones à oxydes/hydroxydes de fer apparaissent sous forme de couleurs magenta et orange, le groupe (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$  se manifestent en vert pâle à vert et les minéraux Al-OH sont visibles en cyan. La plupart des sites miniers et des indices aurifères dans la zone d'étude se situent dans les zones d'altération, composées principalement d'oxydes/hydroxydes de fer et de minéraux Al-OH ([Fig. 6.19b](#)).

### **(iii) L'Analyse en Composante Principale (ACP) de l'image ASTER pour les bandes de l'infrarouge thermique (TIR)**

Le quartz est un minéral commun dans la plupart des roches. Cependant, il ne présente pas de caractéristiques d'absorption spectrale diagnostiques dans les régions de rayonnement visible, proche infrarouge et infrarouge à ondes courtes. De plus, le quartz présente de fortes caractéristiques d'absorption moléculaire fondamentale notamment dans la région infrarouge thermique (8-12  $\mu\text{m}$ ) (Salisbury et Walter, 1989). Le quartz présente des caractéristiques d'absorption dans les bandes 10 et 12 et une émissivité élevée dans la bande 14 de l'instrument ASTER dans la région de l'infrarouge thermique (TIR) (Ninomiya et al., 2005). Le [tableau 6.6](#) présente les facteurs statistiques de l'ACP pour les bandes de l'infrarouge thermique (TIR) d'ASTER.



**Figure 6.19.** Composition colorée en RVB des composants CP4, CP6 et CP7 de l'ACP dans le visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (VNIR-SWIR) d'ASTER. (A) Carte de classification RVB montrant les zones d'altération. (B) Carte de classification RVB avec les sites miniers et les indices aurifères connus.

Une fois de plus, la CP1 exprime l'albédo, dans ce cas comme pondération positive des cinq bandes de l'infrarouge thermique (TIR). La CP2 montre de fortes charges négatives dans les bandes 10 (-0,56) et 12 (-0,45), mais une forte charge positive dans la bande 14 (0,64)

(tableau 6.5d). Par conséquent, la CP2 cartographie la silicification. La figure 6.18e montre une pseudo-couleur de l'image en CP2, affichant les zones silicifiées à forte concentration, principalement dans les secteurs NE et SE de la zone d'étude. Certaines zones silicifiées se remarquent également dans les secteurs SW, centre et nord. Les chargements de vecteur propre de l'infrarouge thermique (TIR) en CP3, CP4 et CP5 ne suggèrent aucune application intéressante pour cette étude.

### VI.2.1.2 Analyse en Composante Indépendante (ACI)

L'ACI a été appliquée aux huit images en CP résultant de l'ACP de l'image Landsat-8 afin d'isoler les pixels les plus indépendants possibles liés aux minéraux d'altération. La comparaison des images en CI obtenues avec les images en CP montre que la CI6 isole la végétation; la CI3 isole les oxydes/hydroxydes de fer; la CI5 isole le groupe des minéraux Al-OH, (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$ ; et la CI2 isole la silicification. La figure 6.20 montre des images pseudo-couleur en rampe pour les données Landsat-8.

**Tableau 6.5.** Facteurs statistiques PCA pour les bandes TIR d'ASTER

**(A) Facteurs statistiques de base**

	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type	Numéro	Valeur propre
PCA 1	0,00	1741,00	1371,01	110,84	1	81071,302647
PCA 2	0,00	1856,00	1474,02	118,04	2	230,052749
PCA 3	0,00	1899,00	1542,14	119,69	3	78,916596
PCA 4	0,00	2230,00	1850,85	141,70	4	64,641629
PCA 5	0,00	2303,00	1933,40	144,37	5	28,065801

**(B) Covariance**

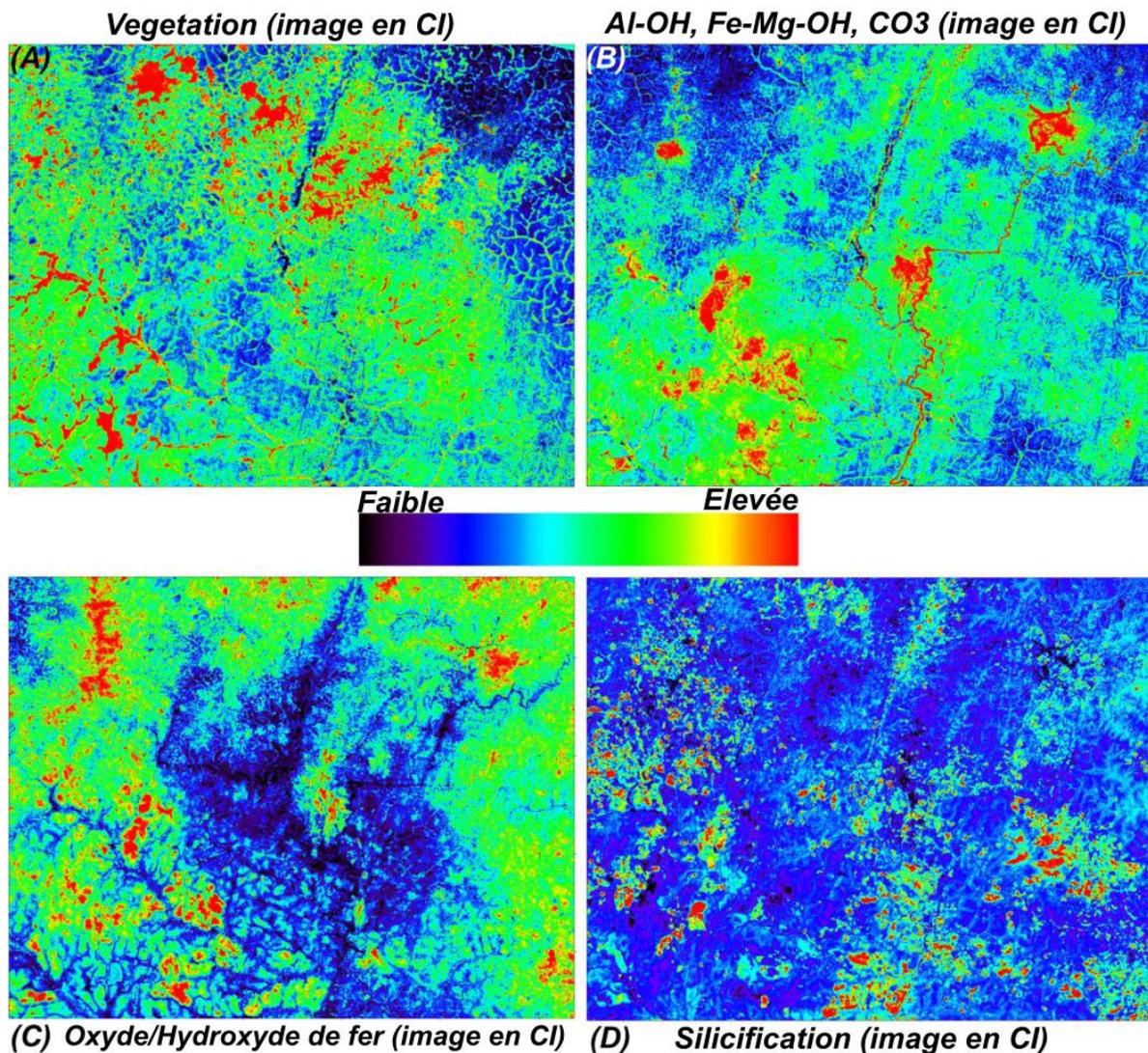
	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14
PCA 1	12287,52	13018,99	13175,34	15585,25	15821,30
PCA 2	13018,99	13934,02	14061,34	16638,71	16882,17
PCA 3	13175,34	14061,34	14326,87	16876,42	17175,84
PCA 4	15585,25	16638,71	16876,42	20080,57	20409,87
PCA 5	15821,30	16882,17	17175,84	20409,87	20843,97

**(C) Matrice de corrélation**

	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14
PCA 1	1,00	0,99	0,99	0,99	0,98
PCA 2	0,99	1,00	0,99	0,99	0,99
PCA 3	0,99	0,99	1,00	0,99	0,99
PCA 4	0,99	0,99	0,99	1,00	0,99
PCA 5	0,98	0,99	0,99	0,99	1,00

**(D) Vecteur propre**

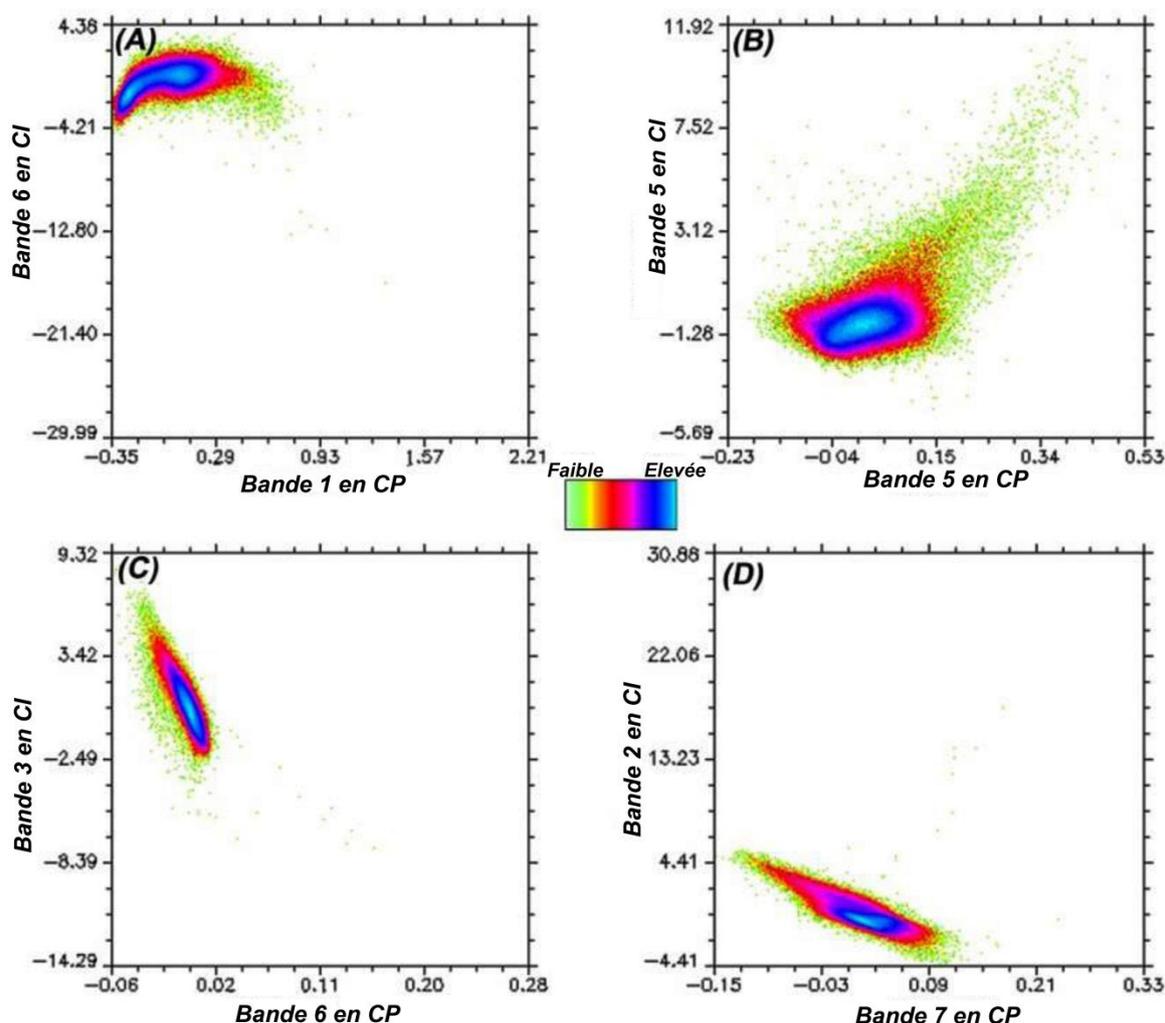
	Band 10	Band 11	Band 12	Band 13	Band 14
PCA 1	0,38	0,41	0,41	0,49	0,50
PCA 2	-0,56	-0,13	-0,45	0,26	0,64
PCA 3	0,50	-0,10	-0,80	0,29	0,07
PCA 4	-0,53	0,65	-0,30	0,36	-0,22
PCA 5	-0,00	0,43	-0,25	-0,68	0,53



**Figure 6.20.** Images en CI dérivées de la transformation par l'ACI des données Landsat-8 couvrant la zone d'étude. Une pseudo-couleur de rampe a été appliquée à chaque image: (A) végétation sous forme de pixels rouges dans l'image en CI6; (B) Groupe de minéraux Al-OH, (Fe, Mg)-OH et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> sous forme de pixels rouges dans l'image en CI5; (C) Oxydes/hydroxyde de fer sous forme de pixels rouges dans l'image en CI3; (D) silicification en pixels rouges dans l'image en CI2.

Les matériaux géologiques d'intérêt apparaissent sous forme de pixels à compte numérique (CN) élevé dans les images et sont visuellement plus puissants que les images en CP (Figs 6.17 et 6.18). Cependant, la distribution des pixels de CN élevé pour le groupe des minéraux Al-OH, (Fe, Mg)-OH et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> est nettement différente dans les images en CI5 et CP5, et apparaît beaucoup plus concentrée dans l'image en CI5 (Figs 6.18b et 6.20b). Nous pouvons quantifier la relation entre les données d'image d'ACI et d'ACP et essayer d'identifier les classes spectrales correspondant à des classes distinctes de couverture du sol (pixels) à l'aide de diagrammes de dispersion 2D. La figure 6.21 présente des diagrammes de dispersion 2D pour la CI6 par rapport à la CP1, la CI5 par rapport à la CP5, la CI3 par rapport à la CP6 et la CI2 par rapport à la CP7.

Le diagramme de dispersion 2D de la bande 6 par rapport à la bande 1 de la CP montre une bonne corrélation linéaire et une forte anisotropie au centre du nuage (Fig. 6.21a), ce qui contribue le plus à la variance (Pour et al., 2018a). Les deux classes spectrales de cette parcelle ont des formes similaires à queue courte. Cette observation permet de conclure qu'il existe une corrélation spectrale entre la CI6 et la CP1 (elles dépendent spectralement l'une de l'autre) et les deux composantes indiquent une classe de matériaux distincts (végétation). Par conséquent, les images en CI6 (Fig. 6.20a) et Landsat-8 en CP1 (Fig. 6.16a) cartographient et distinguent le couvert végétal dans la zone d'étude, l'image en CI6 montrant le contraste le plus net. Ces cartes nous permettent de distinguer les zones à fort couvert végétal des zones d'altération et par la suite, malgré l'abondance de la végétation, de se concentrer sur la cartographie des minéraux d'altération associés à la minéralisation aurifère en surface dans la zone d'étude.



**Figure 6.21.** Diagrammes de dispersion 2D pour les bandes en CI et CP de Landsat-8 utilisés dans cette étude. (A) bande en CI6 et bande en CP1 pour la végétation; (B) Bande en CI5 et bande en CP5 pour les minéraux Al-OH, (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$ ; (C) Bande en CI3 et la bande en CP6 pour les oxydes/hydroxydes de fer; et (D) Bande en CI2 avec la bande en CP7 pour la silicification.

Le diagramme de dispersion 2D de la bande de 5 en CI par rapport à la bande 5 de CP de Landsat-8 (Fig. 6.21b) montre une corrélation linéaire entre deux classes spectrales présentant des formes à longue queue. Les deux images cartographient une classe spectrale géologique commune. La comparaison des images en CI5 et en CP5 (Figs 6.16b et 6.20b) montre que le contraste et la distribution spatiale des pixels (avec une abondance de minéraux Al–OH, (Fe, Mg)–OH et  $\text{CO}_3^{2-}$ ) sont plus forts et plus nombreux et nettement défini dans l'image en CI5. Ainsi, l'image en CI5 semble la plus appropriée pour cartographier ces phases d'altération.

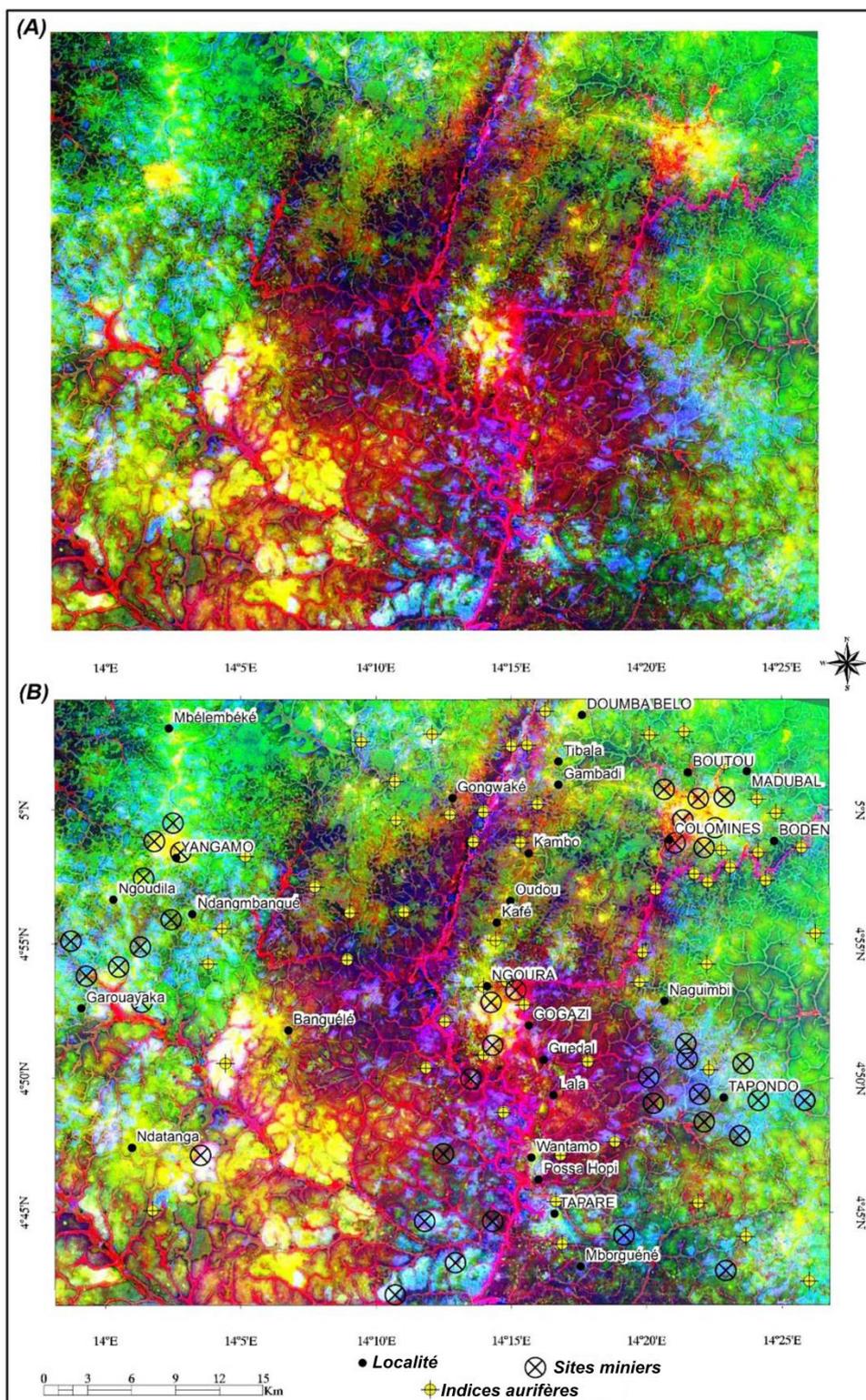
Le diagramme de dispersion 2D de la bande 3 en CI par rapport à la bande 6 de la CP de Landsat-8 montre une corrélation linéaire entre deux classes spectrales présentant des formes à queue courte, confirmant ainsi l'impression visuelle de similarité entre les images de la CI3 (Fig. 6.16c) et la CP6 (Fig. 6.20c). Les deux images mettent en évidence les classes spectrales des minéraux oxydes/hydroxydes de fer. L'ACI dans ce cas n'apporte pas beaucoup de clarté car la discrimination l'ACP était déjà suffisante.

Le diagramme de dispersion 2D de la bande 2 en CI par rapport à la bande 7 de la CP de Landsat-8 indique également une corrélation linéaire entre deux classes spectrales présentant des formes à queue courte. La classe de matériaux géologiques recherchée ici (silicification) est identifiée par les deux classes spectrales, mais la comparaison entre la CP7 (Fig. 6.16d) et la CI2 (Fig. 6.20d) montre que les pixels à forte densité (CN élevé) marquant la silicification sont définis plus nettes dans l'image en CI2.

Après avoir établi que les images Landsat-8 en CI5, CI3 et CI2 identifient chacune un assemblage de minéraux d'altération clé, nous les avons combiné dans une composition colorées RVB pour élaborer une carte de classification basée sur les couleurs (Fig. 6.22a).

Les zones à forte abondance superficielle des minéraux Al–OH, (Fe, Mg)–OH et  $\text{CO}_3^{2-}$  apparaissent en rouge et magenta et soulignent principalement le réseau hydrographique. Les pixels verts montrent la répartition en surface des oxydes/hydroxydes de fer, largement répartis dans la zone d'étude, le sol étant principalement latéritique rouge vif. Les pixels bleus et cyan caractérisent la silicification dans la zone d'étude. Plusieurs zones jaunes sont observables dans les parties NE, NW, centre et SW de la zone d'étude, qui combinent les groupes minéraux argile/carbonate et oxydes/hydroxydes de fer. En comparant la cartographie des altérations aux emplacements connus des sites miniers et des indices aurifères (Fig. 6.22b), il apparaît clairement que la plupart des sites miniers sont situés dans des zones jaunes et cyan et que les indices aurifères sont généralement signalés à proximité de ces zones d'altération. La partie SW de la zone d'étude contient des pixels jaunes indiquant des

zones enrichies en minéraux Al–OH, (Fe, Mg)–OH, CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> et en oxydes/hydroxydes de fer, qui pourraient représenter une zone potentielle de minéralisation aurifère encore non exploitée.



**Figure 6.22.** Carte en composition colorée RVB des images Landsat-8 en CI5, CI3 et CI2 de la zone d'étude. (A) Carte de classification RVB sans superposition. (B) Carte de classification RVB avec superposition de coordonnées géographiques, de sites miniers et d'indices aurifères connus.

L'ACI a été répétée en utilisant les résultats des ACP des bandes ASTER du visible et proche infrarouge, de l'infrarouge à ondes courtes et de l'infrarouge thermique (*VNIR + SWIR et TIR*). Comme avec les résultats de Landsat-8 présentés ci-dessus, les images en CI isolent avec succès des pixels indépendants associés à des classes distinctes de matériaux géologiques. Dans l'ACI basée sur les bandes ASTER du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à ondes courtes (*VNIR + SWIR*), la CI1 collecte des pixels totalement indépendants de minéraux (Fe, Mg)–OH, la CI2 représente des pixels indépendants de minéraux Al–OH, la CI3 insiste sur la végétation et la CI5 met en évidence les oxydes/hydroxydes de fer. Pour l'ACI des bandes ASTER de l'infrarouge thermique (*TIR*), la CI2 contient des pixels indépendants marquant la silicification.

### ***VI.2.1.3 Analyse des rapports et combinaisons de bandes***

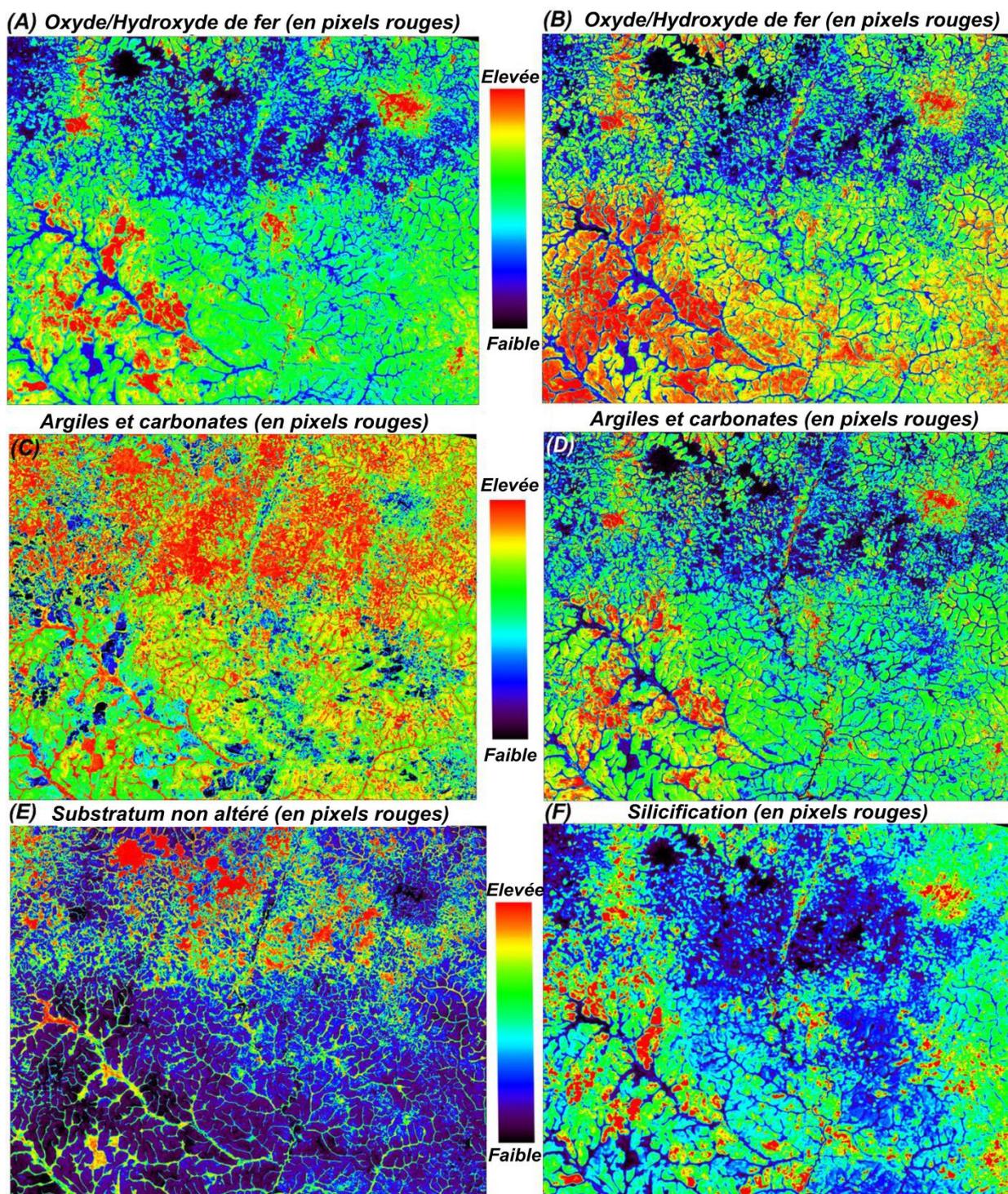
#### ***(i) Rapports et combinaisons de bandes de Landsat-8***

Des ratios et combinaisons de bande spectrale clés ont été sélectionnés pour faire ressortir les minéraux d'altération sous forme de pixels brillants à CN élevé dans les scènes de la zone d'étude. La [figure 6.23](#) montre les images Landsat-8 dérivées des rapports de bandes décrits à la section II.2.4.2 du chapitre II. Des rampes de pseudo-couleurs sont utilisées dans chaque cas pour visualiser les pixels à CN élevée pour les rapports de bandes sélectionnés.

La [figure 6.23a](#) présente l'image du rapport de bande Landsat-8 4/2, conçue pour faire ressortir les groupes de minéraux oxydes/hydroxydes de fer sous forme de pixels à CN élevé. Celles-ci sont principalement concentrées dans les sites miniers et les zones environnantes.

En revanche, l'indice de la minéralisation ferrifère (*Fe-MI*) de [Pour et al. \(2018c\)](#), c'est-à-dire les bandes Landsat-8 (6/5)×(4/3) ([Fig. 6.23b](#)) affichent des pixels lumineux dans la majeure partie de la zone d'étude, à l'exception de la partie nord. La différence entre ces deux indices s'explique par le fait que le *Fe-MI* est sensible à la fois aux caractéristiques de transfert de charge  $Fe^{2+}$  et  $Fe^{3+}$  et d'absorption du champ cristallin proches de 0,9 à 1,2  $\mu m$  et de 0,45 à 0,9  $\mu m$  ([Morris et al., 1985; Sherman et Waite, 1985](#)). Ainsi, les chapeaux de fer prépondérant dans la région, apparaissent brillants sur l'image *Fe-MI*. Le rapport de bandes 4/2, en revanche, est plus spécifiquement sensible au  $Fe^{3+}$  dans les oxydes/hydroxydes de fer, qui est concentré dans les zones d'altération associées à la minéralisation en or.

Le rapport de bandes Landsat 6/7, choisi pour cartographier les minéraux Al–OH, (Fe, Mg)–OH et  $CO_3^{2-}$ , produit une image qui indique la présence des minéraux argileux et carbonatés dans le secteur d'étude, et dans la partie nord où le couvert végétal est très dense ([Fig. 6.23c](#)).



**Figure 6.23.** Rapport et combinaison de bandes Landsat-8 de la zone d'étude. Des pseudo-couleurs en rampe ont été appliquées à chaque image. (A) rapport de bandes 4/2; (B) Combinaison de bandes  $(6/5) \times (4/3)$ ; (C) Rapport de bandes 6/7; (D) Combinaison de bandes 6/  $(7 \times 7)$ ; (E) Rapport de bandes 5/6 et (F) Combinaison de bandes  $(10+11) \times 11$ .

En fait, ce rapport de bande recouvre la bande spectrale lignine-cellulose de  $2,20 \mu\text{m}$  (Galvao et al., 2005) et la couverture végétale interfère donc avec la détection des minéraux argileux et carbonatés. Les bandes d'absorption qui se chevauchent dans le sol latéritique très répandu ici peuvent également se faire passer pour des groupes de minéraux argileux et

carbonatés. Une meilleure discrimination des minéraux argileux et carbonatés provenant de ces deux sources d'interférences subtropicales peut être obtenue en augmentant la contribution de l'absorption dans la bande 7. En effet, l'indice de la minéralisation Al-OH (*Al-OH-MI*) de Pour et al. (2018c), bandes 6/(7×7), présente des pixels brillants spécifiquement concentrés dans et autour des sites miniers, séparant ainsi les minéraux d'altération de la latérite et du couvert végétal (Fig. 6.23d).

Pour la cartographie des roches non altérées et des minéraux silicatés courants, le rapport de bande 5/6 a été utilisé. L'image de cette bande (Fig. 6.23e) montre une concentration de pixels brillants principalement dans la partie nord de la zone d'étude, à l'écart de toutes les zones d'altération hydrothermale détectées par d'autres images.

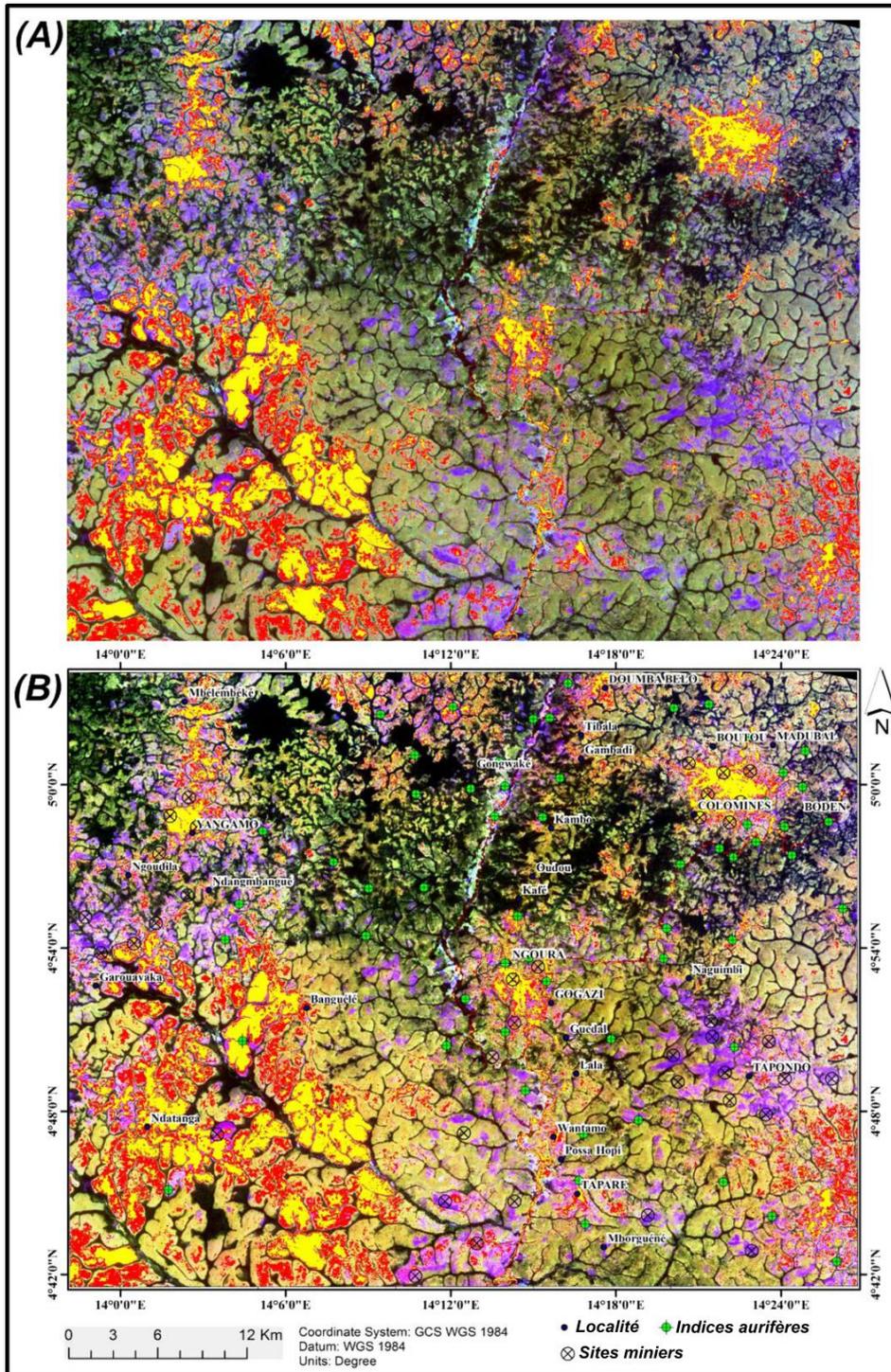
Les zones silicifiées dans la zone d'étude ont été ciblées avec la combinaison de bandes (10+11)×11 (*TRLI*). Les pixels à CN élevé sur la figure 6.23f marquent des zones riches en quartz. Ces zones sont spatialement associées à des sites miniers connus.

Les informations sur les assemblages d'altération des différentes combinaisons de bandes sélectionnées pour Landsat-8 ont été assemblées dans une image de combinaison RVB, le rouge indiquant le rapport de bande 4/2, le vert l'indice de la minéralisation Al-OH (*Al-OH-MI*) 6/(7×7) et le bleu la combinaison de bandes (10+11)×11 (*TRLI*) (Fig. 6.24). Sur cette image, les zones riches en oxydes/hydroxydes de fer apparaissent en jaune; les minéraux Al-OH, (Fe, Mg)-OH et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> apparaissent en rouge; et les zones silicifiées sont en violet (Fig. 6.24a). En superposant les emplacements des sites miniers connus et les indices aurifères (Fig. 6.24b), il apparaît que les zones d'altération hydrothermale identifiées sont étroitement concordantes avec la minéralisation aurifère dans la zone d'étude. De plus, les zones jaunes et violettes concentrées dans la partie SW de la zone d'étude sont identifiées comme des zones à fort potentiel de minéralisation encore inexploitées et qui pourraient être de bon prospects pour une future exploration détaillée.

### ***(ii) Rapports et combinaisons de bandes d'ASTER***

La figure 6.25 montre des images des combinaisons et des rapports de bandes d'ASTER identifiées dans la section II.2.4.2 du chapitre II comme susceptibles de cartographier des minéraux d'altération particuliers.

La distribution de l'abondance en surface des oxydes/hydroxydes de fer déduite de la combinaison de bandes d'ASTER (4/3)×(2/1) (Fig. 6.25a) est essentiellement similaire à celle observée dans les rapports et combinaisons de bandes Landsat-8 (Figs 6.23a-b ; 6.25a) bien que certaines différences spatiales soient observées.

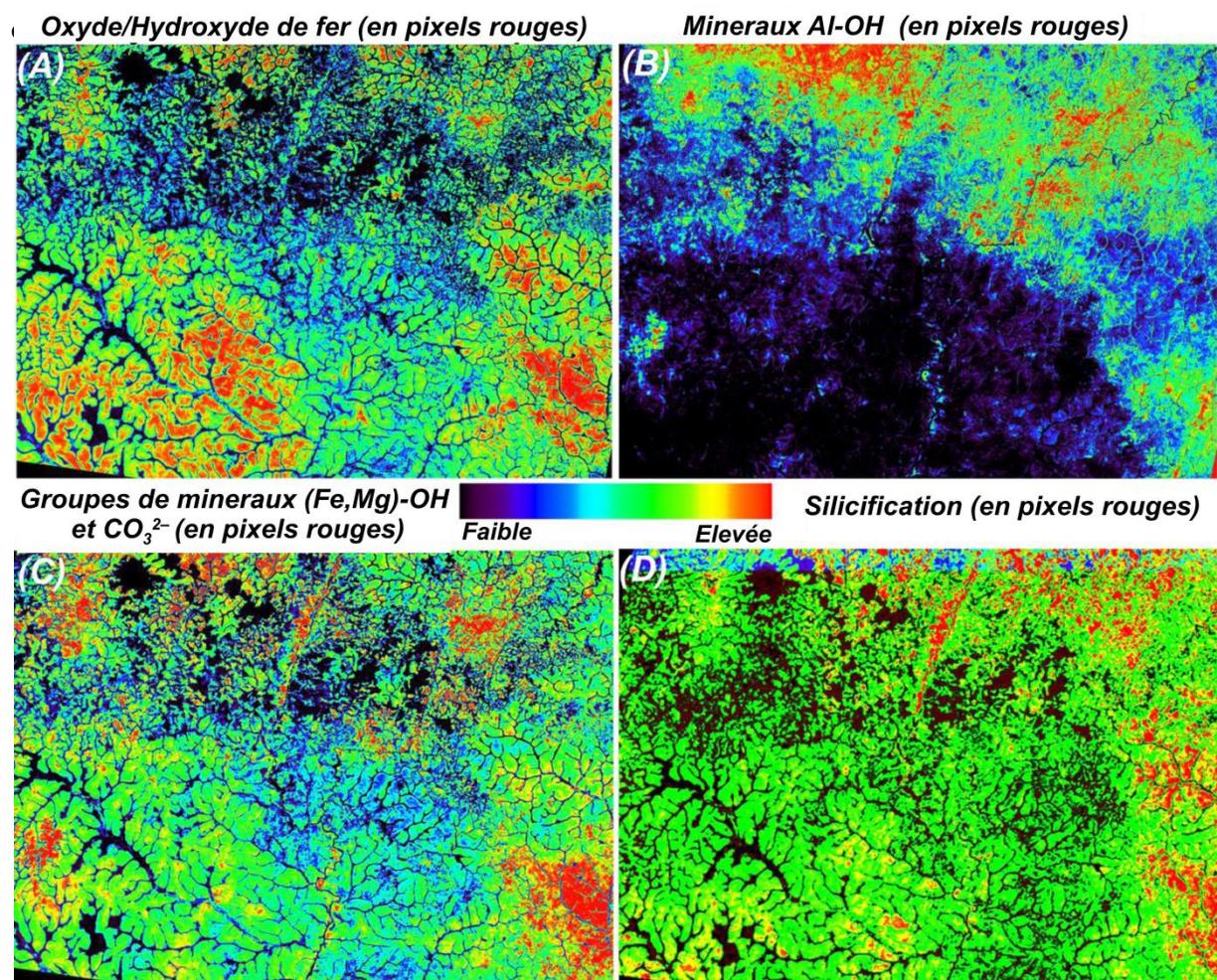


**Figure 6.24.** Image de combinaison de couleurs RVB de la zone d'étude utilisant les ratios et les combinaisons de bandes Landsat-8: rouge =  $4/2$ , les minéraux oxyde/hydroxyde de fer; vert =  $6/(7 \times 7)$ , l'indice de la minéralisation Al-OH; bleu =  $(10+11) \times 11$ , les zones silicifiées. Sur cette image, les minéraux Al-OH, (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$  apparaissent en rouge; les oxydes /hydroxydes de fer apparaissent en jaune et la silicification en violet. (A) Carte de classification RVB sans superposition. (B) Carte de classification RVB avec superposition de coordonnées cartographiques, de sites miniers et d'événements aurifères connus.

La figure 6.25a dévoile les chapeaux de fer dans la zone d'étude majoritairement constituée de paléosol subtropical, ainsi qu'une altération liée à la minéralisation aurifère en surface et par conséquent met en évidence la sensibilité des bandes ASTER aux caractéristiques d'absorption de  $\text{Fe}^{2+}$  et  $\text{Fe}^{3+}$ .

La combinaison de bandes ASTER (5×7)/(6×6) vise les minéraux Al–OH. L'image de cette bande (Fig. 6.25b) montre des concentrations de pixels brillants principalement dans les parties N, NE et SE de la zone d'étude. De même, la combinaison de bandes (7×9)/(8×8), qui détecte les groupes de minéraux (Fe, Mg)–OH et CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>, indique les zones claires des parties NE, NW, SE et SW de la zone d'étude (Fig. 6.25c). La comparaison avec les résultats analogues de Landsat-8 (Figs 6.23c-d) donne un résultat similaire avec seulement des différences mineures.

Enfin, la combinaison de bande ASTER (10+11+12)/(13+14), conçue pour les zones silicifiées, est brillante dans les parties E et NE de la zone d'étude, ainsi que dans les parties SW et NW (Fig. 6.25d). La distribution de la silicification inférée à partir des bandes ASTER de l'infrarouge thermique (TIR) est assez différente de celle obtenue à partir l'image analogue Landsat-8 (Fig. 6.23f). Les zones silicifiées détectées par l'image Landsat-8 montrent une relation spatiale étroite avec les indices aurifères et les sites miniers, alors que les zones éclairées par l'image ASTER sont généralement éloignées des zones minières et des placers à



**Figure 6.25.** Rapports et combinaisons de bandes ASTER de la zone d'étude. (A) Combinaison de bandes (4/3)×(2/1); (B) Combinaison de bandes (5×7)/(6×6); (C) Combinaison de bandes (7×9)/(8×8); (D) Combinaison de bandes 6/(7×7).

## VI.3 PÉTROGRAPHIE ET MINÉRALOGIE DE LA MINÉRALISATION AURIFÈRE

### VI.3.1 Minéralisation aurifère et altération hydrothermale associée

#### VI.3.1.1 *Style de minéralisation*

Dans le secteur Ngoura-Colomines, les minéralisations aurifères sont soit disséminées dans les massifs granitiques, soit dans les systèmes de veines à quartz dominant avec 4-6% de sulfures et 5-13 % de minéraux carbonatés. Ces veines contiennent également de l'albite, du mica blanc et de la chlorite. L'on note de fortes variations latérales à petite échelle dans les parois d'altération au fur et à mesure qu'on s'éloigne des zones minéralisées. Les halos d'altération s'étendent latéralement à partir de la minéralisation aurifère de quelques centimètres jusqu'à des plusieurs kilomètres. En général, il existe une corrélation positive entre la taille du gisement et l'étendue latérale de l'altération. Les minéraux diagnostiques de la minéralisation aurifère sont le quartz, la séricite et la pyrite. Il existe un fort contrôle structural de la minéralisation aurifère le long des fractures et des zones de cisaillement ductilo-fragile orientées NNE-SSW à E-W traversant la zone d'étude, notamment aux échelles locales et régionales ([voir le chapitre 4 consacré à l'analyse structurale](#)). A l'échelle de l'affleurement, il s'agit essentiellement des fractures et veines de quartz minéralisées principalement orientées dans les directions NE-SW, NNE-SSW à pratiquement E-W ([Fig. 6.26](#)). Les micro-fractures sont donc génétiquement liées aux veines principales et abritent des veinules de quartz  $\pm$  carbonate  $\pm$  or.

#### VI.3.1.2 *Description de l'altération hydrothermale*

L'altération hydrothermale à Ngoura-Colomines est visible à diverses échelles, de la lame mince à l'échelle régionale en passant par les échelles macroscopiques et mésoscopiques. Les différents types d'altération identifiés comprennent les variétés potassique, séricitique et argilique.

L'altération potassique est bien exprimée dans les villages de Yangamo-Ndatanga, Taparé-Tapondo et Ngoura-Colomines et consiste en des biotites secondaires, des feldspaths potassiques et des porphyres à plagioclase et quartz ([Fig. 6.27](#)). L'altération séricitique est plus largement répandue et implique principalement la formation de séricite et de quartz avec une quantité variable de minéraux opaques ([Figs. 6.27a,c,e,g](#)).

Les veines de quartz minéralisées dans la région de Ngoura-Colomines sont composées d'un mélange de quartz, d'hématite-limonite et des minéraux argileux ([Fig. 6.28](#)). On distingue trois zones d'altération latérale autour des veines de quartz aurifères:

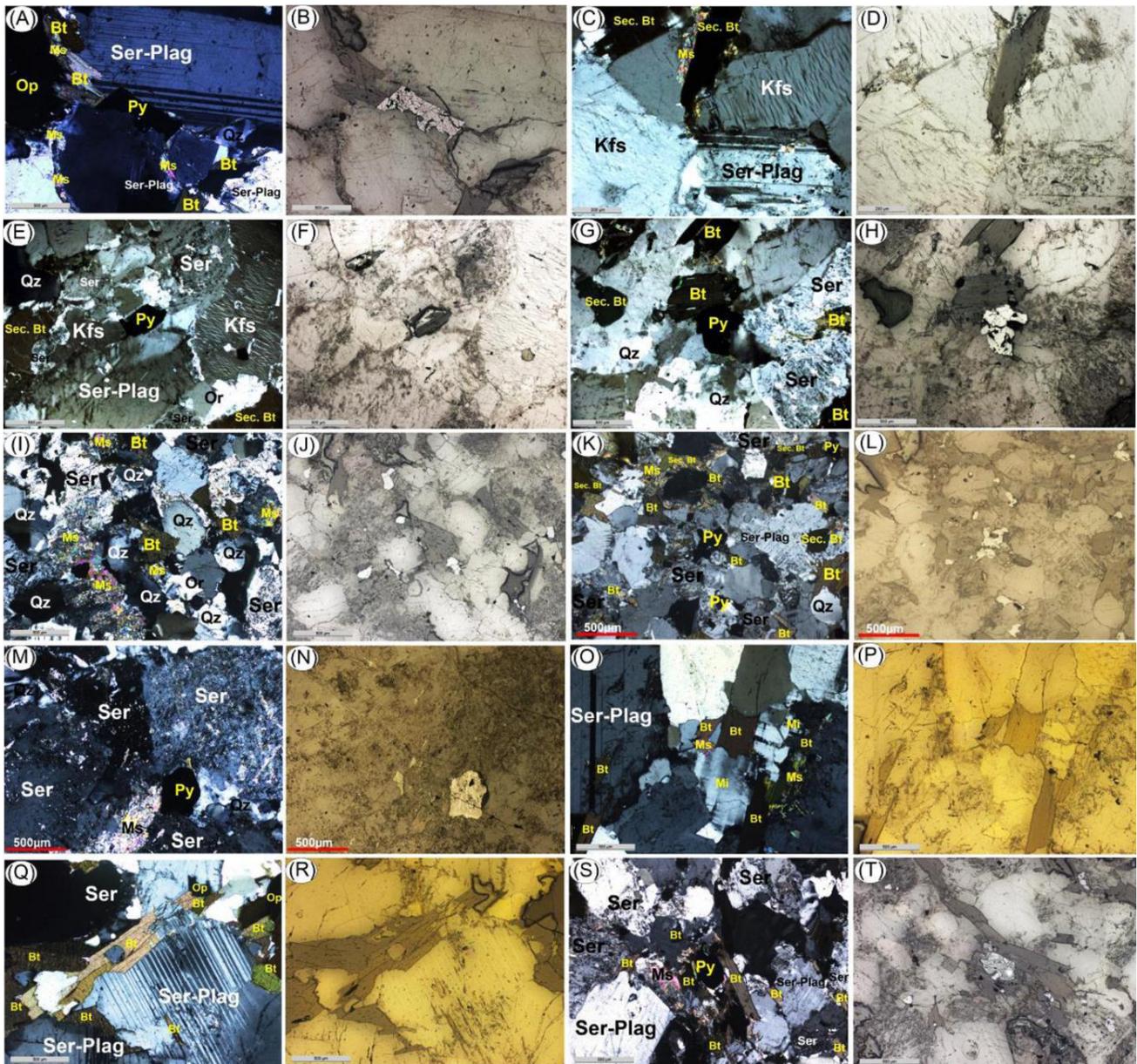


**Figure 6.26.** Évidences de terrain de la minéralisation aurifère et de l'altération hydrothermale associée. A) Veine de quartz aurifère très fracturée et altérée ;B) Sulfures de fer (pyrite, chalcopyrite et pyrrhotite) disséminés dans la paroi rocheuse en cours d'altération ; C) Couche de sulfures (pyrite et chalcopyrite) massifs ; D) Veine de quartz minéralisée à proximité de Boden et de Madubal; E) Veine de quartz aurifère à Colomines montrant des pores ; F) Boule de granite isolé dans le manteau d'altération: notez l'altération potassique.

### i) Zone d'altération distale

La zone d'altération externe est dominée par la kaolinisation et la surimpression ferrugineuse par des processus d'altération chimique proches de la surface. Elle n'est pas directement liée au processus de minéralisation. Ces zones sont généralement situées à au

moins 100 m des veines de quartz aurifères et se distinguent facilement par leur couleur gris jaunâtre caractéristique (Fig. 6.28).

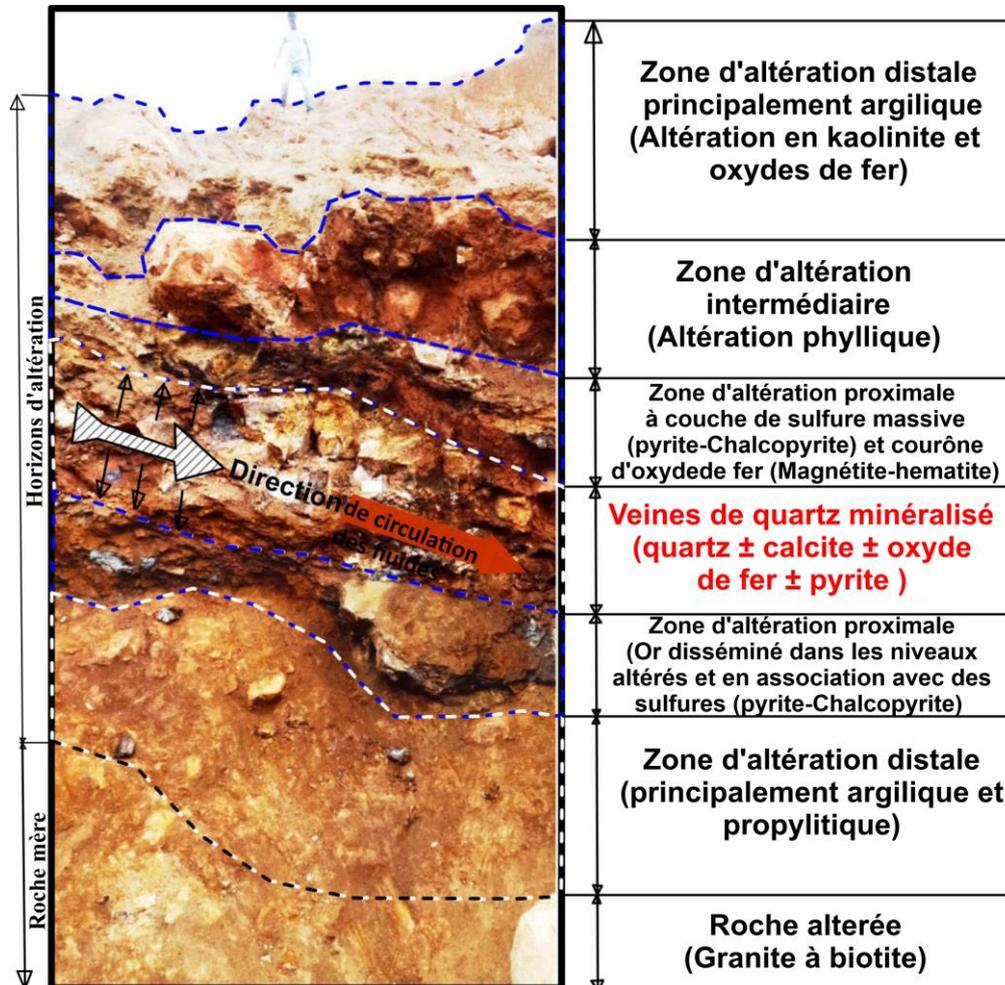


**Figure 6.27.** (A-H) Aspects microscopiques des granites à mégacristaux de feldspath de Kpangara Kadei, (I-N) Granites à biotite de Madubal et (O-T) des granites à biotite de Boben. (O) Notez la texture grenue porphyroïde, (E, G, I, S) Texture proto-mylonitique dans la plupart des échantillons et la séricitisation des feldspaths.

## ii) Zone d'altération intermédiaire

Dans cette zone de transition, l'altération potassique est très bien développée. Elle se caractérise par l'abondance des minéraux, secondaires pour la plupart, reflétant divers types d'altération. Il s'agit entre autres de plagioclase séricitisé (Plag-ser), de la biotite secondaire (Bt-sec), du feldspath potassique, de la séricite et d'énormes quantités de quartz. La

silicification est représentée par le quartz automorphe à sub-automorphe, les veinules mineures et les stocks de silice cryptocristalline. La séricitisation est associée à une altération complète des feldspaths primaires en séricite et moins fréquemment en muscovite. On note entre autre des grains de pyrite disséminés dans les feldspaths séricitisés (Figs. 6.28 et 6.29).



**Figure 6.28.** Profil d'altération type des sites miniers de la zone Colomines montrant des halos d'altération hydrothermale.

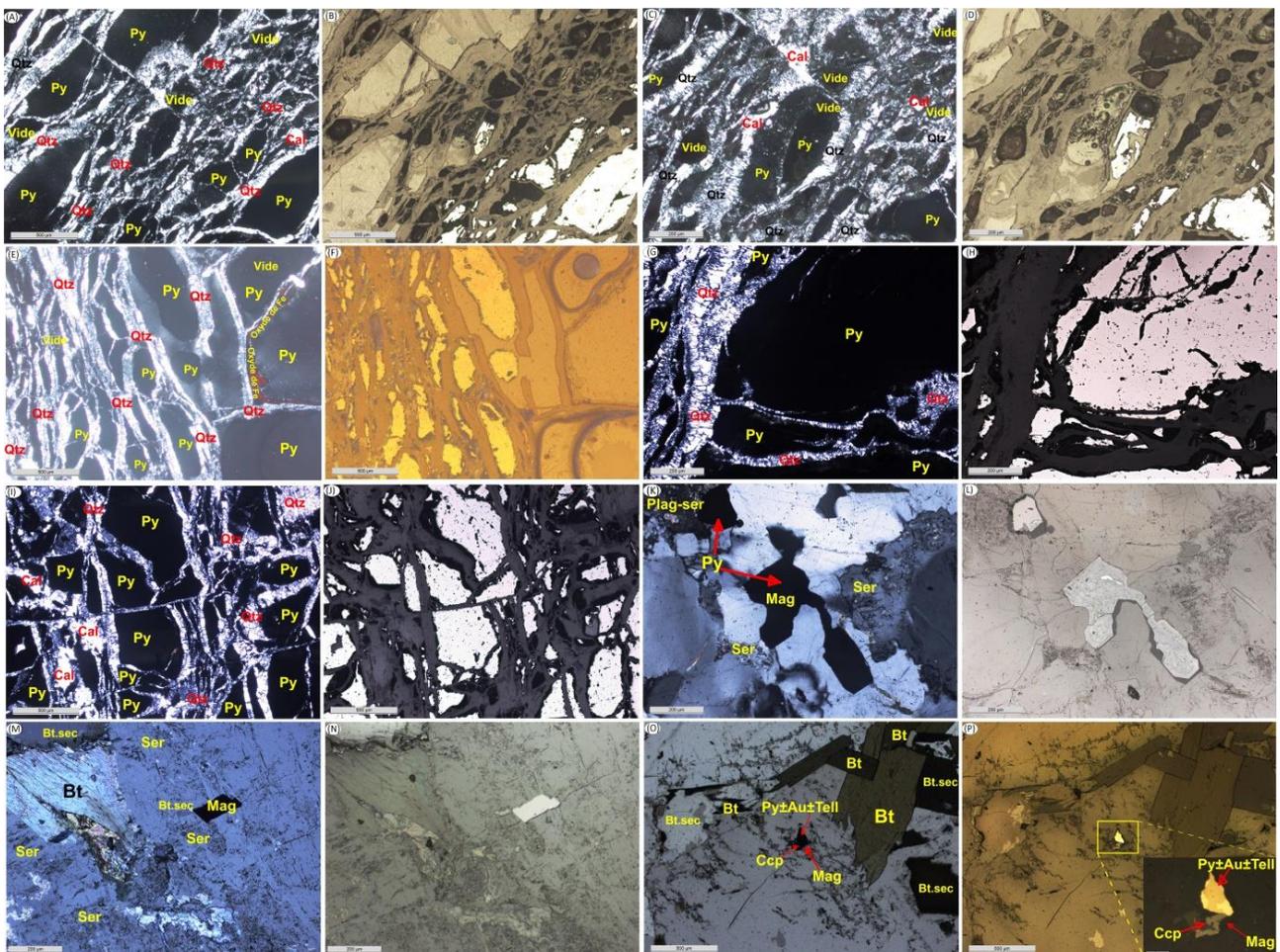
- **Zone d'altération proximale**

Cette zone est principalement composée de sulfures tels que pyrite et chalcopyrite, cimentées par de la silice dans des filons de quartz + calcite minéralisés, ainsi que de réseaux très poreux de fibres de silice et d'oxyde de fer à texture de remplissage (Figs 6.29 a-j). Les roches conservées entre les filons sont principalement constituées de quartz, de mica blanc et de pyrite. De grands vides ont été observés aussi bien dans les échantillons récoltés que sur l'affleurement. La relation entre la veine minéralisée et l'altération suggère que les fluides responsables de l'altération ont circulé à travers le canal actuellement occupé par un remplissage de quartz automorphe et de calcite. Par conséquent, le remplissage de porosité était le mécanisme clé de la silicification. La pyrite est abondante dans la zone proximale et

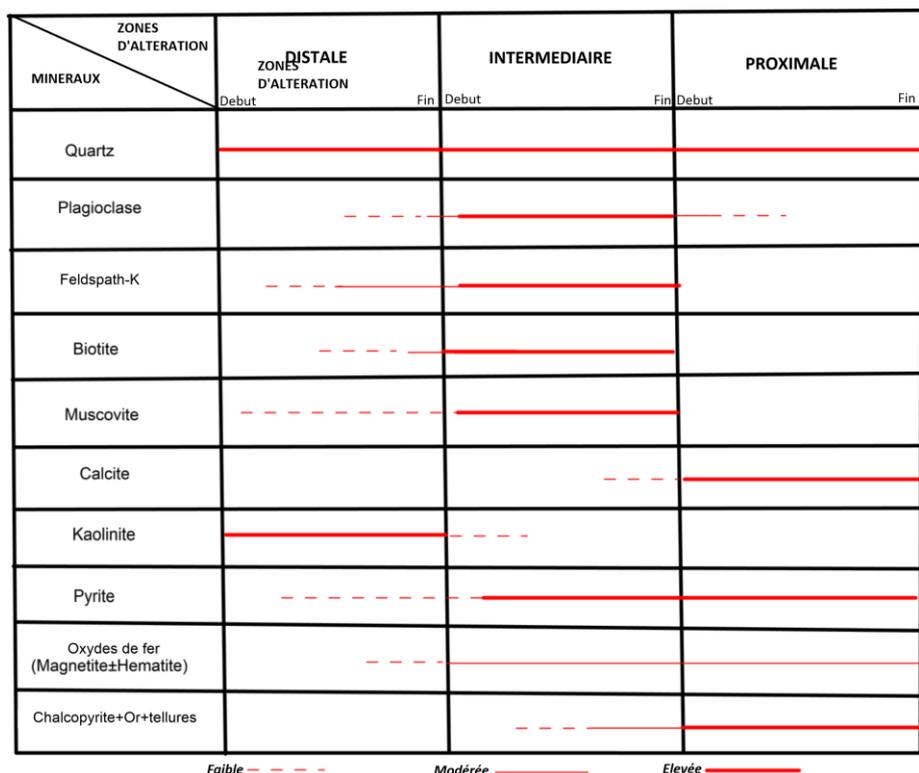
diminue au fur et à mesure que l'on s'éloigne des veines centrales (Figs 6.28 et 6.29). Les sulfures sont associés à l'hématite.

Ce modèle d'altération par zones concentriques caractérisées par des minéraux spécifiques (diagnostiques) est un guide d'exploration permettant de localiser les veines éventuellement minéralisées dans le district aurifère de Ngoura-Colomines.

Au terme de notre étude sur l'altération hydrothermale, une séquence paragénétique synthétique a été élaborée. Cette dernière montre une zone distale d'altération argilique dominée par la kaolinite et les oxydes de fer; une zone intermédiaire d'altération potassique-phyllique-oxyde de fer et à muscovite-pyrite, qui passe progressivement en une zone proximale de quartz ± calcite ± oxyde de fer ± pyrite directement adjacente à la veine minéralisée (Fig. 6.30).



**Figure 6.29.** (A-J) Aspects microscopiques des veines de quartz ± calcite minéralisées, notez la texture de remplissage; (K-N) Granites à biotite de Ngoura et (O et P) Granites à biotite de Yangamo; notez l'altération partielle de la biotite primaire en biotites secondaires et la séricitisation des plagioclases. Les sulfures sont présents dans toutes les lames minces étudiées; (P) Noter l'association de la chalcopyrite + or + tellures.

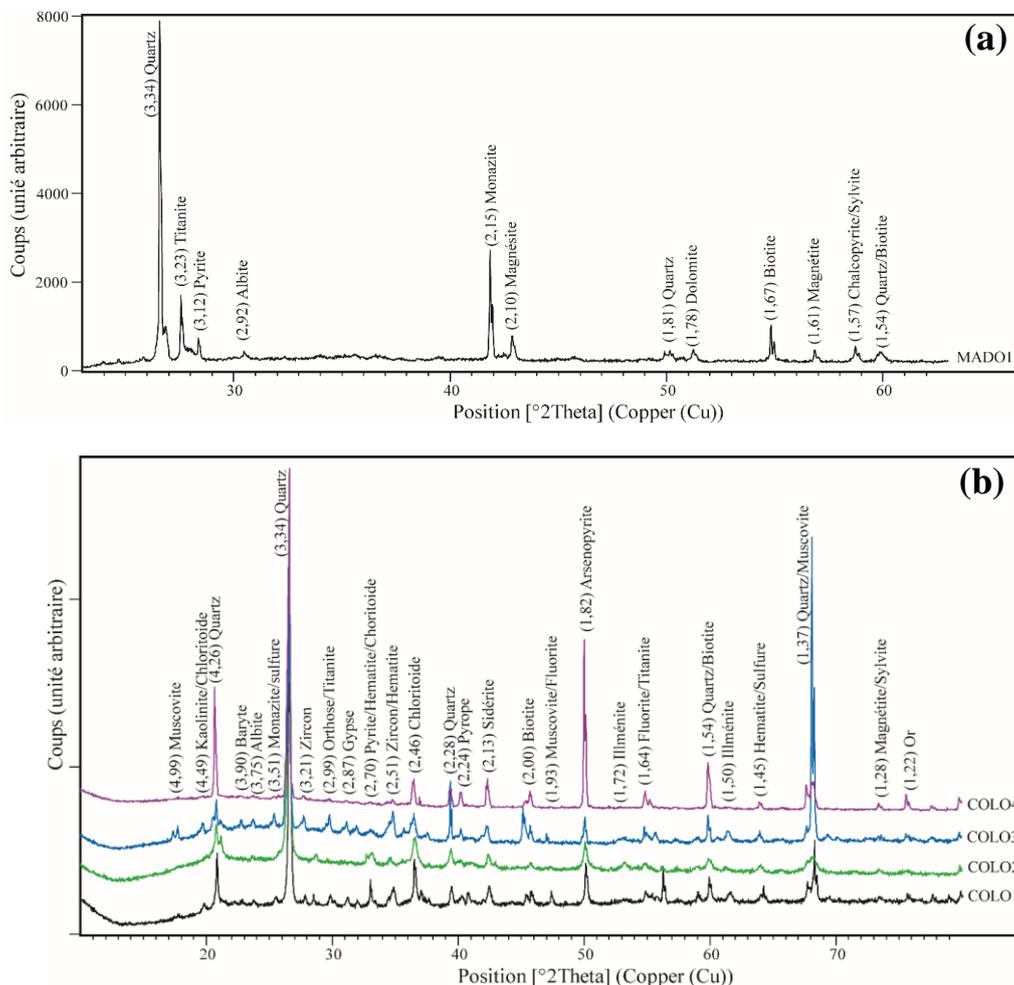


**Figure 6.30.** Séquence paragénétique d'altération dans le district aurifère de Ngoura-Colomines

### VI.3.2 Minéralogie d'altération par diffraction des rayons X (DRX)

Cinq (05) échantillons dont quatre issus des halos d'altération et un granite frais ont été sélectionnés pour les études minéralogiques par diffraction des rayons X (DRX). La détection des minéraux a été effectuée par le logiciel Highscoresplus et les abaques conventionnels de dépouillage tels que le manuel de recherche selon la méthode [Hanawalt, détaillé par Cullity \(1978\)](#) à partir des diffractogrammes sur les poudres obtenues. L'inspection visuelle des hauteurs relatives des pics les plus forts donne une idée qualitative des proportions de minéraux ([Fig. 6.31](#)). La roche saine (granite, échantillon MADO1) montre, les pics de diffraction des rayons X associés aux minéraux primaires tels que le quartz, la titanite, la monazite, l'albite, la magnétite et la biotite avec les pics les plus prononcés sans toutefois négliger bien qu'en faibles proportions les minéraux tels que la pyrite, la dolomite, la chalcopyrite et la sylvite ([Fig. 6.31a](#)). Les quatre échantillons (COLO1-COLO4) issus des produits de l'altération autour des veines de quartz aurifère présente des pics caractéristiques des phases d'altération. Ces échantillons ont un cortège minéralogique proche de la roche dont elles en résultent bien qu'ayant de nouveaux minéraux qui proviendraient de la transformation des minéraux de la roche saine. L'échantillon COLO1, provenant de la zone distale est principalement composé du quartz qui est bien cristallisé. Il

comporte également une abondance des minéraux accompagnateurs de minéralisation en or et même des traces d'or. Parmi ces minéraux, on peut citer les sulfures, la pyrite, l'arsenopyrite. Cet échantillon contient également des minéraux primaires tels que les micas (biotite, et muscovites), l'albite, l'orthose, l'ilménite, la séricite et le zircon pour ne citer que ceci. Il faut noter que cet échantillon comme les autres a connus des transformations minérales qui ont fait apparaître des minéraux tels que : la kaolinite, le chloritoïde, l'hématite, la titanite, le pyrope, la magnétite, la sylvite, et la baryte. Les échantillons COLO2 et COLO3 intermédiaire ainsi que l'échantillon COLO4 de la zone proximale qui présentent en particulier des pics de quartz beaucoup plus forts que le granite non altéré connaissent le même cortège minéralogique que l'échantillon distale avec une croissance quantitative au fur et à mesure que l'échantillon est altéré (Fig. 6.31b). En résumé, les diffractogrammes des rayons X confirment globalement les résultats des observations de terrain et les études pétrographiques.



**Figure 6.31.** Diffractogrammes des rayons X sur poudre d'échantillons représentatifs de roches altérées (COLO1-COLO4) et de roches non altérées (MAD01), comparés aux spectres de référence de minéraux clés.

### VI.3.3 Minéralogie d'altération par spectroscopie à réflectance

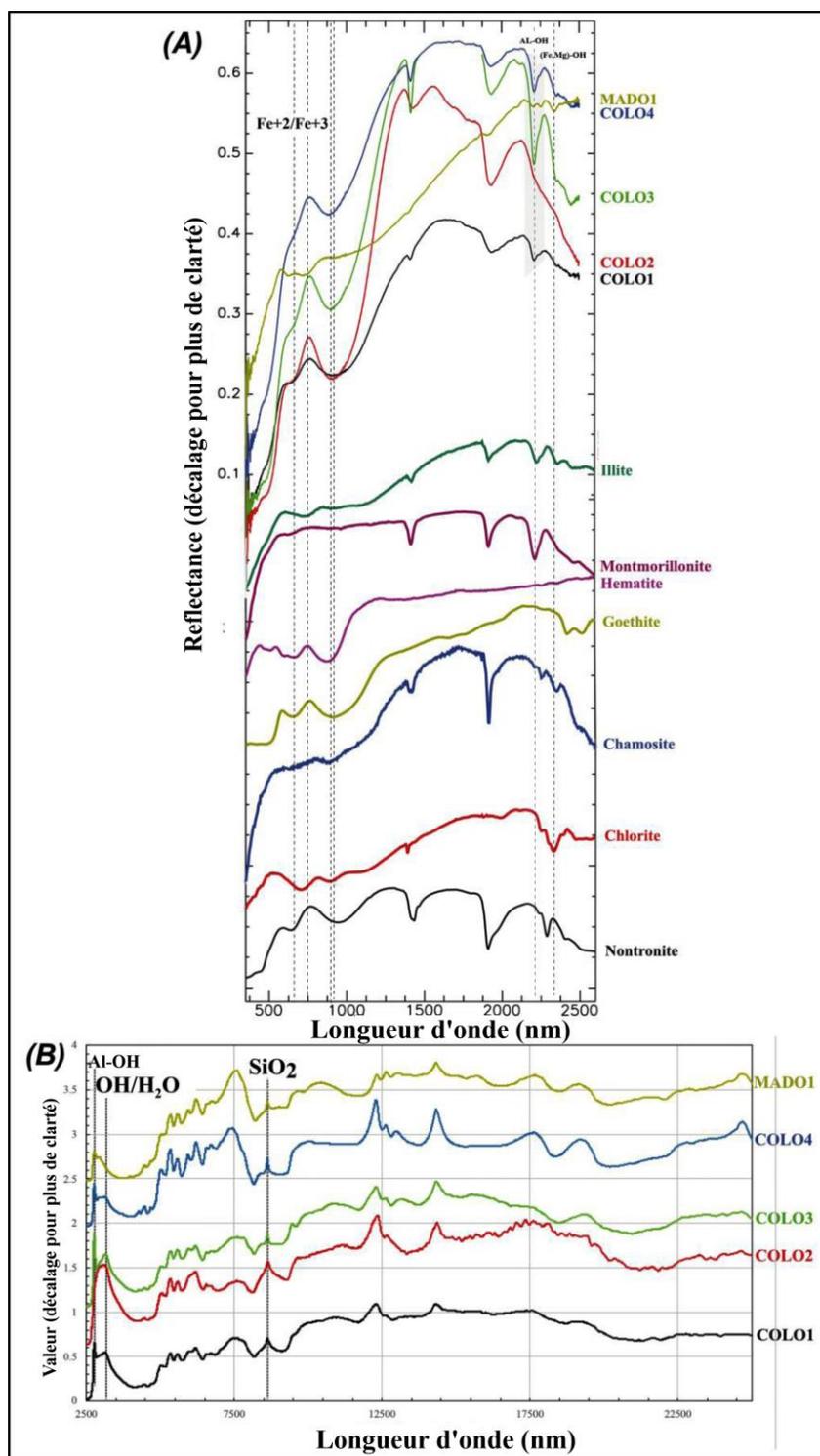
Les mêmes échantillons analysés par DRX ont été étudiés par spectroscopie de réflectance en laboratoire. Comme présenté ci-dessus dans la section de la cartographie de l'altération hydrothermale par télédétection, la gamme du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à ondes courtes (*VNIR* + *SWIR*) (350 à 2500 nm) est sensible aux minéraux d'altération ayant les caractéristiques d'absorption  $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ , OH/ $\text{H}_2\text{O}$ , Al-OH, (Fe, Mg)-OH et  $\text{CO}_3^{2-}$  (Fig. 6.32a). Les caractéristiques d'absorption proches de 500 nm et 1000 nm sont liées aux transitions électroniques du fer ( $\text{Fe}^{3+}/\text{Fe}^{2+}$ ) (Hunt, 1977; Hunt et Ashley, 1979) et ces caractéristiques sont spécifiquement détectées dans chacun des échantillons de roche altérés (COLO1-COLO4). Ceci confirme la présence d'hématite et de goethite en tant que phases d'altération majeures. L'échantillon de roche non altérée (MADO1) ne présente aucune caractéristique d'absorption à 1000 nm (absorption de  $\text{Fe}^{2+}$ ) et n'a qu'une caractéristique d'absorption faible aux environs de 500 nm.

Les bandes de vibration OH et  $\text{H}_2\text{O}$  aux alentours de 1400 nm et 1900 nm sont également facilement reconnaissables pour les échantillons altérés, mais beaucoup plus faibles dans l'échantillon de roche saine, indiquant que l'hydratation accompagne l'altération dans cette suite. Le mode de flexion Al-OH produit une caractéristique d'absorption majeure vers 2200 nm, associée à une caractéristique secondaire entre 2160 et 2180 nm, qui sont liées à la vibration d'étirement des groupes hydroxyles internes et externes (Bishop et al., 2008). Des caractéristiques d'absorption fortes proches de 2160, 2180 et 2200 nm sont enregistrées pour chacun des échantillons altérés (COLO1-COLO4) et sont nettement plus faibles dans l'échantillon frais. Une faible absorption supplémentaire à 2250 nm dans l'échantillon MADO1 indique probablement la présence de la biotite saine. De nombreux phyllosilicates di-octaédriques présentent ces caractéristiques spectrales, notamment la muscovite, la montmorillonite et l'illite.

La présente analyse ne permet pas de distinguer clairement la combinaison de ces éléments dans chacune des roches altérées. La caractéristique d'absorption proche de 2350 nm dans les échantillons est due à la combinaison du mode fondamental d'étirement OH et du mode de flexion Mg-OH. La chlorite, l'épidote, la biotite et l'illite présentent des caractéristiques d'absorption distinctes vers 2350 nm (Bishop et al., 2008).

La spectroscopie de réflectance dans la gamme de l'infrarouge thermique (*TIR*) (2500 à 25000 nm) est sensible aux variations d'émissivité dérivées des vibrations d'étirement  $\text{SiO}_2$  (Ninomiya et al., 2005). La figure 6.32b montre la spectroscopie de l'infrarouge thermique (*TIR*) pour les échantillons altérés (COLO1-COLO4) et non altérés (MADO1). Le pic moyen

de SiO<sub>2</sub> vers 7500 nm indique une émissivité nettement plus élevée dans l'échantillon silicifié COLO4 que dans les autres échantillons altérés, confirmant une teneur plus élevée en SiO<sub>2</sub> dans la zone d'altération la plus interne.



**Figure 6.32.** Spectres de réflectance de laboratoire de roches altérées (COLO1-COLO4) et saines (MAD01). A) Spectres de réflectance du visible et proche infrarouge et de l'infrarouge à onde courte (350 à 2500 nm); B) Spectres dans la gamme de l'infrarouge thermique (2500 à 25000 nm). Les spectres des principales caractéristiques d'absorption attribuées à Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>, OH/H<sub>2</sub>O, Al-OH, (Fe, Mg)-O-H et SiO<sub>2</sub> sont représentés par des lignes en pointillées.

## CONCLUSION

Ce chapitre qui intègre d'une part la géostatistique minière et d'autre part la cartographie de l'altération hydrothermale associée à la minéralisation aurifère en surface nous a permis de délimiter de bon prospects (zones privilégiées pour l'exploration aurifère) dans le secteur d'étude. Ainsi, plusieurs zones à potentialités aurifères y compris les zones d'altération hydrothermale de minéraux oxyde/hydroxyde de fer, minéraux argileux et de silicification ont été identifiées dans le secteur de Ngoura-Colomines. Ces zones ont une relation spatiale étroite avec les zones minières connues et les zones d'indices aurifères. Il s'agit du prospect de Ngoura-Colomines et des prospects de Yangamo-Ndatanga et Taparé-Tapondo nouvellement découverts, qui sont des cibles d'exploration totalement nouvelles. La minéralisation aurifère des placers dans le secteur Ngoura-Colomines aurait une double origine, la première syn-génétique intimement liée à la séricitisation des plagioclases des massifs granitiques et la seconde contrôlée par des veines à quartz dominant, sulfures et calcites. La zone de cisaillement ductile-fragile orientées NNE-SSW à E-W qui traverse la zone d'étude contrôle ladite minéralisation le long des méso-fractures et veines de quartz.

**CHAPITRE VII.  
INTERPRETATION-DISCUSSION ET  
CORRELATIONS REGIONALES**

*«Le courage n'est pas l'absence de peur, mais la capacité de vaincre ce qui fait peur. »*

- Nelson Mandela

## INTRODUCTION

Dans ce chapitre, les principaux résultats obtenus tout au long de notre étude sont interprétés et ensuite discutés. Il intègre la pétrogenèse, la structurogenèse ainsi que les aspects métallogéniques ; tout ceci dans l'optique de déterminer aussi bien la source et les conditions de genèse des roches, que leur évolution tectonique et le cadre géodynamique et de relever le lien entre cette évolution et les minéralisations en or associées. Une corrélation régionale est aussi proposée et nous permet de préciser la disposition structurale du secteur de Ngoura-Colomines par rapport aux autres régions du domaine centre de la CPNE.

### VII.1- PÉTROGENÈSE

#### VII.1.1- Pétrographie et caractères géochimiques

Les travaux de terrain et les études pétrographiques révèlent la présence de trois (03) ensembles pétrographiques distincts dans le secteur de Ngoura-Colomines. Il s'agit d'un ensemble magmatique dominant (~60% en volume) composé de granites, granodiorites, adamellites, tonalites et orthogneiss, un ensemble métamorphique moins représenté (~35%) faite des amphibolites et des gneiss et un ensemble filonien (~05%) représenté par les filons aplitiques et pegmatitiques. Ces trois ensembles pétrographiques sont affectés par endroit par des bandes de cisaillement produisant des mylonites.

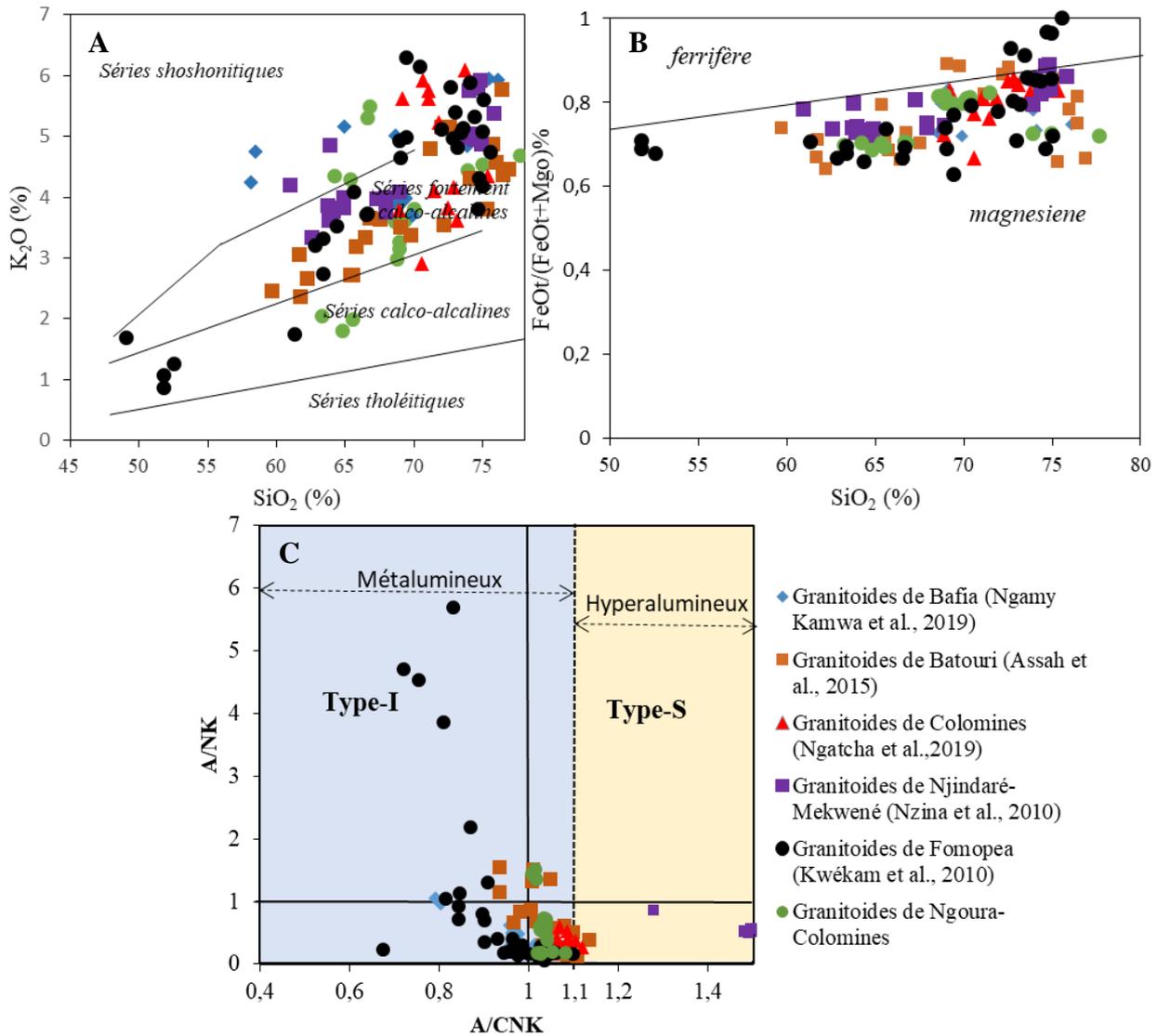
##### *VII.1.1.1- Ensemble magmatique*

Les caractères géochimiques des roches granitiques permettent de mieux contraindre la nature des sources à partir desquelles les magmas ont été produits (Clemens et al., 2011; Chappell et al., 2012; Clemens et Steven, 2012). Les granitoïdes étudiés ici sont péralumineux et définissent une gamme étroite de roches felsiques évoluées (66,67–77,68% en SiO<sub>2</sub>); d'affinité calco-alcaline pour les tonalites, calco-alcaline hyperpotassique pour les granodiorites et calco-alcaline hyperpotassique à shoshonitique pour les adamellites et les granites. Dans l'ensemble, les rapports A/CNK sont inférieur à 1,1 ; ce qui suggère qu'elles correspondent aux granites de type-I (Chappell et White, 1974). Cette signature géochimique des roches magmatiques de Ngoura-Colomines est confirmée par les études pétrographiques. En effet, ces roches se caractérisent par une prédominance de la biotite (silicate mafique) et la phase accessoire est dominée par le sphène, apatite, magnétite et zircon. Les digrammes de Harker (majeurs et traces) montrent des corrélations sensiblement linéaires dans l'ensemble, ce qui indique une différenciation par cristallisation fractionnée (Provost et Allègre, 1979).

Cependant, les fortes teneurs en potassium et en sodium dans les granites permettent d'envisager une contamination du magma mantellique originel par du matériel crustal lors de son ascension. En effet il est communément admis que les granites peralumineux proviennent du fractionnement des magmas pauvres en alumine, ou de la fusion partielle des matériaux crustaux (Blevin, 2014; Chappell et al., 2012; Farahat et al., 2011; Watkins et al., 2007 ; Patiño Douce, 2005). La richesse des roches étudiées en éléments traces incompatibles, notamment en éléments lithophiles (Rb, K, Cs et Ba) et en éléments à fort potentiel ionique tels que Ta, Nb, Zr ; suggère la contribution de la croûte dans leur genèse (Pearce et al., 1984). Les spectres des terres rares sont par contre globalement homogènes et parallèles, ce qui fait penser à une origine co-magmatique de ces roches (Zoheir et al., 2008). L'enrichissement relatif des terres rares légères par rapport aux terres rares lourdes signifierait que ces granitoïdes proviennent de la fusion partielle d'un protolite igné, avec une phase résiduelle riche en terres rares lourdes (Chappell, 1999; Clemens et Stevens, 2012). L'épuisement en Ba et Sr, ainsi que des anomalies négatives en Eu observées dans ces roches peuvent être attribués au fractionnement de la biotite, du plagioclase et du feldspath potassique (Rollinson, 1993).

De nombreux granites de type-I, en particulier les plus felsiques, sont peralumineux, bien que leurs roches sources ne soient généralement pas saturées en Al (Chappell et al., 2012). C'est le cas de la plupart des granitoïdes calco-alcalins à shoshonitiques documentés dans le domaine centre de la CPNE ( Chebeu et al., 2011, Asaah et al., 2015; Ateh et al., 2017, Ngatcha et al., 2019) et dans le domaine NW Cameroun (Nomo Negue et al., 2017 ; Bouyo Houketchang et al., 2016; Tchameni et al., 2006).

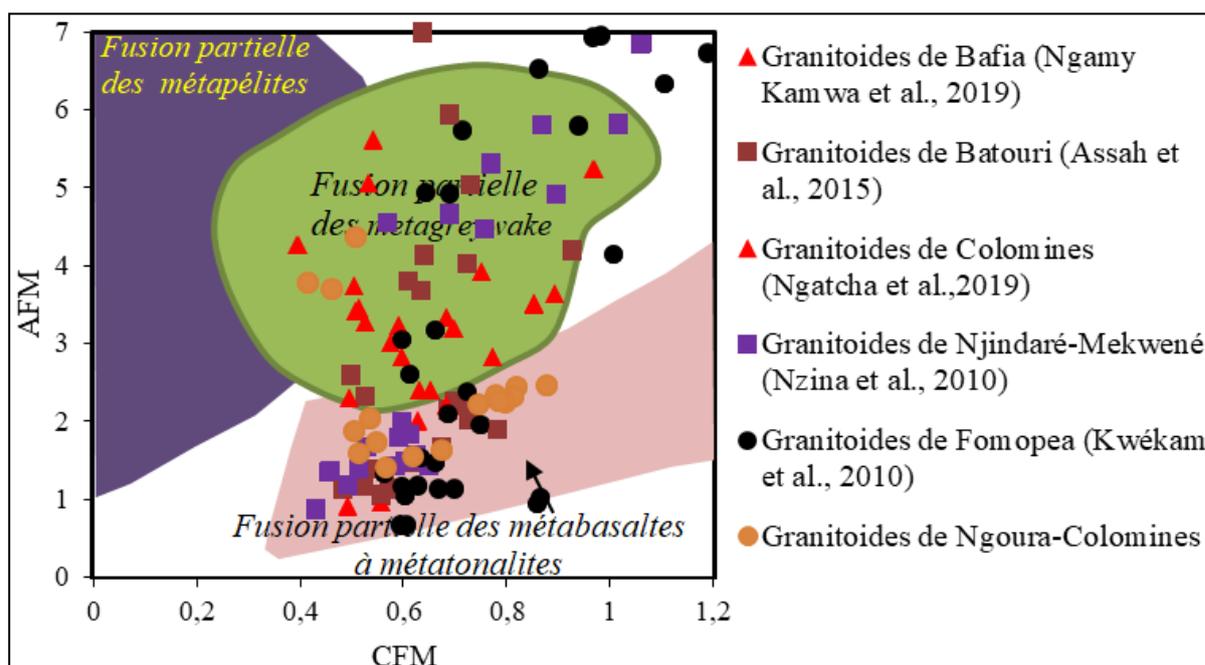
Les caractères géochimiques des éléments majeurs et traces associés aux différents diagrammes pétrologique montrent que les granitoïdes de Ngoura-Colomines, tout comme ceux des autres secteurs du domaine centre de la chaîne (Kwekam et al., 2010 ; Nzina et al., 2010 ; Asaah et al., 2015 ; Ngamy et al., 2019 et Ngatcha et al., 2019), sont identiques à celles des séries calco-alcalines potassiques, peralumineux à métalumineux des domaines orogéniques (Fig. 7.1). Les diagrammes de la figure 7.1 révèlent cette similitude. Cependant on note une petite différence principalement au niveau de la figure 7.1B où l'on constate que les granitoïdes étudiés au cours de la présente thèse et ceux de Ngatcha et al., 2019 (Colomines) sont uniquement magnésiens à l'instar de ceux de Kwekam et al., 2010 alors que ceux de Nzina et al., 2010 ; Asaah et al., 2015 et Ngamy et al., 2019 sont magnésiens à légèrement ferrifères.



**Figure 7.1.** (A) Diagramme de variation de  $K_2O$  vs  $SiO_2$  (Peccerillo et Taylor, 1976); (B) Diagramme de classification des granites de Frost et al., 2001 montrant le caractère magnésien à ferrifère des granitoïdes du domaine centre de CPNE et ceux de Ngoura-Colomines; (C) Diagramme molaire A/NK en fonction de A/CNK (Shand, 1943) montrant le caractère métalumineux à hyperalumineux des granitoïdes du domaine centre de CPNE et ceux de Ngoura-Colomines.

L'assimilation de matériaux métasédimentaires ou fusion partielle des roches supracrustales sont généralement préconisées comme pouvant affecter la saturation en Al (Blevin, 2014; Spicer et al., 2004; Patiño Douce et Harris, 1998; Montel et Vielzeuf, 1997). Dans le diagramme molaire AFM ( $Al_2O_3/FeO_t+MgO$ ) en fonction de CFM ( $Al_2O_3/FeO_t+MgO$ ) de Altherr et al., 2000 (Fig. 7.2), les granitoïdes de Ngoura-Colomines proviennent globalement de la fusion partielle des metabasaltes à métatonalites. Cependant, certains échantillons de granite tombent dans le champ de la fusion partielle des métagrauwackes indiquant ainsi une composante volcano-sédimentaire dans la source (Fig. 7.2). Les récents travaux dans le

domaine centre de la CPNE en l'occurrence sur les granitoïdes de Batouri (Asaah et al., 2015), ceux de Colomines (Ngatcha et al., 2019), de Njindaré-Mekwené (Nzina et al., 2010); de Bafia (Ngamy et al., 2019) et de Fomopea (Kwekam et al., 2010) indiquent également des sources similaires (Fig. 7.2). A l'Est-Cameroun, l'apport sédimentaire proviendrait du bassin pull apart du Lom identifié au NE de Ngoura-Colomines (Kankeu et al., 2009; Suh et al., 2006). La similitude entre les caractéristiques géochimiques des granitoïdes de Ngoura-Colomines avec d'autres granitoïdes de l'Est du Cameroun (Asaah et al., 2015; Ateh et al., 2017; Ngatcha et al., 2019) permet de suggérer la présence d'un batholite s'étendant de Batouri à Ngoura-Colomines en passant par Bétaré-Oya.



**Figure 7.2.** Position des granitoïdes du domaine centre de CPNE et ceux de Ngoura-Colomines dans le diagramme AFM (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO<sub>t</sub>+MgO) en fonction de CFM (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/FeO<sub>t</sub>+MgO) de Altherr et al. (2000).

#### VII.1.1.2- Ensemble métamorphique

Les enclaves basiques ont généralement soit une origine magmatique primaire (mantellique), soit proviennent de la croûte continentale (Erdmann et al., 2009). Les plutons felsiques panafricains sont caractérisés par leur richesse en enclaves basiques et principalement en amphibolites qui affleurent sous forme arrondie et/ou étirés (Ganwa et al., 2008; Tchaptchet Tchato et al., 2009; Kwékam et al., 2010; Njanko et al., 2012; Owona et al., 2013; Ayé et al., 2017; Fozing et al., 2019). Les caractères géochimiques des enclaves d'amphibolites de Ngoura-Colomines dans le domaine centre de la CPNE montrent une origine ignée, les différents protolites probables étant principalement les basaltes. Les rapports Cr/Th de ces amphibolites sont nuls avec les rapports Th/La faibles, ce qui renvoient aux

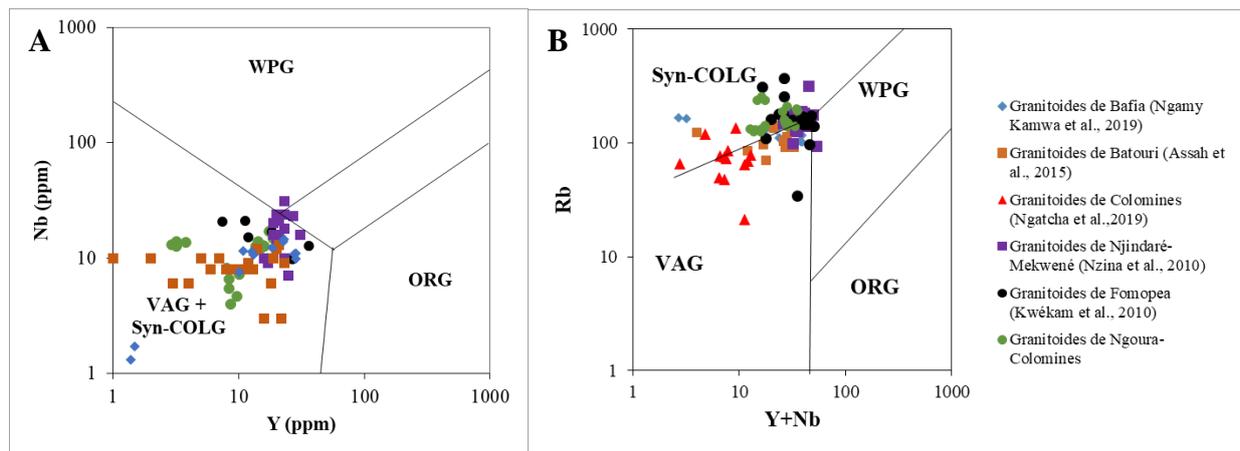
suites magmatiques typiques (Taylor and McLennan, 1985 ; Rollinson, 1996). De plus, ces amphibolites sont tholéitiques et ont la signature géochimique des roches ortho-dérivées typiques des domaines intra-plaques. Cette origine a été constamment évoquée par de nombreux travaux sur les enclaves d'amphibolites Néoprotérozoïque dans le CPNE au Cameroun (Ganwa et al., 2008; Owona et al., 2013; Ayé et al., 2017; Fozing et al., 2019). A Ngoura-Colomines, les enclaves d'amphibolite ne sont pas digérées mais plutôt partiellement bordée de feuillets de biotite. La texture et les similitudes géochimiques entre enclaves d'amphibolite et les granites à biotite hôte, nous laisse croire que ces enclaves représenteraient une phase de cristallisation précoce à partir desquels la croûte aurait fondue pour former les granites à biotite à la fin (Zhang et Zhao, 2017; Ngatcha et al., 2019). Le manque de preuves d'assimilation tels que les xénolites partiellement digérés (Erdmann et al., 2009) dans les granites hôte est également en faveur d'une origine magmatique primaire pour ces enclaves d'amphibolite.

## VII.1. 2- Contexte géotectonique

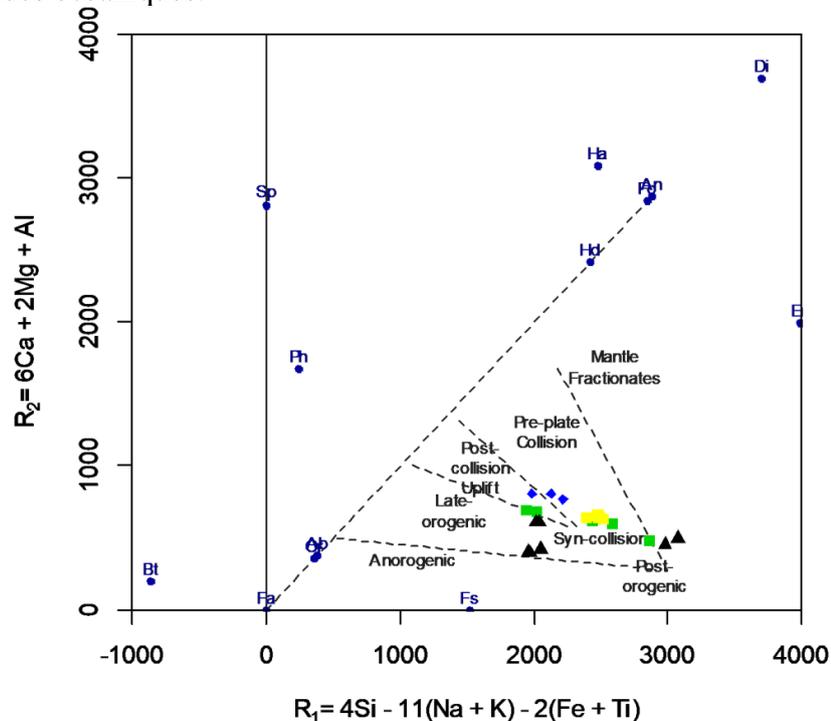
Selon Pearce et al. (1984) et Frost et al. (2001), les granitoïdes sont de bon témoins de l'évolution tectonique du globe. En effet, l'enrichissement en Ba, Th et U, et l'appauvrissement en Nb, Sr, P et Ti caractérisent les magmas générés en contexte d'arc (Taylor et McLennan, 1995).

Les caractères géochimiques des granitoïdes de Ngoura-Colomines tout comme ceux des autres secteurs du domaine centre de la chaîne (Kwekam et al., 2010 ; Nzina et al., 2010 ; Asaah et al., 2015 ; Ngamy et al., 2019 et Ngatcha et al., 2019) ont révélé la nature calco-alcaline à shoshonitique, suggérant leur mise en place en contexte de subduction à collision. En effet l'affinité calco-alcaline hyper-potassique à shoshonitique est caractéristique des granitoïdes orogéniques syn à post-collisionnel en contexte de collision continentale (Black et Liégeois, 1993 ; Liégeois et al., 1994). Dans le diagramme Nb en fonction de Y de discrimination des contexte tectonique (Pearce et al., 1984), les points représentatifs des granitoïdes étudiés tombent principalement dans le domaine de VAG + syn-COLG (Fig. 7.3), traduisant leur mise en place en contexte d'arc volcanique impliquant la subduction/collision. Dans le diagramme de Bachelor et Bowden (1985) utilisant les paramètres  $R_1$  et  $R_2$  (De la Roche et al., 1980), les granitoïdes de Ngoura-Colomines sont orogéniques, avec les granites, granodiorites et adamellite dans le domaine syn-collision, les adamellites dans les domaines pré à post-collision (Fig. 7.4). Des résultats similaires ont été rapportés sur d'autres massifs

panafricains du domaine centre de la chaîne (Ngatcha et al., 2019 ; Ateh et al., 2017; Asaah et al., 2015; Nzenti et al., 2006 ; Tchameni et al., 2006; Tagne Kamga, 2003) qui seraient associés à un contexte tectonique de collision continent-continent impliquant le craton du Congo et la marge active constituée des domaines centre et nord de la CPNE (Toteu et al., 2004 ; Nzenti et al., 2006). Selon ces auteurs, la collision continent-continent est à l'origine de l'épaississement crustal qui induit l'élévation de la température dans les profondeurs de la croûte, provoquant ainsi la fusion des roches et leurs mises en place sous forme de massifs datés entre 570 à 640Ma au Cameroun.



**Figure 7.3.** Diagramme géotectonique discriminant pour les granitoïdes du domaine centre de CPNE et ceux de Ngoura-Colomines d'après Pearce *et al.*, (1984). WPG = granites intra-plaques ; VAG = granites d'arc volcanique ; syn-COLG = granites syn-collisionnels ; ORG = granites de rides océaniques.



**Figure 7.4.** Diagramme géotectonique  $R_2$  en fonction de  $R_1$  de Bachelor et Bowden (1985) montrant la position des granitoïdes de Ngoura-Colomines dans les domaines syn-collision et pré à post-collision.

## VII. 2- STRUCTUROGENÈSE

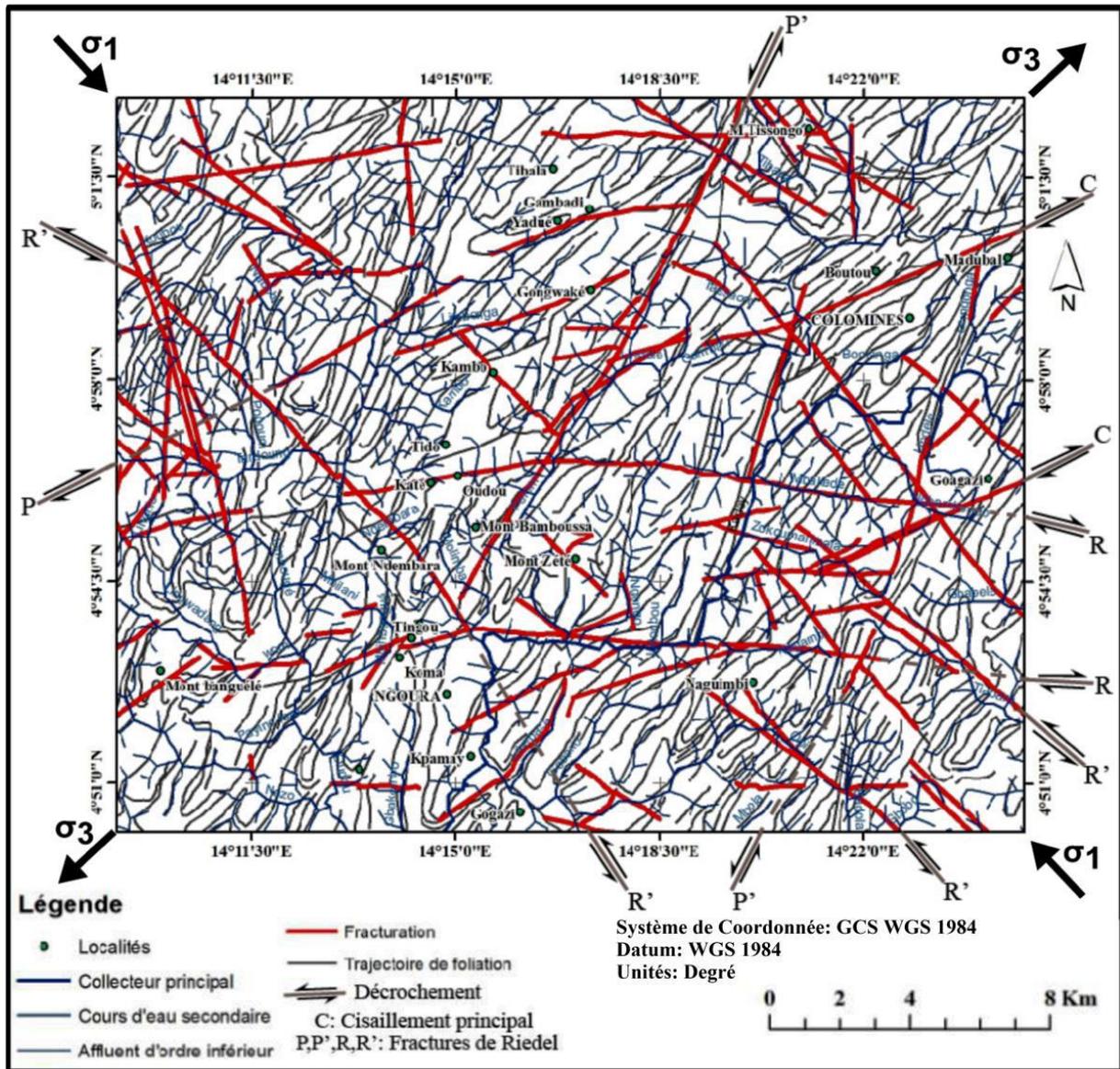
L'étude structurale abordée dans la présente thèse intègre deux aspects principaux que sont la géomorphologie structurale ou morpho-structure et l'analyse structurale proprement dite.

### VII. 2.1- Géomorphologie structurale

L'analyse morpho-structurale au moyen des techniques de la télédétection a permis de mettre en évidence les réseaux de fractures d'échelle kilométrique. L'esquisse morpho-structurale de la [figure 7.5](#) montre d'une part, la configuration du réseau des décrochements principaux avec les failles satellites associées, et d'autre part, l'allure des trajectoires de foliation de direction prédominante NE-SW (direction panafricaine). En effet, plusieurs travaux ([Suh et al., 2006](#); [Kankeu et al., 2009](#); [Asaah et al., 2015](#); [Ateh et al., 2017](#); [Ngatcha et al., 2019](#)) effectués dans la région de l'Est-Cameroun font mention de cette direction structurale dominante de la foliation. Il en est de même des travaux effectués dans d'autres secteurs du domaine centre de la CPNE ([Ganno et al., 2010](#); [Chebeu et al., 2011](#), [Kouankap Nono et al., 2011](#)) qui associent la direction NE-SW à celle de la foliation régionale.

À l'échelle cartographique, les trajectoires de foliation dessinent des méga-plis. Le fait que la fracturation décale les trajectoires de foliation met en évidence son caractère tardif. L'on observe de ce fait des zones de décrochements transverses entre ces entités, caractéristiques d'une zone de cisaillement ([Fig. 7.5](#)). L'analyse de la carte structurale révèle également l'existence d'une famille de failles orientée NE-SW. En outre, cinq (05) grandes familles de fractures ont été distinguées: la première correspondant à un réseau de plans de cisaillement dextre de direction ENE-WSW. Les failles satellites de ce réseau principal considérées dans le système de Riedel sont représentées par quatre familles: (i) la famille de NNE-SSW qui correspondrait aux fractures P'; (ii) la famille NW-SE, équivalente à des R'; (iii) la famille E-W ou fractures R et (iv) la famille NE-SW (fracture P de Riedel).

Le report de tous les éléments structuraux sur la carte donne l'esquisse structurale ([Fig. 7.5](#)) où les trajectoires de foliation dessinent des méga-plis résultant d'un raccourcissement NW-SE à WNW-ESE avec des décrochements principaux associés ([Takodjou et al., 2016](#)). Les différentes anomalies linéamentaires ont ensuite été confrontées aux données de terrain et validées sur la carte litho-structurale ([Fig. 7.6](#)).



**Figure 7.5.** Esquisse morpho-structurale de Ngoura-Colomines faisant ressortir le réseau hydrographique, le cisaillement principal (C) et les failles de Riedel associées (P, P', R et R').

## VII. 2.2- Analyse structurale

### VII.2.2.1 Evolution tectonique

L'évolution tectonique de la région de Ngoura-Colomines se caractérise par une déformation monocyclique et polyphasée résumée en quatre épisodes majeurs de déformation :

(1) l'événement tectonique  $D_1$  est essentiellement ductile et affecte uniquement les roches de l'ensemble métamorphique. C'est une phase relique car ses structures sont fortement transposées par les phases de déformations ultérieures notamment  $D_2$  et  $D_3$ . Cette phase se caractérise par: (i) des structures planaires tels que la foliation  $S_1$  (alternance

compositionnelles) de direction moyenne variant de NE-SW à pratiquement E-W. Cette famille de direction a d'ailleurs été principalement observée pour la  $S_1$  dans la série du Lom (Kankeu et al., 2009, 2010, 2012 et Soba, 1989), la zone de Kimbi (Ganno, 2010) et dans la zone de cisaillement de Tcholliré-Banyo (Nomo Nogue, 2016). (ii) des structures linéaires notamment la linéation minérale  $Lm_1$  et la linéation d'étirement minéral  $Le_1$  et (iii) des structures de volume (plis  $P_1$  et boudins  $B_1$  intra-foliaux). La phase de déformation  $D_1$  s'est déroulée en style compressif en régime coaxial car l'élément structural majeur est la foliation. Elle présente ainsi les caractères d'une déformation par constriction à raccourcissement maximal NNW-SSE. Cette phase de déformation  $D_1$  a été interprétée dans d'autres secteurs de la CPNE en l'occurrence le nord Cameroun et à l'Est du Nigéria comme représentant la phase précoce de la nappe tectonique panafricaine (Ferré et al., 2002 ; Toteu et al., 2004 ; Ngako et Njonfang, 2011);

(2) la deuxième phase ( $D_2$ ), est ductilo-fragile et affecte aussi bien l'ensemble magmatique que l'ensemble métamorphique. Cette phase est essentiellement marquée par (i) des structures planaires (schistosité  $S_2$ , cisaillement  $C_2$ ) et les failles satellites associées à l'échelle cartographique; (ii) des structures linéaires notamment la linéation d'étirement minéral  $Le_2$ ; (iii) des structures de volume notamment boudins asymétriques  $B_2$  tardi- $D_1$  à syn- $D_2$  et des plissements méso-à-mégascopiques  $P_2$ .

La phase  $D_2$  est de tectonique décrochante progressive à axes de raccourcissement variables à trois incréments successifs: ( $D_{2a}$ ) de raccourcissement NW-SE et d'allongement NE-SW responsable du boudinage en échelons tardi- $D_1$  à syn- $D_2$ , la schistosité mylonitique  $S_2$  et des décrochements connexes  $C_2$ ; ( $D_{2b}$ ) de raccourcissement N-S induisant un décrochement senestre NE-SW avec ses failles satellites associées à l'échelle cartographique; ( $D_{2c}$ ) de raccourcissement W-E induisant des plis  $P_{2c}$  et un décrochement principal NE-SW à ENE-WSW dextre et les failles décrochantes associées à l'échelle cartographique (Figs 7.5 et 7.6).

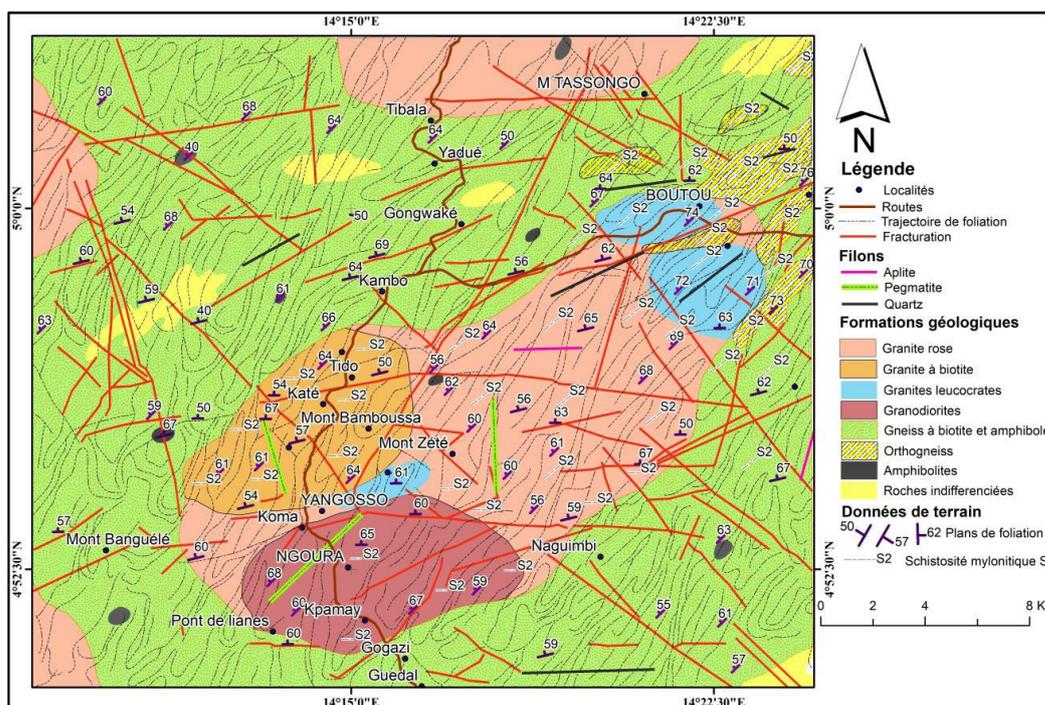
Des structures avec les caractéristiques similaires ont été évoquées dans plusieurs régions de la chaîne panafricaine au Nord Cameroun (Dumont et al., 1985; Penaye, 1988; Ngako, 1986; Toteu et al., 2004; Njanko et al., 2006; Nzenti et al., 2006; Njonfang et al., 2008; Ngako et Njonfang, 2011). Les éléments structuraux identifiés indiquant que cette déformation se développe en régime décrochant.

(3) la phase tectonique  $D_3$  est typiquement une phase de superposition tectonique de direction NNE-SSW. En effet, les structures associées à cette phase résultent d'une transposition ou d'une réorientation des structures  $D_2$  dans la mesure où certaines demeurent parallèles et d'autres sub-parallèles à obliques. Ces éléments structuraux sont des plis  $P_3$  qui

résultent du replissement des plis  $P_2$  et des cisaillements  $C_3$  d'attitude moyenne  $N045^\circ E 30SE$ . Le mouvement cisailant est horaire (dextre) tout comme celui  $D_2$ . Par conséquent, l'évènement  $D_3$  est une phase de tectonique transpressive dextre ;

(4) la phase  $D_4$  est essentiellement cassante et responsable de la mise en place des joints  $F_4$  de toutes sortes et de direction variables ( $N030^\circ E$ ,  $N040^\circ E$  à  $N080^\circ E$ ,  $N115^\circ E$  à  $N140^\circ E$  et  $N165^\circ E$  à  $N180^\circ E$ ). Les caractéristiques de cette phase notamment les familles de direction évoquées sont bien similaires à ceux décrits à Tcholé par [Nomo Negue \(2016\)](#) mais son par contre différentes de celles de la phase  $D_4$  décrite dans le domaine Central ([Ganwa, 2005](#); [Njonfang, 1998](#); [Njonfang et al., 2006](#)) et nord cameroun ([Ngako, 1986](#)). A l'échelle régionale, les directions  $N030-040^\circ E$  et  $N070-080^\circ E$  sont celles des directions majeures du cisaillement centre camerounais (CCC). Quant à la direction  $N140^\circ E$ , elle représente celle du fossé de la Bénoué. Cette phase ultime contrôle entre autre la minéralisation aurifère primaire encaissée dans les veines de quartz  $V_4$  d'épaisseur variables. Ces veines sont tantôt en place dans la roche saine (granitoïde), tantôt démantelées mais encore bien visibles dans les profils d'altération.

L'analyse microstructurale révèle la déformation de certains minéraux notamment les porphyroblastes de feldspaths microfracturés; les cristaux de plagioclase montrant des macles mécaniques et à fractures perpendiculaires au plan de macle et les rubans de quartz étirés et tordus. Ces résultats mettent en évidence l'évolution de la déformation depuis la phase magmatique jusqu'à la phase post-magmatique en contexte de cisaillement.



**Figure 7.6.** Carte litho-tectoniques de la région de Ngoura-Colomines.

### VII.2.2.2 Cinématique de la zone de cisaillement de Ngoura-Colomines

La zone de cisaillement de Ngoura-Colomines mise en évidence et caractérisée au cours de la présente thèse a été évoquée dans les travaux pionniers de [Gazel et Gérard \(1954\)](#). Tout comme la faille de Betaré-Oya dans la série du Lom, ces premiers auteurs ont désigné ces structures sous l'appellation de « ligne tectonique ». Cependant, bien que tous les travaux géologiques à la suite de ceux de [Gazel et Gérard \(1954\)](#) aient reconnus l'existence de cette présumé « ligne tectonique » dans le district aurifère de Batouri, aucune attention particulière n'a été accordée à cette grande zone de cisaillement. Ce n'est qu'environ 50 ans plus tard, que la faille de Betaré-Oya va bénéficier des travaux détaillés ([Kankeu et al., 2009 ; 2010](#)), ce qui ne sera pas le cas de la zone de cisaillement de Ngoura-Colomines. A la faveur des travaux menés tout au long de la présente thèse, il apparait clairement que cette zone de cisaillement est une méga-structure qui traverse pratiquement tout le district aurifère de Batouri dans une direction NE-SW à pratiquement ENE-WSW. A Ngoura-Colomines, cette structure recoupe toutes les formations géologiques. Elle est d'ailleurs caractérisée à l'échelle mégascopique (régionale) par une famille de failles orientée NE-SW associée à de plans de cisaillement dextres de direction ENE-WSW ([Takodjou et al., 2016](#)). A l'échelle mésoscopique, les indicateurs cinématiques identifiés dans les différents affleurements sont: les bandes de cisaillements  $C_2$  en *strain-Slip* toujours associées à la transposition de la foliation  $S_1$ ; les boudins  $B_1$  tardi- $D_1$  à syn- $D_2$  asymétriques et antithétique de type *A-Slip*. Ces boudins correspondraient de par leur forme aux boudins pré à syn-cisaillement ([Ramsay, 1987 ; Goldstein, 1988 ; Goscombe et al., 2004](#)). De plus, la schistosité mylonitique  $S_2$  présente dans cette zone est une caractéristique particulière des zones de cisaillements ductiles identifiées dans la CPNE ([Kankeu et al., 2009; Ganno, 2010; Nomo Negue, 2016](#)). A l'échelle du microscope ([Figs 4.27 et 4.28](#) du chapitre de l'analyse structurale), les marqueurs du cisaillement sont: (i) les macles mécaniques (en fuseau ou en biseau) de certains cristaux de plagioclase; (ii) les sigmoïdes asymétriques de feldspath alcalin, plagioclase et pyrite micro-fracturés dans les mylonites; (iii) les agrégats polycristallins (avec des sous grains) composés essentiellement de quartz et de feldspath alcalin; (iv) la présence des cristaux de biotite de forme lenticulaire («*mica fish*») qui colmatent les zones d'ombre des porphyroblastes de feldspath alcalin et soulignent de ce fait la schistosité mylonitique  $S_2$ , caractéristique particulière de la déformation à l'état solide dans les zones de cisaillement. Tous ces marqueurs sont compatibles avec un mouvement cisailant globalement dextre. La zone de cisaillement de Ngoura-Colomines serait donc ductilo-fragile dextre et d'envergure régionale

globalement orientée NE-SW, direction qui rappelle celle de la faille de Betaré-Oya (Kankeu et al., 2009).

### VII.2.2.3 *Modèle tectonique*

L'évolution tectonique couplée à la cinématique de la zone de cisaillement de Ngoura-Colomines nous permet de proposer un modèle tectonique régional. Ce modèle intègre les aspects suivants: (1) l'existence aussi bien des plis que des cisaillements, ce qui marque un « partage » de la déformation entre des domaines contemporains les uns dominés par le cisaillement et les autres par l'aplatissement (Bell, 1981; Simpson et De Poar, 1993); (2) la variation plus ou moins progressive de la direction de la linéation entre les phases D<sub>1</sub> à D<sub>2</sub> ce qui est communément évoqué comme caractéristique particulière du modèle de partage de la déformation en régime transpressif oblique (Dewey et al., 1998 ; Holdsworth et al., 2002; Ganno, 2010); (3) les marqueurs cinématiques à l'échelle de l'affleurement tels que les bandes de cisaillement C<sub>2</sub>, les boudins tardi-D<sub>1</sub> à syn-D<sub>2</sub> asymétriques de type *A-Slip*, les structures S-C et à l'échelle microscopique notamment les porphyroblastes de feldspath et de biotite («*mica fish*») sont compatibles avec un mouvement dominant dextre (Ganno et al., 2010 et Takodjou et al., 2016 ). Pour ce qui est de notre zone d'étude, nous proposons donc comme habituellement admis pour l'évolution géodynamique de la CPNE un modèle tectonique de collision oblique continent-continent impliquant le craton du Congo/Sao Francisco Craton et le Bloc Est Saharien. Ce modèle tectonique d'envergure régionale fut initialement proposé par Nzenti et al. (1994) pour la CPNE. De plus, les granitoïdes étudiés ici ont des caractères géochimiques des roches typiques des zones de collision continentale impliquant subduction/collision.

Tous ces éléments mettent en évidence la manifestation de la tectonique transpressive dextre dans le secteur de Ngoura-Colomines. Ce résultat est similaire à ceux obtenues dans le domaine centre de la CPNE au Cameroun d'une part par Ganno (2010) dans le secteur de Kimbi à l'extrême ouest et d'autre part par Kankeu (2008) et Kankeu et al. (2009) dans la région de Bétaré-Oya, située à quelque km au NNW de la zone d'étude. Sans oublier les travaux de Ferré et al. (1998, 2002) au NE du Nigeria qui aboutissent pratiquement aux mêmes conclusions. En outre, les travaux de Mapoka et al. (2010) dans la zone de Bossangoa en RCA mettent en évidence une zone de cisaillement majeure qui pourrait être le prolongement de la zone de cisaillement de Ngoura-Colomines en Centrafrique.

En résumé, le secteur de Ngoura-Colomines pris dans le domaine centre de la CPNE constitue une manifestation de chaîne en régime transpressif, dont l'évolution tectonique est

divisée en trois grandes périodes : (i) collision oblique avec coulissage entraînant un chevauchement sur le craton (ii) fusion et intrusion (iii) failles transcurrentes associées à des plissements lors de la compression tardive.

### **VII. 3- POTENTIALITÉS MÉTALLOGÉNIQUES**

L'approche métallogénique abordée dans la présente thèse intègre deux aspects principaux notamment (i) la géostatistique minière par krigeage à partir des données provenant de 72 puits d'exploration et (ii) une cartographie par télédétection des altérations hydrothermales associées à la minéralisation aurifère en surface. Les résultats de télédétection sont ensuite corrélés aux données de terrain dans le but de déterminer les éléments, aussi bien lithologique que structural, qui contrôlent ladite minéralisation; et enfin définir les secteurs les plus promoteurs pour l'exploration de la minéralisation primaire.

#### **VII.3.1- Morphologie des grains d'or et implications sur la source**

De nombreux travaux soutiennent que la morphologie des grains d'or des placers est étroitement liée à la distance de la source et au temps passé dans les systèmes fluviaux (Edou Minko et al., 1992 ; Youngson et Craw, 1999; Knight et al., 1999; Townley et al., 2003; Fuanya et al., 2014). L'irrégularité de la forme des particules indique des distances de transport variables depuis leur source. La forme angulaire à sub-angulaire est liée à une distance de transport faible ou courte (0-300 m) tandis que les grains arrondis et émoussés reflètent une distance de transport relativement longue (> 1000 m) (Townley et al., 2003). Edou Minko et al. (1992) ont suggéré que la taille fine des grains d'or dans les dépôts alluviaux est liée au fractionnement et à la dissolution partielle des particules d'or primaires pendant l'altération météorique.

A Ngoura-Colomines, les grains d'or sont de forme anguleuse et arrondie. Cependant, la proportion des grains arrondis est plus importante dans l'échantillon de Madubal (25%) que dans celui de Tassongo (10%). Les particules de forme anguleuse représentent 48% de l'ensemble de l'échantillon de la zone de Tassongo et 35% dans les puits de Madubal, tandis que les grains de forme sub-anguleuse sont présents en proportion presque égale dans les échantillons étudiés. Tous les puits montrent des grains d'or avec des vides qui peuvent être attribués au processus de dissolution. De l'étude morphoscopique, nous proposons que la minéralisation aurifère alluviale dans la zone d'étude a une source proximale à sub-proximale. En effet, la forme principalement anguleuse des grains d'or des puits de Tassongo refléterait leur source proximale (0 à 50 m), tandis qu'une source sub-proximale (50 à 300 m) à une

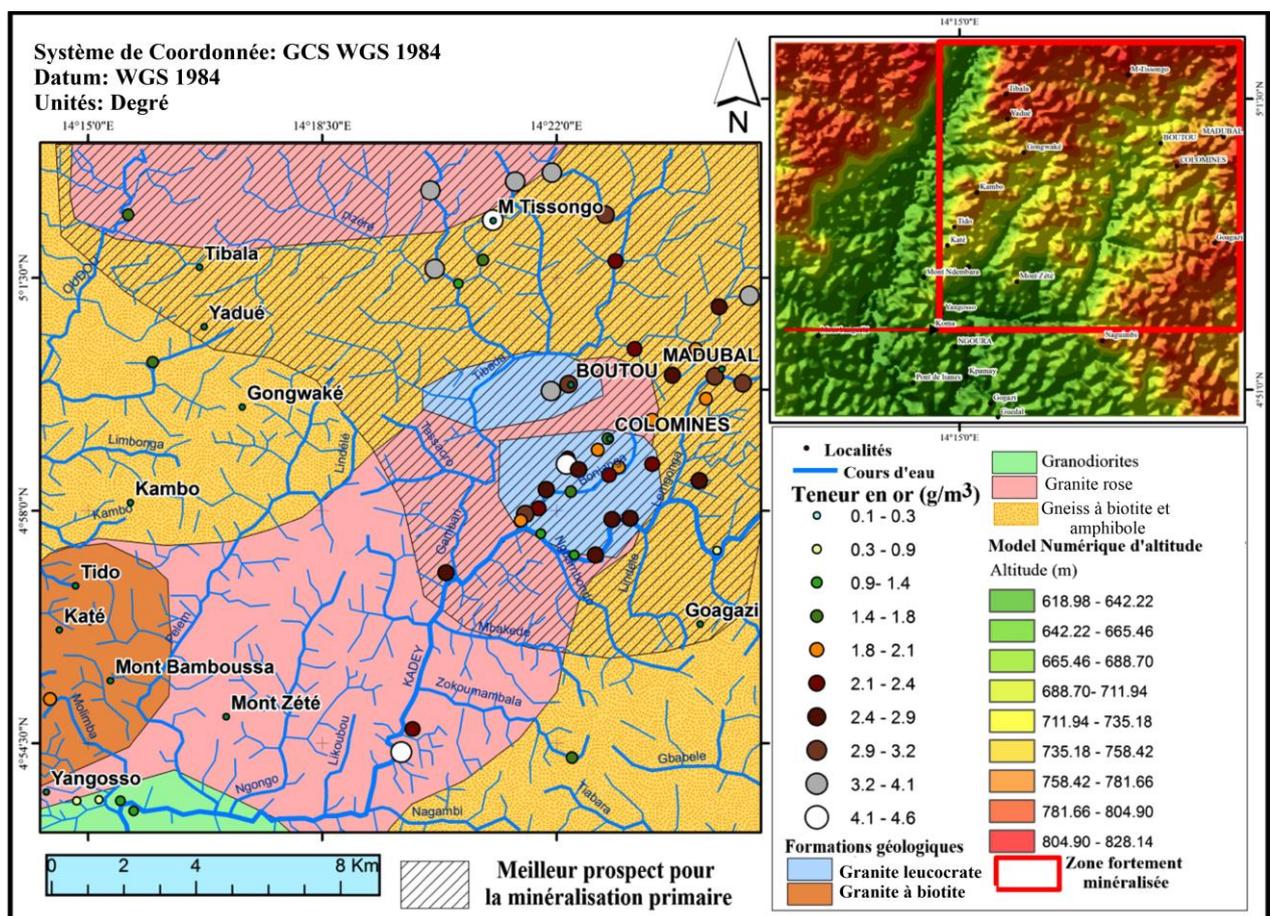
source relative distale (300 à 1 000 m ou plus) est suggérée pour les grains d'or des puits de Madubal (Takodjou al., 2018). Cette interprétation est confortée par la présence de minéralisation aurifère liée à des veines de quartz démantelées dans des sols latéritiques en amont des puits d'exploration. Les grains d'or récupérés de ces veines présentent des empreintes de la minéralisation primaire avec des inclusions de quartz et de pyrite.

### **VII.3.2- Facteurs contrôlant la distribution spatiale de la minéralisation aurifère alluvionnaire**

L'analyse géostatistique par krigeage à partir des données provenant de 72 puits d'exploration à travers une combinaison linéaire d'effet pépite et de fonction gaussienne a été ajustée à chaque variogramme empirique de teneur en or. Il apparaît clairement ici qu'en dehors des directions N-S et NW-SE où l'on ne note aucune dépendance directionnelle des variogrammes, une certaine dépendance existe entre le modèle et la courbe empirique dans les directions NE-SW et E-W. La présence d'une telle dépendance directionnelle des variogrammes peut être liée à la nature et à la disposition des teneurs en or croissantes suivant une direction préférentielle NE-SW. Cette interprétation a également été confirmée par l'augmentation progressive et ciblée des groupes de teneur en or essentiellement concentrés dans la direction NE-SW et exceptionnellement E-W assurant une bonne continuité spatiale dans ces différentes directions. Cette anisotropie apparente peut également être due en partie aux facteurs de contrôle tectonique. Nous avons mis en évidence un système de failles de Riedel à grande échelle composé de failles P et P' respectivement orientées NE-SW et NNE-SSW; et les failles R et R' avec les tendances E-W à NW-SE. Ces travaux indiquent que ces structures sont des voies à la fois de circulation des fluides minéralisateurs et d'écoulement des eaux souterraines dans la zone d'étude. Ainsi, la tectonique a probablement joué un rôle majeur sur la distribution de la minéralisation aurifère aussi bien primaire que secondaire (alluviale). Cette hypothèse est confortée par la carte de distribution de la teneur qui montre que les puits à concentration modérée à forte forment une distribution linéaire avec un alignement préférentiel suivant la direction NE-SW, de Ndatanga au SW à Colomines au NE en passant par Ngoura au centre de la zone d'étude.

Les cartes issues du krigeage ont ensuite été comparées aux cartes structurales à grande échelle pour analyser la relation entre les fractures et les principales teneurs en or observées dans la partie NE de la zone explorée. L'on se rend à l'évidence que les fortes teneurs en or se trouvent autour des zones intensément fracturées. Cette observation, associée à l'absence de corrélation entre les teneurs en or et les différentes épaisseurs de couche et au

fait que l'exploration s'est réalisée dans les rivières à guidage structurale démontré, met en évidence la proximité de minéralisation aurifère primaire dans ces zones. Ce résultat indique que la minéralisation aurifère alluviale dans la région de Colomines proviendrait des filons de pegmatite et des veines de quartz et contrôlé par le système de cisaillement ductilo-fragile de direction NE-SW. Cette interprétation a été confirmée par les travaux de terrain qui ont révélé la présence de nombreuses veines de quartz minéralisées orientées NE-SW autour de Madubal et Tassongo à l'endroit appelé «trou du rat» près de Colomines. Ainsi, une zone de 191 km<sup>2</sup> a été identifiée comme représentant le meilleur prospect pour l'exploration de l'or primaire dans la partie NE de la zone d'étude (Fig. 7.7).



**Figure 7.7.** Superposition du modèle numérique (MNA), du modèle de drainage, de la teneur en or et de la lithologie de la région de Colomines.

### VII.3.3- Altération hydrothermale associée à la minéralisation aurifère en surface

Très peu d'études ont tenté d'utiliser les images satellitaires multi-spectrales pour l'exploration aurifère dans les régions tropicales et subtropicales, en raison de la couverture nuageuse permanente et de la couverture végétale dense pouvant obstruer les réponses spectrales des minéraux d'altération (Carranza et Hale, 2002; Galvoa et al., 2005; Deller, 2006; Vicente et Filho, 2011; Pour et al., 2013, 2014; Pour et Hashim, 2015). En effet,

l'épaisse couverture pédologique omniprésente et les intempéries tropicales peuvent entraver l'observation des zones d'altération hydrothermale par télédétection (Butt et Zeegers, 1992; Osei et Singh, 1999). En outre, les chapeaux de fer (hématite et goethite), la kaolinite et le quartz résiduel ont pratiquement les mêmes caractéristiques et sont cependant des minéraux diagnostiques des zones cibles d'altération hydrothermale pour l'exploration minière. Ainsi, de vastes étendues de couverture de sol tropical ordinaire peuvent dissimuler des prospects intéressants (Galvao et al., 2005; Deller, 2006). Par conséquent, il est nécessaire de réaliser une étude appliquant une amélioration du signal et des méthodes statistiques suffisantes pour prendre en compte les divers facteurs qui influencent la cartographie à distance des minéraux d'altération hydrothermale dans les environnements tropicaux et subtropicaux.

Le district aurifère de l'Est-Cameroun située en zone intertropicale, offre un véritable challenge pour la cartographie des zones d'altération hydrothermale à l'aide des images satellitaires multi-spectrales telles que Landsat-8 et ASTER. En effet, les travaux de terrain et les études pétrographiques en laboratoire ont montré que les veines de quartz aurifères de Ngoura-Colomines, Yangamo et Tapondo sont associées à des zones d'altération hydrothermale riches en pyrite, séricite, oxydes de fer et silice. Zoheir et al. (2018) ont montré que la présence fréquente de quartz, de séricite, de chlorite et de rutile dans les massifs granitiques et les veines de quartz, associée à la dissémination de pyrite, de pyrrhotite et d'arsénopyrite, suggère une relation génétique entre l'altération hydrothermale et la minéralisation aurifère.

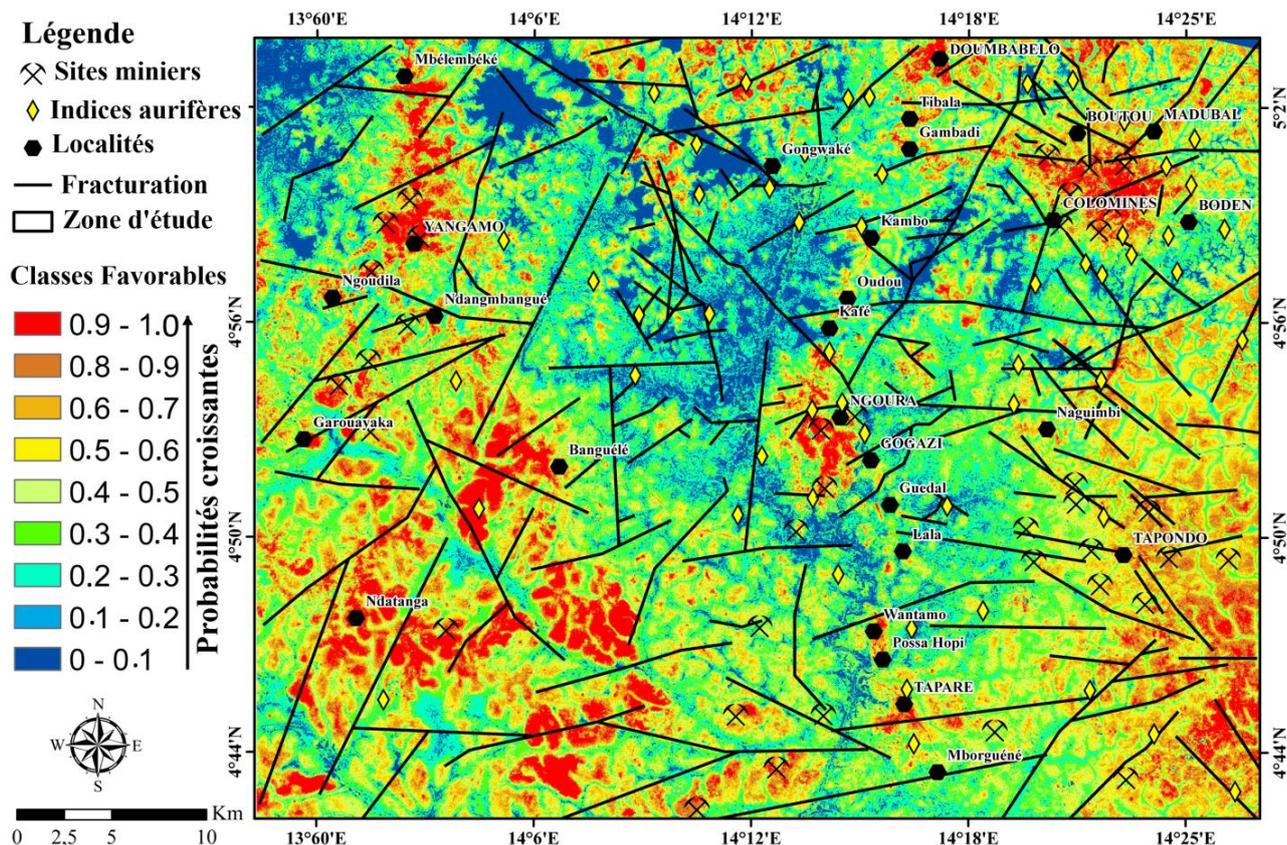
En comparant les résultats de télédétection avec la carte géologique, la distribution spatiale des sites miniers et des indices aurifères, il ressort des relations spatiales précises et étroites entre les zones d'altération et les sites aurifères connus. En effet, les cartes d'altération hydrothermale dérivées des données Landsat-8 et ASTER montrent une répartition des indices aurifères globalement le long des zones de failles et autour des systèmes de drainage. Les relations entre la minéralisation aurifère primaire et la zone de cisaillement NE-SW mise en évidence dans la zone d'étude et dans les localités voisines ont déjà été établies (Vishiti, 2009; Asaah et al., 2015; Takodjou et al., 2016, 2018 et 2020; Ngatcha et al., 2019). De plus, les travaux de Takodjou et al. (2016, 2018, et 2020) relatifs à la présente thèse ont révélé que le réseau hydrographique était à guidage structural et principalement contrôlé par le même système de failles ayant favorisé la circulation des fluides porteurs de minéralisation aurifère. Par conséquent, il serait logique de s'attendre à ce que l'érosion provoquée par l'écoulement de l'eau expose progressivement les zones minéralisées au fil du temps.

L'étude morphoscopique des grains d'or a en outre souligné que l'or alluvionnaire dans la zone d'étude avait des sources proximales (0-50 m) à sub-proximales (50-300 m). Ainsi, une cartographie efficace des zones supergènes d'altération hydrothermale pour localiser les zones de démantèlement des veines de quartz exposées à la surface constitue une bonne approche pour l'identification de nouvelles zones cibles pour l'exploration et l'extension des sites d'exploitation de l'or alluvial en aval.

La source joue un rôle essentiel dans les systèmes aurifères liés aux granitoïdes (Groves et al., 2003; Lang et al., 2000; Thompson et al., 1999). Les granitoïdes associés à la minéralisation aurifère sont hyperpotassiques et de type-I, et montrent de fortes tendances de fractionnement (Blevin, 2014; Bouabdellah et al., 2016; Hart, 2005; Yang et al., 2008). Ces granitoïdes minéralisés montrent généralement les signes d'altération hydrothermale omniprésents et contrôlés par les fractures y compris la présence de feldspaths et de séricites (Lang et Baker, 2001). L'altération séricitique étant dans la plupart des cas associée à l'or (Amponsah et al., 2015; Lang et Baker, 2001; Tata et al., 2018). Les prospects identifiés par les deux méthodes en l'occurrence la géostatistique minière par krigeage et la cartographie par télédétection de l'altération hydrothermale associée à la minéralisation aurifère en surface sont identiques. De plus, ces zones privilégiées pour la prospection aurifère sont localisées sur et aux alentours d'imposants massifs granitiques. Bien que la minéralisation aurifère primaire mise en évidence au cours de la présente étude soit principalement encaissées par des veines de quartz dans les granites, il est à noter que l'or est aussi présent au sein desdits granites où il serait génétiquement lié. En effet la présence des grains d'or associés aux tellures et aux sulfures notamment pyrite, arsénopyrite et pyrothite tels que révélées par les études pétrographiques, démontre le caractère syn-génétique de ladite minéralisation avec son encaissant. Un résultat similaire a été obtenu par Asaah et al. (2015); Takodjou et al. (2018) et (2020); Ngatcha et al. (2019). L'or dans le secteur de Ngoura-Colomines proviendrait donc de deux sources principales: la première syn-génétique intimement lié à la séricitisation des plagioclases et la seconde contrôlée par des veines de quartz. En outre, la présence des minéraux d'altération suggèrent l'influence des fluides hydrothermaux dans le processus de minéralisation.

Les travaux de Ngatcha et al. (2019) associent l'enrichissement en Na, K, Ca, Ga, Tl, Au et métaux de base (Cu, Ni et Cr) et l'appauvrissement en LREE (La, Ce, Pr) à l'action des fluides post-magmatiques liés aux processus d'altération hydrothermale des granitoïdes de Colomines. Selon ces auteurs, les fluides minéralisateurs seraient intimement liés aux fluides responsables de cette altération. Ainsi, les processus d'altération hydrothermale sont des

facteurs potentiels d'enrichissement des granitoïdes en or dans la zone de cisaillement de Ngoura-Colomines. Les zones de cisaillement et des failles à proximité des granitoïdes étant des sites favorables de minéralisation, les futures campagnes d'exploration de l'or associé aux granitoïdes des zones de cisaillement devraient privilégier les localités Colomines (partie NE), Yangamo-Ndatanga (parties NW et SW) et Taparé-Tapondo (partie SE) de la zone d'étude (Fig. 7.8).



**Figure 7.8.** Carte de prospectivité à l'échelle régionale de la zone d'étude dérivée de couches thématiques d'altération de Landsat-8

#### VII.4- CORRÉLATIONS RÉGIONALES

Le magmatisme calco-alcalin hyper-potassique à shoshonitique qui caractérise le secteur Ngoura-Colomines est répandu dans le domaine centre de la CPNE. En effet, les travaux sur quelques complexes magmatiques montrent que ce sont des complexes panafricains calco-alcalins hyper-potassiques typiques des domaines orogéniques de type collisionnel à post-collisionnel (Tagne Kamga et al., 2003 ; Nzolang et al., 2003; Tanko Njiosseu et al., 2005 ; Njanko et al., 2006 ; Nzenti et al., 2006, 2011; Tchameni et al., 2006 ; Djouka-Fonkwe et al., 2008; Kankeu et al., 2009; Nzina Nchare et al., 2010 ; Kouankap Nono et al., 2010 ; Chebeu et al., 2011 ; Ganwa et al., 2011; Nomo Negue et al., 2015, 2017 ;

Ngamy Kamwa et al., 2019). Ces complexes magmatiques, tout comme ceux de Ngoura-Colomines sont allongés suivant la direction du cisaillement régional (N045E à Ngoura-Colomines), mettant ainsi en évidence le caractère syn-tectonique et syn-collisionnel de ces roches. En effet, les bandes de cisaillement N045E soulignées par des mylonites mises en évidence dans la zone d'étude traduiraient les marques du fonctionnement de la faille régionale de la Sanaga dans cette région. Les caractères géochimiques des granitoïdes de Ngoura-Colomines s'apparentent à ceux des massifs de Nkambé datés à  $530 \pm 9$  Ma et de Kimbi au Nord-Ouest du Cameroun étudiés respectivement par Tetsopgang et al. (2008) et Ganno (2010), de Bafoussam à l'Ouest Cameroun (Djouka-Fonkwé et al., 2008 ; Kouankap Nono et al., 2010), de Kambélé à l'Est Cameroun (Asaah et al., 2015) datés à  $619 \pm 2$  et  $624 \pm 2$  Ma et de Tcholliré et de Mayo Galké au Nord Cameroun) étudié par Nomo Negue (2016) et datés à  $652,2 \pm 5,4$  Ma et  $632 \pm 13$  Ma et  $640,8 \pm 4,5$  Ma respectivement. Les granitoïdes de Ngoura-Colomines seraient donc panafricains et leur mise en place se serait faite à la faveur du fonctionnement de la faille de la Sanaga qui se prolonge par la faille de Bétaré-Oya à l'Est-Cameroun. Les roches métamorphiques (gneiss et amphibolites) sont similaires à celles étudiées par Ganno (2010) à Kimbi, mais présentent quelques différences par rapport à celles des autres régions de la chaîne. En effet, les amphibolites étudiées se distinguent des metabasites de Maham III et de Tonga (Tanko Njiosseu et al., 2005) par l'absence du grenat. Ils s'apparentent plutôt à ceux décrit dans le massif de Fomopea par Fozing et al. (2019). Le métamorphisme de faible degré (faciès amphibolite) qui a affecté ces roches étant commun au domaine centre de CPNE (Tanko Njiosseu et al., 2005 ; Nzenti et al., 2007; Tchaptchet Tchato et al., 2009, Fozing et al., 2019).

Sur le plan structural, le secteur de Ngoura-Colomines est caractérisé par une déformation polyphasée, à quatre phases de déformation dont les principales caractéristiques sont présentées au chapitre IV avec un résumé au paragraphe VII.1.2.2 de ce chapitre. Bien que nouveau à l'Est du Cameroun, la chronologie à quatre phases de déformation est bien documentée au sein de la chaîne, notamment dans les domaines nord (Nomo Negue, 2016), centre (Ganno et al., 2010, 2016 ; Kouankap Nono, 2011 ; Takodjou Wambo et al., 2016 et Saha Fouotsa et al., 2018) et méridional (Mvondo et al., 2007 ; Metang, 2015).

## **CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES**

*«N'imitiez rien ni personne. Un lion qui copie un lion devient un singe. »*

- Victor Hugo

L'objectif principal de la présente thèse était de contraindre la pétrogenèse et le contexte géodynamique des formations géologiques du secteur Ngoura-Colomines en vue de contribuer à une meilleure compréhension de l'évolution tectonique globale de la CPNE. Un second objectif était de circonscrire les sites potentiels pour l'exploration des minéralisations d'or primaires et d'évaluer le contrôle structural desdites minéralisations. Pour atteindre ces objectifs, une approche pluridisciplinaire intégrant les observations de terrain, la pétrologie, l'analyse structurale et la métallogénie a été adoptée. Au terme de notre étude, les conclusions suivantes peuvent être retenues :

**Sur le plan pétrographique et géochimique**, le secteur de Ngoura-Colomines se caractérise par une diversité pétrographique répartie en trois ensembles lithologiques dont un ensemble magmatique dominant composé de granites, granodiorites, adamellites et tonalites; un ensemble métamorphique fait d'amphibolites, de gneiss et de mylonites et un ensemble filonien formé d'aplites et de pegmatites. Ces trois ensembles pétrographiques sont affectés par endroit par des zones de cisaillement. Les roches magmatiques sont hyperalumineuses de type-I et définissent une gamme étroite de roches felsiques évoluées appartenant aux séries calco-alcalines hyperpotassiques (tonalites et granodiorites) à shoshonitiques (adamellites et granites). Leurs caractères pétrogénétiques sont compatibles à ceux des séries calco-alcalines hyperpotassiques des domaines orogéniques. Ces granitoïdes seraient issus de la fusion partielle des sources metabasaltiques à métatonalitiques. Les roches métamorphiques (amphibolites) sont d'origine ignée avec pour protolites probables les basaltes. Elles ont la signature géochimique des séries tholéitiques.

**Sur le plan structural**, l'évolution tectonique de la région de Ngoura-Colomines se résume en quatre épisodes majeurs de déformation:

(i) l'épisode  $D_1$  est ductile et se caractérise par la foliation  $S_1$ , la linéation minérale  $Lm_1$  et la linéation d'étirement minéral  $Le_1$  et les plis  $P_1$  et les boudins  $B_1$  intra-foliaux. Cette phase de déformation s'est déroulée en style compressif en régime coaxial et présente ainsi les caractères d'une déformation par constriction à raccourcissement maximal NNW-SSE;

(ii) l'épisode  $D_2$ , est ductilo-fragile et essentiellement marquée par la schistosité  $S_2$ , les cisaillements  $C_2$ , les failles satellites associées à l'échelle cartographique, la linéation d'étirement minéral  $Le_2$ , les boudins asymétriques tardi- $D_1$  à syn- $D_2$  et des plissements méso-à-mégascopiques  $P_2$ ;

(iii) l'épisode  $D_3$  est typiquement une phase de superposition tectonique de direction NNE-SSW. Les éléments structuraux de cette phase sont des plis  $P_3$  qui résultent du replissement des plis  $P_2$  et des cisaillements  $C_3$  d'attitude moyenne N045E30SE. Le

mouvement cisailant associé est dextre, tout comme celui de l'épisode D<sub>2</sub>. Par conséquent, il s'agit d'une phase de tectonique transpressive dextre;

(iv) l'épisode D<sub>4</sub> est essentiellement cassante et responsable de la mise en place des joints F<sub>4</sub> de toutes sortes et de direction variables (N030E, N040E à N080E, N115E à N140E et N165E à N180E). Cette phase ultime contrôle entre autre la minéralisation aurifère primaire encaissée dans les veines de quartz V<sub>4</sub> d'épaisseur variable et bourrées de sulfures (pyrite et chalcopyrite).

L'analyse microstructurale montre les porphyroblastes de feldspaths micro-fracturés et fragmentés, les cristaux de plagioclase montrant des macles mécaniques et à fractures perpendiculaires au plan de macle et les rubans de quartz étirés et tordus. Ces résultats mettent en évidence l'évolution de la déformation depuis la phase magmatique jusqu'à la phase post-magmatique en contexte de cisaillement.

**Sur le plan métallogénique,** la minéralisation aurifère alluviale dans la zone d'étude a une source proximale à sub-proximale. Les grains d'or récupérés des veines de quartz démantelées dans des sols latéritiques en amont des puits d'exploration présentent les empreintes de la minéralisation primaire, notamment les inclusions de quartz et de pyrite. L'or primaire dans le secteur de Ngoura-Colomines proviendrait donc de deux sources principales : la première syn-génétique intimement lié à la séricitisation des plagioclases et la seconde contrôlée par des veines de quartz. En outre, la présence des minéraux d'altération suggèrent l'influence des fluides hydrothermaux dans le processus de minéralisation.

Les cartes d'altération hydrothermale dérivées des données Landsat-8 et ASTER montrent que les indices aurifères sont globalement le long des zones de failles et autour des systèmes de drainage. Il existe cependant une relation étroite entre la minéralisation aurifère primaire et la zone de cisaillement NE-SW mise en évidence dans la zone d'étude et dans les localités voisines. En effet, les travaux de la présente thèse ont révélé que le réseau hydrographique serait à guidage structural et principalement contrôlé par le même système de failles ayant favorisé la circulation des fluides porteuses de minéralisation aurifère. Ainsi, l'approche combinée géostatistique minière par krigeage et cartographie par télédétection des altérations hydrothermales a permis de découvrir de nouveaux prospects d'exploration de l'or primaire dans le secteur d'étude. Il s'agit du prospect de Yangamo-Ndatanga (parties NW et SW), du prospect de Taparé-Tapondo (partie SE) et du prospect de Ngoura-Colomines au NE et dans la partie centrale de la zone d'étude

Ce travail présente le contexte géodynamique et le modèle génétique des granites aurifères du secteur Ngoura-Colomines associées aux zones de cisaillement panafricain. Malgré la quantité de données fournies, certains aspects de la géologie régionale restent inexplorés. Dans le futur, il serait intéressant de faire une étude géochimique isotopique pour apporter plus d'informations sur la source des roches étudiées. Egalement, une étude structurale par la méthode de l'ASM (Anisotropie de la Susceptibilité Magnétique) sur les différents massifs identifiés sera nécessaire pour mieux discuter de son caractère syn- ou tardi-tectonique. Enfin une étude géochronologique sur lesdits massifs et leurs encaissants métamorphiques pourra permettre de caler le timing de fonctionnement du cisaillement de Ngoura-Colomines permettant ainsi de mieux contraindre l'âge de la minéralisation aurifère.

## RÉFÉRENCES

*«J'espère que la postérité me jugera gentiment, non seulement les choses que j'ai expliquées  
mais aussi celles que j'ai intentionnellement omis afin de laisser aux autres le plaisir de la  
découverte. »*

- René Descartes

- Abdelnasser, A., Kumral, M., Zoheir, B., Karaman, M., 2018. REE geochemical characteristics and satellite-based mapping of hydrothermal alteration in Atud gold deposit, Egypt. *Journal of African Earth Sciences* 145, 317-330.
- Abaga, B., Nzenti, J. P., Njanko, T., Pedjui, P., Njiosseu, E. L. T., Nzolang, C., Kapajika, B., Mouangue, R. M., Tchoua, F. M., 1999. Le plutonisme peralumineux néoprotozoïque, syntectonique dans la Chaîne Panafricaine Nord-Equatoriale du Cameroun. In *Géologie et Environnements au Cameroun*, Vicat et Bilong editors, collection *GEOCAM 2*, 379–385.
- Abdelsalam, J. M., Liegeois, J. P., Stern, J. R., 2002. The saharan metacraton. *Journal of African Earth Sciences* 34, 119-136.
- Abrams, M.J., Brown, D., Lepley, L., Sadowski, R., 1983. Remote sensing of porphyry copper deposits in Southern Arizona. *Economic Geology* 78, 591-604.
- Abrams, M., 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data Products for the High Spatial Resolution Imager on NASA's Terra Platform. *International Journal of Remote Sensing* 21(5), 847–859.
- Abrams, M., Hook, S., Ramachandran, B., 2004. ASTER User Handbook, Version 2. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Online: [http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_Documents/aster\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_guide_v2.pdf)
- Almeida, F. F., Hasui, Y., Brito de Neves, B. B., Fuck, R. A., 1981. Brazilian structural provinces. *Earth Sciences Review* 17, 1-29.
- Altherr, R., Holl, A., Hegner, E., 2000. High-potassium, calc-alkaline I-type plutonism in the European Variscides: Northern Vosges (France) and northern Schwarzwald (Germany). *Lithos* 50, 51–73.
- Amponsah, P.O., Salvi, S., Béziat, D., Siebenaller, L., Baratoux, L., Jessell, M.W., 2015. Geology and geochemistry of the shear-hosted Julie gold deposit, NW Ghana. *Journal of African Earth Sciences* 112, 505–523.
- Asaah, A.V., Zoheir, B., Lehmann, B., Frei, D., Burgess, R., Suh, C.E., 2015. Geochemistry and geochronology of the ~620 Ma gold-associated Batouri granitoids, Cameroon. *International Geology Review* 57, 1485-1509.
- Ateh, K.I., Suh, C.E., Shemang, E.M., Vishiti, A., Tata, E., Chombong, N.N., 2017. NewLA-ICPMS U-Pb Ages, Lu-Hf Systematics and REE Characterization of Zircons from a Granitic Pluton in the Betare Oya Gold District, SE Cameroon. *Journal of Geosciences and Geomatics* 5 (6), 267–283.
- Barbarin, B., 1999. A review of the relationships between granitoid types, their origins and their geodynamic environments, *Lithos*, 46 (3), 605-626.
- Batchelor, R. A., Bowden, P., 1985. Petrogenetic interpretation of granitoid rock series using multicationic parameters. *Chemical Geology* 48, 43–55.
- Bagnouls, L., Gaussen, H., 1957. Les climats biologiques et leur classification. *Annales de géographie XXVI* 355, 193-220.
- Bell, T. H. 1981. Foliation development—the contribution, geometry and significance of progressive, bulk, inhomogeneous shortening. *Tectonophysics*, 75, 263–296.
- Binam Mandeng E. P., Bondje` Bidjeck L. M., Takodjou Wambo J.D., Taku A., Bineli Betsi T., Ipan A. s., Tchami Nfada L., Bitom D. L., 2018. Lithologic and structural mapping of the Abiete–Toko gold district in southern Cameroon, using Landsat 7 ETM+/SRTM. *Comptes Rendus Geoscience* 350, 130-140.
- Bishop, J.L., Lane, M.D., Dyar, M.D., Brwon, A.J. 2008. Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: Smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas. *Clay Minerals* 43, 35–54.
- Black, R., and Liegeois, J. P., 1993. Cratons, mobile belts, alkaline rocks and continental lithospheric mantle: the Pan-African testimony. *Journal of Geologic Society London* 150, 89-98
- Blevin, P.L., 2014. Redox and compositional parameters for interpreting the granitoid metallogeny of eastern Australia: implications for gold-rich ore systems. *Resource Geology* 54 (3), 241–252.
- Bouabdellah, M., Chekroun, F., Alansari, A., Margoum, D., 2016. The Granitoid-Related Tiouit Gold Deposit. Neoproterozoic Mineralization by a Polyphase Late-Magmatic to Hydrothermal System. *Mineral Resource Reviews, Saghro Inlier, Eastern Anti-Atlas (Morocco)*, 405–414 pp.

- Bouyo Houketchang, M., Penaye, J., Barbey, J., Toteu, S.F., Wandji, P., 2013. Petrology of high-pressure granulite facies metapelites and metabasites from Tcholliré and Banyo regions: Geodynamic implication for the Central African Fold Belt (CAFB) of north-central Cameroon. *Precambrian Research* 224, 412-433.
- Bouyo Houketchang, M., Zhao, Y., Penaye, J., Zhang, S.H., Njel, U.O., 2015. Neoproterozoic subduction-related metavolcanic and metasedimentary rocks from the Rey Bouba Greenstone Belt of north-central Cameroon in the Central African Fold Belt: new insights into a continental arc geodynamic setting. *Precambrian Research*. 261, 40-53.
- Bouyo Houketchang, M., Penaye, J., Njel, U.O., Moussango, A.P.I., Sep, J.P.N., Nyama, B.A., Wassouo, W.J., Abate, J.M.E., Yaya, F., Mahamat, A., Hao Ye., Fei Wun., 2016. Geochronological, geochemical and mineralogical constraints of emplacement depth of TTG suite from the Sinassi Batholith in the Central African Fold Belt (CAFB) of northern Cameroon: Implications for tectonomagmatic evolution. *Journal of African Earth Sciences* 116, 9-41.
- Bouyo Houketchang, M., Penaye, J., Mouri, H., Toteu, S.F., 2019. Eclogite facies metabasites from the Paleoproterozoic Nyong Group, SW Cameroon: Mineralogical evidence and implications for a high-pressure metamorphism related to a subduction zone at the NW margin of the Archean Congo craton. *Journal of African Earth Sciences* 149, 215-234
- Brito De Neves, B.D., Van Schmus, and Fetter, A., 2001. North-West Africa North-Eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *Journal of African Earth Sciences*, 34, 275-273.
- Butt, C.R.M., Zeegers, H., 1992. Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Subtropical Terrains. Elsevier, Amsterdam and London.
- Carranza, E.J.M., Hale, M., 2002. Mineral mapping with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrain. *International Journal of Remote Sensing* 23 (22), 4827-4852.
- Carignan, J., Hild, P., Mévelle, G., Morel, J., Yeghicheyan, D., 2001. Routine analyses of trace elements in geological samples using flow injection and low pressure online liquid chromatography coupled to ICP-MS: a study of reference materials BR, DR-N, UB-N, AN-G and GH. *Geostandards Newsletter* 25, 187-198.
- Castaing, C., Triboulet, C., Feybesse, J.L., and Chèvremont, P., 1993. Tectonometamorphic evolution of Ghana, Togo and Benin in the light of the Pan-African/Brasiliano orogeny. *Tectonophysics* 218, 323-347.
- Castaing, C., Feybesse, J.L., Thiéblemont, D., Triboulet, C., and Chèvremont, P., 1994. Paleogeographical reconstructions of the Pan-African/Brasiliano orogen: closure of an ocean domain or intracontinental convergence between major blocks? *Precambrian Research* 69, 327-344.
- Chappell, B.W., White, A.J.R., 1974. Two contrasting granite types. *Pacific Geology* 8, 173-174.
- Chappell, B.W., 1999. Aluminium saturation in I- and S-type granites and the characterization of fractionated haplogranites. *Lithos* 46 (3), 535-551.
- Chappell, B.W., Bryant, C.J., Wyborn, D., 2012. Peraluminous I-type granites. *Lithos* 153, 142-153.
- Chebeu, C., Ngo Nlend, C. D., Nzenti, J. P., Ganno, S. 2011. Neoproterozoic High-K Calcalkaline granitoids from Bapa-Batié, North Equatorial Fold Belt, Central Cameroon: petrogenesis and geodynamic significance. *The Open Geology Journal*, 4, 112-131.
- Cheng, Q., Jing, L., Panahi, A., 2006. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement. *International Journal of Remote Sensing* 27, 3387-3401.
- Clemens, J.D., Stevens, G., Farina, F., 2011. The enigmatic sources of I-type granites : the peritectic connexion. *Lithos* 126 (3-4), 174-181.
- Clemens, J.D., Stevens, G., 2012. What controls chemical variation in granitic magmas ? *Lithos* 134-135, 317-329.
- Colby, J.D., 1991. Topographic normalization in rugged terrain. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57, 531-537.
- Comon, P., Jutten, C., 2010. Handbook of blind source separation. New York, NY: Academic Press.
- Cooley, T., Anderson, G.P., Felde, G.W., Hoke, M.L., Ratkowski, A.J., Chetwynd, J.H., Gardner, J.A., Adler-Golden, S.M., Matthew, M.W., Berk, A., Bernstein, L.S., Acharya, P.K., Miller, D., Lewis, P., 2002. Flaash, a Modtran4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. *Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, IEEE International*, 3, 1414-1418.

- Crosta, A. and Moore, J., 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in Greenstone belt terrain. In: Proceedings of the 7th ERIM Thematic Conference: *Remote Sensing for Exploration Geology*, p. 1173-1187.
- Cullity, B. D., 1978. Elements of X-ray diffraction. 2 ed. Reading: Addison-Wesley, 555p.
- Davis, J. C., 1986. Statistics and data analysis in geology. 2<sup>nd</sup> ed, John Wiley & Sons. New York, 289 p.
- Davison, I., Santos, R. A., 1989. Tectonic evolution of the Sergipano Fold Belt, NE Brazil, during the Brasiliano Orogeny. *Precambrian Research* 45, 319-342.
- Davidson, I., Reginaldo., 1989. Tectonic evolution for the seripano Fold Belt, NE Brazil, during the Brazilian Orogeny. *Precambrian Research* 45, 319-342.
- Debon, F. et LeFort, P., 1983. A chemical mineralogical classification of common plutonic rocks and associations. *Transactions of the Royal Society of Edinburgh, Earth Sciences* 73, 135-149.
- De la Roche, H., Leterrier, J., Granclaude, P., Marchal, M., 1980. A classification of volcanic and plutonic rocks using R1–R2 diagram and major element analyses. Its relationships with current nomenclature. *Chemical Geology* 29, 183–210.
- Deller, M.E.A., 2006. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and AII data-example from Eritrea and Arabia. *International Journal of Remote Sensing* 27(12), 2389-2409.
- Dewey, J. F., Holdsworth, R. E. & Strachan, R.A. 1998. Transpression and transtension zones. In: Holdsworth, R. E., Strachan, R. A. & Dewey, J. F. (eds) Continental Transpressional and Transtensional Tectonics. *Geological Society, London, Special Publications* 135, 1–14.
- Djouka-Fonkwé, M.L., Schulz, B., Schüssler, U., Tchouankoué, J.P. and Nzolang, C., 2008. Geochemistry of the Bafoussam Pan-African I- and S-type granitoids in western Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 50, 148-167.
- Duby, C., Robin, S., 2006. Analyse en Composantes Principales. Département O.M.I.P. Institut National Agronomique Paris – Grignon, 54 p.
- Dumont, J.F., Toteu, S.F., Penaye, J., 1985. Ensembles structuraux et principales phases de déformations panafricaines dans la zone mobile du nord Cameroun, région de Poli. *Revue des Sciences et Techniques, Série Sciences de la Terre, Yaoundé* 1, 1-2.
- Dumont, J.F., 1986. Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun). Sa position dans le contexte des grands accidents d'Afrique Centrale et de la limite nord du craton congolais. *Géodynamique* 1, 13–19.
- Duplaix, 1958. Détermination microscopique des minéraux des sables. Librairie Polyt. C. Béranger, Dunod, Paris, 79P.
- Duuring, P., Hagemann, S.G., Novikova, Y., Cudahy, T., Laukamp, C., 2012. Targeting Iron Ore in Banded Iron Formations Using ASTER Data: Weld Range Greenstone Belt, Yilgarn Craton, Western Australia. *Economic Geology* 107, 585–597.
- Edou Minko, A., Colin F., Trescases, J.J., Lecomte, P., 1992. Alteration lateritique du gîte aurifère d'Ovala (Gabon) et formation d'une anomalie superficielle de dispersion. *Mineralium Deposita* 27, 90 -100.
- Eno Belinga, S.M., 1984. Géologie du Cameroun. Librairie Universitaire, Université de Yaoundé, République Unie du Cameroun, 281 p.
- Esri, 2005. Utilisation d'ArcMap. 600 p.
- Evensen, N.M., Hamilton, P.J., Ó'níons, R.K., 1978. Rare- earth abundances in chondritic meteorites. *Geochimica et Cosmochimica Acta* , 42, 1199-1212.
- Farahat, E.S., Zaki, R., Hauzenberger, C., Sami, M., 2011. Neoproterozoic calc-alkaline peraluminous granitoids of the Deleihimmi pluton, Central Eastern Desert, Egypt: implications for transition from late- to post-collisional tectonomagmatic evolution in the northern Arabian–Nubian Shield. *Geological Journal* 46, 544–560.
- Ferré, E.C., Caby, R., Peucat, J.J., Capdevila, R. & Monié, P. 1998. Pan-African, post-collisional, ferro-potassic granite and quartz–monzonite plutons of Eastern Nigeria. *Lithos* 45, 255–279.
- Ferré, E., Gleizes, G., Caby, R., 2002. Obliques convergent tectonics and granite emplacement in the Trans-Saharan belt of Eastern Nigeria: a Synthesis. *Precambrian Research* 114, 199-219.

- Feybesse, J. L., Johan, V., Maurizot, P., Abessolo, A., 1987. Evolution tectono-métamorphique libérienne et éburnéenne de la partie NW du Craton Zaïrois (SW Cameroun). In G. Matheis and H. Schandelmeier (Editors), Current research in African Earth Sciences. *Balkema, Rotterdam*, 9-12.
- Feybesse, J.L., Johan, V., Triboulet, C., Guerrot, C., Mayaga-Mikolo, F., Bouchot, V., Eko N\_dong, J., 1998. The West Central African belt: a model of 2.5–2.0 Ga accretion and two-phase orogenic evolution. *Precambrian Research* 87, 161–216.
- Fon, A.N., Che, V.B., Suh, C.E., 2012. Application of electrical resistivity and chargeability data on a GIS platform in delineating auriferous structures in a deeply weathered lateritic terrain, Eastern Cameroon. *International Journal of Geosciences* 3, 960-971.
- Fozing, E. M., Kwekam, M., Gountie, D. M., Asobo Asaah, N.E., Njanko, T., Tcheumenak Kouemo, J., Efon Awoum, J., Njonfang, E., 2019. Petrography and geochemistry of amphibolites from the Fomopea Pluton (West Cameroon): Origin and geodynamic setting. *Journal of African Earth Sciences* 154, 181–194.
- Frost, B. R., Barnes, C. G., Collins, W. J., Arculus, R. J., Ellis, D. J., Frost, C. D., 2001. A geochemical classification for granitic rocks. *Journal of Petrology* 42, 2033–2048.
- Fuanya, C., Yongue, F.T., Kankeu, B., 2014. Geological study of gold indices at Ako'ozam, Akom II region (south Cameroon). *Sciences, Technologies et Développement* 15, 98 -106.
- Fujisada, H., 1995. Design and performance of ASTER instrument. *Proceedings of SPIE, International Society of Optical Engineering*, 2583, 16-25.
- Galvoa, L.S., Almeida-Filho, R., Vitorello, I., 2005. Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: evaluation in a tropical savannah environment. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation* 7, 107-114.
- Ganno, S., 2010. La région de Kimbi aux confins du Cameroun et du Nigeria: une zone clé pour la compréhension de l'évolution tectonique de la Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale au contact de la Chaîne Panafricaine Trans-saharienne. Thèse de Doctorat PhD, *Université de Yaoundé I*, 160 pages.
- Ganno, S., Nzenti, J.P., Ngnotue, T., Kankeu, B., Kouankap Nono, G.D., 2010. Polyphase deformation and evidence for transpressive tectonics in the Kimbi area, Northwestern Cameroon Pan-African fold belt. *Journal of Geology and Mining Research* 2, 001-015.
- Ganno, S., Tanko Njiosseu, E.L., Kouankap Nono, G.D., Ngnotue, T., Nga Essomba, P., Nzenti, J.P., 2016. Structural Characterization of Outcrop-Scale Superposed Folding in the Kimbi Area (NW Cameroon): Implications for the Tectonic Evolution of the Pan-African North Equatorial Fold Belt. *Earth Sciences* 5, 62-69.
- Ganno, S., Njiosseu, T. E. L., Kouankap, N. G. D., Djoukouo, S. A. P., Moudioh, C., Ngnotué, T., Nzenti, J. P., 2017. A mixed seawater and hydrothermal origin of superior-type banded iron formation (BIF)-hosted Kouambo iron deposit, Palaeoproterozoic Nyong series, southwestern Cameroon: Constraints from petrography and geochemistry. *Ore Geology Reviews* 80, 860–875.
- Ganwa, A.A., 2005. Les granitoïdes de Méiganga : étude pétrographique, géochimique, structurale et géochronologique. Leur place dans la chaîne panafricaine (Thèse de doctorat d'Etat). *Université de Yaoundé I*, p. 162.
- Ganwa, A.A., Wolfgang, F., Wolfgang, S., Ekodeck, E.G., Cosmas, K.S., Ngako, V., 2008. Archean inheritances in the pyroxene-amphibole-bearing gneiss of the Méiganga area (Central North Cameroon): Geochemical and <sup>207</sup>Pb/<sup>206</sup>Pb age imprints. *Comptes Rendus Geoscience* 340, 211-222.
- Ganwa, A.A., Siebel, W., Frisch, W., Shang, C.K., Ekodeck, E.G., 2011. Geochemistry and geochronology of the Méiganga metadiorite: implications on the timing of D2 deformational phase in Adamawa Yadé Domain in Cameroon. *International Journal of Biological and Chemical Sciences* 5 (4), 1754-1767.
- Ganwa, A.A., Klotzli, S.U., Hauzenberger, C., 2016. Evidence for Archean inheritance in the pre-Panafrican crust of Central Cameroon: insight from zircon internal structure and LA-MC-ICP-MS U-Pb ages. *Journal of African Earth Sciences* 120, 12-22.
- Ganwa, A.A., Klötzli, U. S., Kepnamou, A. D., Hauzenberger, C., 2018. Multiple Ediacaran tectono-metamorphic events in the Adamawa-Yadé Domain of the Central Africa Fold Belt: Insight from the zircon U–Pb LAM-ICP-MS geochronology of the metadiorite of Meiganga (Central Cameroon). *Geological Journal*, 1–14. <https://doi.org/10.1002/gj.3135>

- Gazel, J., 1952. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500 000 : coupure batouri-Ouest avec notice explicative. *Archives de la Direction des Mines et la Géologie, Cameroun, Yaoundé*.
- Gazel, J., Gerad, G., 1954. Notice explicative sur la feuille Batouri- Est : Carte géologique de reconnaissance à l'échelle du 1/500 000. Paris (imprimerie nationale), 42p.
- Goldstein, G. A., 1988. Factors affecting kinematic interpretation of asymmetric boudinage in shear zones. *Journal of Structural Geology* 10, 707-715.
- Goscombe, D., Passchier, W., Hand, M., 2004. Boudinage classification: end-member boudin types and modified boudin structures. *Journal of Structural Geology* 26, 739–763.
- Gratton, Y., Prieur, L., Ingram, R. G., Lafleur, C., 2002. Les courants en mer d'Alborán Est pendant la campagne Almofront-I. *Rapport interne, INRS-ETE*.
- Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Robert, F., Hart, C.J.R., 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, exploration significance. *Economic Geology* 98, 1–29.
- Gupta R.P., Tiwari R.K., Saini, V., Srivastava, N., 2013. A simplified approach for interpreting principal component images. *Advances in Remote Sensing* 2, 111–119.
- Gupta, R.P., 2017. Remote Sensing Geology, 3rd edn. *Springer, Berlin, Germany, pp 180-190 , 235-240, and 332-336*.
- Hart, C.J.R., 2005. Classifying, Distinguishing and Exploring for Intrusion-Related Gold Systems: The Gangue. *MDD Newsletter* 87(1), 4–9.
- Heriawan, M.N., Koike, K., 2008b. Uncertainty assessment of coal tonnage by spatial modeling of seam structure and coal quality. *International Journal of Coal Geology* 76, 217-226.
- Holdsworth, R. E., Tavarnelli, E., Clegg, P., Pinheiro, R. V. L., Jones, R. R. & McCaffrey, K. J. W. 2002. Domainal deformation patterns and strain partitioning during transpression: an example from the Southern Uplands terrane, Scotland. *Journal of the Geological Society, London* 159, 401–415.
- Hunt, G., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. *Geophysics* 42, 501-513.
- Hunt, G.R., Ashley, P., 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. *Economic Geology* 74, 1613-1629.
- Hyvarinen, A., Oja, E., 2000. Independent component analysis: algorithms and applications, *Neural Networks* 13(4-5), 411-430.
- Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E., 2001. Independent component analysis. *A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. pp.1-12*.
- Hyvärinen A., 2005. A unifying model for blind separation of independent sources. *Signal Process.* 85, 1419–1427.
- Hyvärinen, A., 2013. Independent component analysis: recent advances. *Philosophical Transactions of The Royal Society A Mathematical Physical and Engineering Sciences* 371: 20110534. <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2011.0534>
- Hyvärinen, A., Zhang, K., Shimizu, S., Hoyer, P.O., 2010. Estimation of a structural vector autoregression model using non-Gaussianity. *Journal of Machine Learning Research* 11, 1709–1731.
- Irons, J.R., Dwyer, J.L., Barsi, J.A., 2012. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. *Remote Sensing of Environment* 145, 154-172.
- Irvine, T.M. & Baragar, W.R. 1971. A guide to the chemical classification of common volcanic rocks. *Canadian Journal of Earth Sciences* 8, 523-548.
- Iwasaki, A., Tonooka, H., 2005. Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR. *IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing*, 43, 2747-2751.
- Jensen, J.R., 2005. Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective, Third edn. *Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458. pp. 276-287 and 296-301*.
- Journel A.G., Huijbregts C. J., 1978. Mining geostatistics. *Academic Press Inc. 760p*.

- Kamgang Kabeyene Beyala V., 1998. Evolution supérogène des roches et incidence phytogéographique: Cas du contact forêt-savane au Sud-est Cameroun. Thèse d'Etat, SC.Nat, *Univ. Yaoundé I*, 208p.
- Kankeu, B., Greiling, R.O., Nzenti J.P., Runge, J., Bassahak, J., Hell, J.V., 2008. Pan- African tectonic evolution along the Adamoua shear zone, central Cameroon: The southern Mbere-Djerem high strain zone. 22<sup>nd</sup> *Colloquium on African Geology, Hammanet-Tunisia, 4-6 November 2008*, 69-71.
- Kankeu, B., Greiling, R. O., Nzenti, J.P., 2009. Pan-African strike-slip tectonics in eastern Cameroon-Magnetic fabrics (AMS) and structure in the Lom basin and its gneissic basement. *Precambrian Research* 17, 258-272.
- Kankeu, B., Nzenti, J.P., Greiling, R.O., Ganno, S., Ngotué, T., Basahak, J. & Hell, J.V., 2010. Application de la technique de l'Anisotropie de la Susceptibilité Magnétique (ASM) à l'identification des structures géologiques: le cisaillement panafricain de Bétaré Oya dans le district aurifère de l'Est Cameroun. *Annales de la Faculté des Sciences, Série Sciences de la Terre*, 38, 17-30.
- Kankeu, B., Greiling, R. O., Nzenti, J.P., Bassahak, J. and Hell, J. V., 2012. Strain partitioning along the Neoproterozoic central Africa shear zone system: Structures and magnetic fabrics (AMS) from the Meiganga area, Cameroon. *Neues Jahrbuch Geologie Paläontologie Abhandlungen* 265, 27-47.
- Kankeu, B., Greiling, R. O., Nzenti, J.P., Ganno, S., Danguene, P.Y.E., Bassahak, J., Hell, J.V., 2017. Contrasting Pan-African structural styles at the NW margin of the Congo Shield in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 146, 28-47.
- Kouamé F., 1999. Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitales: exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. *Télé-détection* 1, 139-156.
- Kouankap Nono, G.D., Nzenti, J.P., Suh, C.E., Ganno, S., 2010. Geochemistry of Ferriferous, High-K Calc-Alkaline Granitoids from Banefo –Mvoutsaha Massif (NE Bafoussam), Central Domain of the Pan-African Fold Belt, Cameroon. *The Open Geology Journal* 4, 21-34.
- Kouankap Nono, G.D., 2011. Etude du Cisaillement Centre Camerounais dans la région de Banefo-Mvoutsaha au NE Bafoussam, dans le domaine centre de la Chaîne Panafricaine Nord Equatoriale au Cameroun. Pétrogenèse, Géochronologie et Structurologie des formations du socle. Thèse de Doctorat/ Ph.D., *Université de Yaoundé I*, 118p.
- Kwékam, M., Liégeois, J.P., Njonfang, E., Affaton, P., Hartmann, G., Tchoua, F., 2010. Nature, origin and significance of the Fomopéa Pan-African high-K calc-alkaline plutonic complex in the Central African fold belt (Cameroon). *Journal African Sciences* 54, 79-95.
- La Roche, H. De, 1965. Sur l'existence de plusieurs faciès géochimiques des schistes paléozoïques des Pyrénées lychonnaise. *Geologische Rundschau* 55, 274-301.
- Lafuente, B., Downs, R.T., Yang, H., Stone, N., 2015. The power of databases: the RRUFF project. In: Highlights in Mineralogical Crystallography, *T Armbruster and R M Danisi, eds. Berlin, Germany, W. De Gruyter*, pp 1-30 ([link](#))
- Lang, J.R., Baker, T., Hart, C.J.R., Mortensen, J.K., 2000. An exploration model for intrusion-related gold systems. *Society of Economic Geologists Newsletter* 40, 1-15.
- Large, R.R., Allen, R.L., Blake, M.D., Herrmann, W., 2001. Hydrothermal alteration and volatile element halos for the Rosebery K lens volcanic-hosted massive sulfide deposit, western Tasmania. *Economic Geology* 96 (5), 1055-1072.
- Ledru, P., Johan, V., Milesi, J.P., Tegye, M., 1994. Markers of the last stages of the Paleoproterozoic collision: evidence for a 2.0 Ga continent evolving circum-South Atlantic provinces. *Precambrian Research* 69, 169-191.
- Lerouge, C., Cocherie, A., Toteu, S.F., Penaye, J., Milési, J.P., Tchameni, R., Nsifa, E.N., Fanning, M., Deloele, E., 2006. Shrimp U-Pb zircon age evidence for Paleoproterozoic sedimentation and 2.05 Ga syntectonic plutonism in the Nyong Group, South-Western Cameroon: consequences for the Eburnean-Transamazonian belt of NE Brazil and Central Africa. *Journal of African Earth Sciences* 44, 413-427.
- Loose, D., Schenk, V., 2018. 2.09 Ga old eclogites in the Eburnian-Transamazonian orogen of southern Cameroon: Significance for Palaeoproterozoic plate tectonics. *Precambrian Research* 304, 1-11.
- Li, X.-H., Chen, Y., Li, J., Yang, C., Ling, X.X., Tchouankoué, J.P., 2016. New isotopic constraints on age and origin of Mesoarchean charnockite, trondhjemite and amphibolite in the Ntem Complex of NW Congo Craton, southern Cameroon. *Precambrian Research* 276, 14-23

- Liegeois, J. P., Black, R., Navez, J., and Latouche, L., 1994. Early and Late panafrican orogenies in the Air assembly of terranes (Tuarey Shield, Niger). *Precambrian Research* 67, 59 – 88.
- Liégeois, J.P., Abdelsalam, G.M., Ennih, N., Ouabadi, A., 2013. Metacraton: Nature, genesis and behavior. *Gondwana Research* 23, 220-237.
- Liu, L., Li, Y., Zhou, J., Han, L., Xu, X., 2018. Gold-copper deposits in Wushitala, Southern Tianshan, Northwest China: Application of ASTER data for mineral exploration. *Geological Journal* 53, 362-371.
- Loughlin, W.P., 1991. Principal components analysis for alteration mapping. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 57, 1163–1169.
- Lyon, R.J.P., 1972. Infrared spectral emittance in geological mapping: airborne spectrometer data from Pisgah Crater. *Science* 7, 983–986.
- Maurizot, P., Abessolo, A., Feybesse, J.L., Johan, L.P., 1986. Etude de prospection minière du Sud-Ouest Cameroun. Synthèse des travaux de 1978 à 1985. *Rapport de BRGM* 85, 274 P.
- Mars, J.C., Rowan, L.C., 2010. Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. *Remote Sensing of Environment* 114, 2011-2025.
- Mars, J.C., Rowan, L.C., 2011. ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Khanneshin carbonate volcano, Afghanistan. *Geosphere* 7, 276-289.
- Matheron, G., 1963. Principles of geostatistics. *Economic Geology* 58, 1246-1266.
- Metang, V., Nkoumbou, C., Tchakounté, N.J., Njopwouo, D., 2014. Application of remote sensing for the mapping of geological structures in rainforest area: a case study at the Matomb-Makak area, Center-South Cameroon. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 2(5), 196 – 207.
- Métang, V., 2015. Cartographie géologique du secteur de Matomb-Makak (centre-sud Cameroun) : implications sur l'évolution géodynamique du groupe panafricain de Yaoundé. Thèse doctorat/PhD, *Université de Yaoundé I*, 263 P.
- Milesi, J.P., Feybesse, J.L., Ledru, P., Dommanget, A., Ouedraogo, M.F., Marcoux, E., Prost, A., Vinchion, C., Sylvain, J.P., Johan, V., Teguey, M., Calvez, J.Y., Lagny, P., Abouchamy, W., Ankrah, P., Boher, M., Diallo, M., Fabre, R., Heinry, C., Lapierre, H., Pons, J., Thieblement, D., Toure, S., Morel, B., 1989. Les minéralisations aurifères de l'Afrique de l'Ouest. *Chronique de la Recherche Minière* 497, 3-98
- Montel, J.M., Vielzeuf, D., 1997. Partial melting of metagreywackes, Part II. Compositions of minerals and melts. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 128, 176–196.
- Morris, R.V., Lauer, H.V., Lawson, C.A., Girson, E.K., Nace, G.A., Stewart, C., 1985. Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), maghemite ( $\gamma$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), goethite ( $\alpha$ -FeOOH), and lepidocrocite ( $\beta$ -FeOOH). *Journal of Geophysical Research* 90, 3126–3144.
- Murphy, R.J., Monteiro, S.T., 2013. Mapping the distribution of ferric iron minerals on a vertical mine face using derivative analysis of hyperspectral imagery (430–970 nm). *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing* 75, 29–39.
- Mvondo, H., Owona, S., Mvondo, O.J., Essono, J., 2007. Tectonic evolution of the Yaoundé segment of the Neoproterozoic Central African Orogenic Belt in Southern Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences*. 44, 433-444.
- Mvondo, O.J., 2009. Caractérisation des événements tectoniques dans le domaine sud de la chaîne au Cameroun : styles tectoniques et géochronologie des séries de Yaoundé et de Bafia. Thèse de Doctorat/Ph.D, *Université de Yaoundé I*, 160p
- Ndema Mbongue J. L., Ngotue T., Ngo Nlend C. D., Nzenti J. P., Cheo Suh E., 2014. Origin and Evolution of the Formation of the Cameroon Nyong Series in the Western Border of the Congo Craton. *Journal of Geosciences and Geomatics* 2, 62-75
- Ndema Mbongue J. L., 2016. Evolution tectono – métamorphique de la serie du nyong à edea et à eseka. Thèse de Doctorat/ Ph.D., *Université de Yaoundé I*, 230p.
- Njanko, T., Nedelec, A., Affaton, P., 2006. Synkinematic high - K calc-alkaline plutons associated to the Pan-African Central Cameroon Shear Zone (W-Tibati area): Petrology and geodynamic significance. *Journal of African Earth Sciences* 44, 494-510.

- Nédélec, A., Minyem, D., and Barbey, P., 1993. High-P high-T anatexis or arhaean tonalitic grey gneisses: the Eseka migmatites, Cameroon. *Precambrian Research*, 62, 191-205.
- Neves, B. B., Van Schmus, W.R., Fetter, A., 2002. North-western Africa–North-eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *Journal of African Earth Sciences*, 34, 275–278
- Neves, S.P., Bruguier, O., Vauchez, A., Bosch, D., Silva, J.M.R., 2006. Timing of crust formation, deposition of supracrustal sequences, and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in the East Pernambuco belt (Borborema Province, NE Brazil): Implications for western Gondwana assembly. *Precambrian Research* 149, 197–216.
- Nga Essomba Tsoungui, P., Ganno, S., Tanko Njiosseu, E.L., Ndema Mbongue, J.L., Kamguia Woguia, B., Soh Tamehe, L., Takodjou Wambo, J.D., Nzenti, J.P., 2020. Geochemical constraints on the origin and tectonic setting of the serpentinized peridotites from the Paleoproterozoic Nyong series, Eseka area, SW Cameroon. *Acta Geochimica* <https://doi.org/10.1007/s11631-019-00368-4>.
- Ngako, V., 1986. Evolution métamorphique et structurale de la bordure Sud-ouest de la “série de Poli” (segment camerounais de la chaîne panafricaine). *Mémoires et documents du Centre Armoricaïn d'étude structurale des socles*, N° 5.
- Ngako, V., 1999. Les déformations continentales panafricaines en Afrique Centrale. Résultat d'un poinçonnement de type himalayen. Thèse Doctorat D'Etat, *Université de Yaoundé I*, 241p.
- Ngako, V., Jégouzo, P., Nzenti, J.P., 1991. Le Cisaillement Centre Camerounais. Rôle structural et géodynamique dans l'orogénèse panafricaine. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences, Paris* 313, 457–463.
- Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J. M., Njanko, T., 2003. Panafrican tectonic evolution in central and southern Cameroon : transpression and transtention during sinistral shear movements. *Journal of African Earth Sciences* 36, 207-214.
- Ngako V., Affaton P., Njonfang E., 2008. Pan-African tectonics in northwestern Cameroon: Implication for the history of western Gondwana. *Gondwana Research* 14, 509-522.
- Ngako, V., Njonfang, E., 2011. Plates amalgamation and plate destruction, the Western Gondwana history. In: D. Closson (Ed.), *Tectonics. INTECH, UK*, p. 3-34.
- Ngamy Kamwa, A., Tchakounte, J.N., Nkoumbou, C., Owona, S., Tchouankoue, J.-P., Mvondo Ondo, J., 2018. Petrology and geochemistry of the Yoro-Yangben Pan-African granitoid intrusion in the archaean Adamawa-Yade crust (Sw-Bafia, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, doi: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2018.11.004>.
- Ngatcha, R.B., Okunlola, O.A., Suh, C.E., Ateh, K. I., Hofmann, A., 2019. Petrochemical characterization of Neoproterozoic Colomine granitoids, SE Cameroon: Implications for gold mineralization. *Lithos* 344–345, 175-192.
- Ngnotué, T., Nzenti, J.P., Barbey, P., and Tchoua, F. M., 2000. The Ntui-Betamba high-grade gneisses: a Northward extension of the Pan-African Yaounde gneisses in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 31, 369-381.
- Ngnotué, T., Ganno, S., Nzenti, J.P., Schulz, B., Tchaptchet Tchato, D., Suh, C.E., 2012. Geochemistry and Geochronology of Peraluminous High-K Granitic Leucosomes of Yaoundé Series (Cameroon): Evidence for a Unique Pan-African Magmatism and Melting Event in North Equatorial Fold Belt. *International Journal of Geosciences* 3, 525-548.
- Nguiessi, Tchankam, C., Nzenti, J. P., Nsifa, E. N., Tempier, P., Tchoua, F. M., 1997. Les granitoïdes calco-alcalins, syn-cisaillement de Bandja dans la Chaîne Panafricaine Nord-Equatoriale au Cameroun. *Compte Rendu Académie des Sciences* 325, 95-101.
- Njonfang, E., Ngako, V., Moreau, C., Affaton, P., Diot, H., 2008. Restraining bends in high temperature shear zones: The «Central Cameroon Shear zone», Central Africa. *Journal of African Earth Sciences* 52, 9-20.
- Ninomiya, Y., 2003. A stabilized vegetation index and several mineralogic indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. Proc. *IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03)* v. 3, Toulouse, France, 21–25 July 2003, p.1552-1554.
- Ninomiya, Y., Fu, B., Cudahy, T.J., 2005. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared radiance-at-sensor data. *Remote Sensing of Environment* 99 (1-2), 127-139.

- Noda, S., Yamaguchi, Y., 2017. Estimation of surface iron oxide abundance with suppression of grain size and topography effects. *Ore Geology Reviews* 83, 312–320.
- Nomo Negue., 2016. Signification géodynamique de la faille de Tcholliré-Banyo : Apport de la pétrologie, de l'analyse structurale, de la géochimie et de la géochronologie des roches de la région de Tcholliré (Nord Cameroun). Thèse de Doctorat/ Ph.D., *Université de Yaoundé I*, 285p.
- Nomo Negue, E., Tchameni, R., Vanderhaeghe, O., Fengyue, S., Barbey, P., Tekoum, L., Fosso, P.M., Eglinger, A., Fouotsa, N.A.S., 2017. Structure and LA-ICP-MS zircon U–Pb dating of syntectonic plutons emplaced in the Pan-African Banyo-Tcholliré shear zone (central north Cameroun). *Journal of African Earth Sciences* 131, 251–271.
- Noori, L., Pour, B.A., Askari, G., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, C-W., Honarmand, M., 2019. Comparison of Different Algorithms to Map Hydrothermal Alteration Zones Using ASTER Remote Sensing Data for Polymetallic Vein-Type Ore Exploration: Toroud–Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran. *Remote Sensing*, 11, 495; doi.org/10.3390/rs11050495.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Macaudiere, J. et Soba, D., 1988. Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaoundé gneisses (Cameroon). *Precambrian Research* 38, 91-109.
- Nzenti, J. P., Ngako, V., Kambou, R., Penaye, J., Bassahak, J. et Njel, O.V., 1992. Structures régionales de la chaîne panafricaine du Nord Cameroun. *Compte Rendu Académie des Sciences Paris* 315, 209 – 215.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Bertrand, J. M.L. et Macaudiere, J., 1994. La chaîne panafricaine au Cameroun: cherchons suture et modèle. In : S.G.F. édit., 15<sup>e</sup> réunion des Sciences de la Terre, Nancy, France, 99 P.
- Nzenti, J. P., Njanko, T., Njiosseu, E.L.T., Tchoua, F.M., 1998. Les domaines granulitiques de la Chaîne Panafricaine Nord–Équatoriale au Cameroun. In Géologie et environnement au Cameroun, Vicat et Bilong editors, *Collection Geocam I*, 255 –264.
- Nzenti, J. P., Barbey, P., Tchoua, F.M, 1999. Evolution crustale au Cameroun : éléments pour un modèle géodynamique de l'orogénèse néoproterozoïque. In Géologie et environnements au Cameroun, Vicat et Bilong editors, *collection Geocam 2*, 397-407.
- Nzenti, J.P., Badibanga Kapajika, G., Wörner., Toto Ruananza Lubala, 2006. Synkinematic emplacement of granitoids in a Pan-African shear zone in Central Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 45, 74-86.
- Nzenti, J.P., Njiosseu Tanko, E.L., Nzina, N. A., 2007. The metamorphic evolution of the Paleoproterozoic high grade Banyo gneisses (Adamawa, Cameroon, Central Africa). *Journal of Cameroon Academic of Sciences* 7, 95–109.
- Nzenti, J.P., Abaga, B., Suh, C.E., Nzolang, C., 2011. Petrogenesis of peraluminous magmas from the Akum-Bamenda Massif, Pan-African Fold Belt, Cameroon. *International Geology Review* 53, 1121-1149.
- Nzina Nchare, A., Nzenti, J.P., Tanko Njiosseu, E. L., Ganno, S., Ngnotué, T., 2010. Synkinematic ferro-potassic magmatism from the Mekwene-Njimafofire Fouban Massif, along the Fouban-Banyo shear zone in central domain of Cameroon Pan-African fold belt. *Journal of Geology and Mining Research* 2, 142-158.
- Nzolang, C., Kagami, H., Nzenti, J. P., Holtz, F., 2003. Geochemistry and preliminary Sr-Nd isotopic data on the Neoproterozoic granitoids from the Bantoum area, West Cameroon: evidence for a derivation from a Paleoproterozoic to Archean crust. *Polar Geosciences* 16, 196-226.
- Nzolang, C., 2005. Crustal evolution of the Precambrian basement in west Cameroon: inference from geochemistry, Sr-Nd isotopes and experimental investigation of some granitoids and metamorphic rocks. PhD thesis Niigata University, Japan, 207p.
- O'Connor, J. T., 1965. A classification for quartz-rich igneous rocks based on feldspar ratios. In: *US Geological Survey Professional Paper B525*. USGS, 79–84.
- Olivry, J.C., 1986. Fleuves et rivières du Cameroun. *Collection monographies hydrologiques Mesres/Orstom*, N°9, Paris, Vol 1, 733 p.
- Omang, B.O., Suh, C.E., Lehmann, B., Vishiti, A., Chombong, N.N., Fon, A.N., Egbe, J.A., Shemang, E.M., 2015. Microchemical signature of alluvial gold from two contrasting terrains in Cameroon. *Journal of African Earth Sciences* 112, 1-14.
- Osei, B.A., Singh, B., 1999. Electrophoretic mobility of some tropical soil clays: effect of iron oxides and organic matter. *Geoderma* 93, 325–334.

- Owona, S., Schulz, B., Ratsbacher, L., Mvondo-Ondoa, J., Ekodeck, G.E., Tchoua, F., Affaton, P., 2011a. Pan-African metamorphic evolution in the southern Yaounde Group (Oubanguide Complex, Cameroon) as revealed by EMP-monazite dating and thermobarometry of garnet metapelites. *Journal of African Earth Sciences* 59, 125-139.
- Owona, S., Mvondo Ondoa, J., Ratsbacher, L., Ndzana, M.P.S., Tchoua, F.M., Ekodeck, G.E., 2011b. La géométrie de la tectonique archéenne, Paléo et néoprotérozoïque dans le Sud-Ouest du Cameroun. *Comptes Rendus Geoscience* 343: 312-322.
- Ozer, A., Marion, J.M., Roland, C., Tréfois, P., 1988. Signification des linéaments sur une image S.P.O.T. dans la région liégeoise. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, 97, (2), 153-172.
- Parfenoff, A., Pmerol, C., Tourenq, J., 1970. Les minéraux en grains, méthodes d'étude et détermination. *Édition MASSON, Paris*, 578P.
- Parsons, A.J., Yearley, R.J., 1986. An analysis of geologic lineaments seen on LANDSAT MSS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 7, (12), 1773-1782.
- Patiño Douce, A.E., Harris, N., 1998. Experimental constraints on Himalayan anatexis. *Journal of Petrology* 39, 689-710.
- Patiño Douce, A.E., 2005. Vapor-absent melting of tonalite at 15–32 kbar. *Journal of Petrology* 46, 275–290.
- Pearce, J.A., Harris, N.B.W., Tindle, A.G., 1984. Trace element discrimination diagrams for the tectonic interpretation of granitic rocks. *Journal of Petrology* 25, 956–983.
- Peccerillo, A. & Taylor, S. R., 1976. Geochemistry of Eocene calc-alkaline volcanic rocks from the Kastamonu area, Northern Turkey. *Contributions to Mineralogy and Petrology* 58, 63-81.
- Penaye, J., 1988. Pétrologie et structure des ensembles métamorphiques au Sud-Est de Poli (Nord-Cameroun). Rôles respectifs du socle protérozoïque inférieur et de l'accrétion crustale pan-africaine. *Thèse Doctorat de l'INPL*, 196p.
- Penaye, J., Toteu, S.F., Michard, A., Van Schmus, W.R., Nzenti, J. P., 1993. U-Pb and Sm-Nd preliminary geochronologic data on the Yaoundé serie, Cameroon: reinterpretation of granulitic rock as the suture of the collision in the « Centrafricain » belt. *Compte Rendu Académie des Sciences* 317, 789-794.
- Pepogo Man-mvele, A.D., Ndougsa-Mbarga, T., Meying, A., Ngoh, J.D., Mvondo-Ondoa, J., Ngoumou, P.C., 2018. New Geological and Structural Facts under the Lateritic Cover in Garga Sarali, Ndokayo (East Cameroon) Area, from Audiomagnetotellurics Soundings. *International Journal of Geophysics*. <https://doi.org/10.1155/2018/4806357>
- Poidevin, J.L., 1983. La tectonique panafricaine à la bordure nord du craton congolais. *Annales Musée Royal d'Afrique Centrale, Tervuren, Belgique, Série in-8, Sciences Géologiques* 91, 75p.
- Pohl, C., Van Genderen, J. L., 1998. 'Review article: Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *International Journal of Remote Sensing* 19, 823-854.
- Polidori, L., 2006. Introduction à la télédétection spatiale. Manuel de cours. *École Supérieure des Géomètres Topographes, France*, 60 p
- Poucllet, A., Tchameni, R., Mezger, K. Vidal, M., Nsifa, E,N., Shang, C,K., Penaye, J., 2007. Archaean crustal accretion at the northern border of the Congo craton (South Cameroon), The charnockite-TTG link. *Bulletin of the Geological Society of France* 178, 331–342.
- Pour, B.A., Hashim, M., 2011. Identification of hydrothermal alteration minerals for exploring of porphyry copper deposit using ASTER data, SE Iran. *Journal of Asian Earth Sciences* 42, 1309-1323.
- Pour, B.A., Hashim, M, and van Genderen. J., 2013. Detection of hydrothermal alteration zones in a tropical region using satellite remote sensing data: Bau gold field, Sarawak, Malaysia. *Ore Geology Reviews* 54, 181-196.
- Pour, B.A., Hashim, M., aMarghany, M., 2014. Exploration of gold mineralization in a tropical region using Earth Observing-1 (EO1) and JERS-1 SAR data: a case study from Bau gold field, Sarawak, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences* 7(6), 2393-2406.
- Pour, B.A., Hashim, M., 2015a. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science* 9, 155-166.

- Pour, A.B., Hashim, M., Park, Y., Hong, J.K. 2018a. Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data. *Geocarto International*, 32, 1281-1306.
- Pour, A.B., Park, Y., Park, T.S., Hong, J.K., Hashim, M., Woo, J., Ayoobi, I., 2018b. Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions. *Geocarto International*, doi.org/10.1080/10106049.2018.1434684
- Pour, A.B., Park, Y., Park, T.S., Hong, J.K., Hashim, M., Woo, J., Ayoobi, I., 2018c. Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica. *Polar Science* 16, 23-46.
- Provost, A., Allegre, J.C., 1979. Process identification and search for optional differentiation parameters from element data. General presentation with emphasis on the fractional crystallization process. *Geochimica Cosmochimica Acta* 43, 497-501.
- Ramsay, J.G., Huber, M.I., 1987. Modern structural geology. Folds and Fractures, volume 2. *Academic Press, London*, 475-541.
- Regnault, J.M., 1986. Synthèse géologique du Cameroun. *Ministère des Mines et de l'Énergie*, 119 p.
- Research Systems, Inc. 2008. ENVI Tutorials. *Research Systems, Inc., Boulder, CO*.
- Rollinson, H.R., 1993. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, and Interpretation. *Longman, England*, 343pp.
- Rollinson, H., 1996. Using Geochemical Data: Evaluation, Presentation, Interpretation. *Longman Ltd., Essex, England*, 352 pp.
- Rossoni-Notter, Elena. Notter, Olivier. Simon, Patrick. (2017) Mousterian in Balzi Rossi (Ventimiglia, Liguria, Italy): New insights and old collections. *Quaternary International*, 435. DOI: [10.1016/j.quaint.2015.12.059](https://doi.org/10.1016/j.quaint.2015.12.059)
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.A., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sensing of Environment* 145, 154-172.
- Saha Fouotsa, A.N., Tchameni, R., Nomo Negue, E., Daouda. D., Penaye, J., Fosso Tchunte, P.M., 2018. Polyphase deformation in the Mbé-Sassa-Bersi area: Implications on the tectono-magmatic history of the area and the tectonic evolution of the Tcholliré-Banyo and Central Cameroon Shear Zones (Central North Cameroon). *Journal of Geosciences and Geomatics* 6, 41-54.
- Salisbury, J.W., Walter, L.S., 1989. Thermal infrared (2.5–13.5  $\mu\text{m}$ ) spectroscopic remote sensing of igneous rock types on particulate planetary surfaces. *Journal of Geophysical Research* 94 (B7), 9192–9202.
- Savané I., 1997. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, *Université d'Abidjan- Côte d'Ivoire*, 386 p.
- Schowengerdt, R.A., 2007. Remote sensing: models and methods for image processing, 3rd edn. *Academic Press, Elsevier, Burlington, MA*, 193–202 and 229-243.
- Segalen .P., 1967. Les sols et la géomorphologie du Cameroun. *Cahiers ORSTOM.Série Pédologie* 2, 137-187.
- Shand, S. J., 1943. Eruptive Rocks. Their Genesis, Composition, Classification, and Their Relation to Ore-Deposits with a Chapter on Meteorite. *New York: John Wiley & Sons*.
- Shang, C.K., Satirb, M., Siebel, W., Taubald, H., Nsifa, E.N., Westphal, M., Reitter, E., 2001. Genesis of K-rich granitoids in the Sangmelima region, Ntem complex (Congo craton) Cameroon. *Terra Nostra* 5, 60–63.
- Shang, C.K., Satir, M., Nsifa, E.N., Liegeois, J.P., Siebel, W., Taubald, H., 2007. Archaean high-K granitoids produced by remelting of the earlier Tonalite–Trondhjemite–Granodiorite (TTG) in the Sangmelima region of the Ntem complex of the Congo craton, southern Cameroon. *International Journal of Earth Sciences* 96, 817–84.
- Shang C, K., Liégeois J, P., Satir, M., Frisch, W., Nsifa. E. N., 2010. Late Archaean high-K granite geochronology of the northern metacratonic margin of the Archaean Congo craton, Southern Cameroon: Evidence for Pb-loss due to non-metamorphic causes. *International Association for Gondwana Research* 475, 19p.

- Sheikhrhimi, A., Pour, B.A., Pradhan, B., Zoheir, B., 2019. Mapping hydrothermal alteration zones and lineaments associated with orogenic gold mineralization using ASTER remote sensing data: a case study from the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Advances in Space Research* 63, 3315-3332.
- Sherman, D.M., Waite, T.D., 1985. Electronic spectra of Fe<sup>3+</sup> oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. *American Mineralogist* 70, 1262-1269.
- Shimizu S., 2012. Joint estimation of linear non-Gaussian acyclic models. *Neurocomputing* 81, 104-107.
- Simpson, C., De Paor, D. G., 1993. Strain and kinematic analysis in general shear zones. *Journal of Structural Geology* 15, 1-20.
- Smith, H. S. et Erlank, A. J. 1982. Geochemistry and petrogenesis of komatiites from the Barberton greenstone belt, South Africa. Dans Komatiites. Edité par N. T. Arndt et E. G. Nisbet. London, 347-398.
- Soba, D., 1989. La série de Lom: Etude Géologique et Géochronologique d'un bassin volcano-sédimentaire de la Chaîne Panafricaine à l'Est du Cameroun. Thèse Doctorat D'Etat, *Université de Paris VI*, 198p.
- Soh Tamehe, L., Chongtao, Wei., Ganno, S., Simon, S.J., Kouankap Nono, G.D., Nzenti, J. P., Lemdjou, Y.B., Lin, N.H., 2019. Geology of the Gouap iron deposit, Congo craton, southern Cameroon: Implications for iron ore exploration. *Ore Geology Reviews* 107, 1097-1128.
- Spicer, E.M., Stevens, G., Buick, I.S., 2004. The low-pressure partial-melting behaviour of natural boron-bearing metapelites from the Mt. Stafford area, central Australia. *Contributions to Mineralogy and Petrology*. 148, 160-179.
- Strahler, A.N., 1957. Quantitative analysis of watershed geomorphology, Transactions, *American Geophysical Union* 38, 913-920.
- Suchel, J.B., 1987. Les climats du Cameroun. Thèse Doctorat d'Etat de Géographie, *Université St Etienne*, 1188 p.
- Suh, C.E., Lehmann, B., Mafany, G.T., 2006. Geology and geochemical aspects of lode gold mineralization at Dimako- Mboscorro SE Cameroon. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 6, 295-309.
- Takodjou Wambo J.D., 2015. Etude pétro-structurale et potentialités aurifères du secteur Ngoura-Colomines (Nord-Ouest de Batouri). *Mémoire Master, Université Yaoundé I*, 95P.
- Takodjou Wambo, J.D., Ganno, S., Afahnwie, N.A., Nomo, N.E., Mvondo, O.J., Nzenti, J.P., 2016. Use of Landsat 7 ETM+ data for the geological structure interpretation: case study of the Ngoura Colomines area, Eastern Cameroon. *Journal of Geoscience and Geomatics* 4, 61-72.
- Takodjou Wambo, J. D., Ganno, S., Djonthu Lahe, Y.S., Kouankap Nono, G.D., Fossi, D.H., Tchouatcha, M.S., Nzenti, J.P., 2018. Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: Implications for the exploration of primary gold deposit. *Journal of African Earth Sciences* 142, 138-157.
- Takodjou Wambo, J. D., Pour, A.B., Ganno, S., Asimow, P.D., Zoheir, B., dos Reis Salles, R., Nzenti, J.P., Pradhan, B., Muslim, A.M. 2020. Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: a case study of the Ngoura-Colomines goldfield, Eastern Cameroon. *Ore Geology Reviews* 122, 103530.
- Tagne-Kamga, G., 2003. Petrogenesis of neoproterozoic Ngondo plutonic complex (Cameroon West central Africa): a case of late collisional ferro-potassic magmatism. *Journal of African Earth Sciences* 36, 149-171.
- Tagne-Kamga, G., Mercier, E., Rossy, M., Nsifa, N.E., 1999. Synkinematic emplacement of the Pan-African Ngondo igneous complex (west Cameroon, central Africa). *Journal of African Earth Sciences* 28, 675-691.
- Tanko Njiosseu, E. L., Nzenti, J.P., Njanko, T., Kapajika, B., Nedelec, A., 2005. New U-Pb Zircon ages from Tonga (Cameroon): Coexisting Eburnean Transamazonian (2.1 Ga) and Pan-African (0,6 Ga) imprints. *Compte Rendu Géosciences* 337, 551-562.
- Tata, E., Suh, C.E., Vishiti, A., Shemang, E.M., Fon, A.N., Ateh, K.I., Chombong, N.N., 2018. Wallrock alteration categories and their geochemical signatures in gold-bearing Neoproterozoic granitoids, Batouri gold district, southeastern Cameroon. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, <https://doi.org/10.1144/geea2016-017>.
- Taylor, S.R., McLennan, S.M., 1995. The geochemical evolution of the continental crust. *Reviews of Geophysics* 33 (2), 241-265.

- Tchakounté, J., Eglinger, A., Toteu, S.F., Zeh, A., Nkoumbou, C., Mvondo-Ondoa, J., Penaye, J., de Wit, M., Barbey, P., 2017. The Adamawa–Yade domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic Central African Orogenic belt (Bafia area, Cameroon). *Precambrian Research* 299, 210–229.
- Tchakounté, J., Eglinger, A., Toteu, S.F., Zeh, A., Nkoumbou, C., Mvondo-Ondoa, J., Penaye, J., de Wit, M., Barbey, P., 2018. Reply to comment by M. Bouyo on “The Adamawa–Yade domain, a piece of Archaean crust in the Neoproterozoic Central African Orogenic belt (Bafia area, Cameroon)“, by Jacqueline Tchakounté et al., *Precambrian Research* 299 (2017) 210–229. *Precambrian Research* 305, 514-515.
- Tchameni, R., 1997. Géochimie et géochronologie des formations de l’Archéen et du Protérozoïque du sud-Cameroun (groupe du Ntem, Craton du Congo). *Thèse Université d’Oléans*, 35p.
- Tchameni, R., Nsifa, N. E., 1998. Revue des données géochronologiques sur la partie Nord-Ouest du Craton du Congo (groupe du Ntem) Sud-Cameroun. In *Géosciences au Cameroun*, Vicat T. P. et Bilong P., Editors, *Collection GEOCAM, 1/1998, Press; Université de Yaoundé I*, 339- 350.
- Tchameni R., Mezger K., NKonguin Nsifa, E., Pouclet A., 2001. Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo Craton (Ntem Complex), South Cameroon. *Lithos*, Volume 57, 23 – 42.
- Tchameni, R., Pouclet, A., Penaye, J., Ganwa, A.A., Toteu, S.F., 2006. Petrography and geochemistry of the Ngaoundéré Pan-African granitoids in Central Nord Cameroon: implication for their sources and geological setting. *Journal of African Earth Sciences* 44, 511-529 pp.
- Tchaptchet Tchato, D., Schulz, B., Nzenti, J. P., 2009. Electron microprobe (EMP) monazite dating and P – T data of the Neoproterozoic metamorphic and mylonitic events in the Kekem area, Cameroon North Equatorial Fold belt. *Neues Jahrbuch für Mineralogie – Abhandlungen* 186/1, 95-109.
- Tchouankoue, J.P., Li, X.-H., Belnoun, R.N.N., Mouafo, L., Ferreira, V.P., 2016. Timing and tectonic implications of the Pan-African Bangangte syenomonzonite, West Cameroon: Constraints from in-situ zircon U-Pb age and Hf-O isotopes. *Journal of African Earth Sciences*, 124, 94-103.
- Tetsopgang, S., Suzuki, K., Njonfang, E., 2008. Petrology and CHIME geochronology of Pan-African high K and Sr/Y granitoids in the Nkambé area, Cameroon. *Gondwana Research* 14, 686–699.
- Tommasi, A., Vauchez, A., Fernandes, L. A. D., Porcher, C. C., 1994. Magma-assisted strain localization in an orogen-parallel transcurrent shear zone of Southern Brazil. *Tectonics* 13, 421-437.
- Thompson, R.N., Morrison, M.A., Hendry, G.L., Parry, S.J., 1984. An assessment of the relative role of crust and mantle in magma genesis: An elemental approach. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A310*, 549-590.
- Thompson, J.F.H., Sillitoe, R.H., Baker, T., Lang, J.R., Mortensen, J.K., 1999. Intrusion related gold deposits associated with tungsten-tin provinces. *Mineral. Deposita* 34, 323–334.
- Toteu, S. F., Michard, A., Bertrand, J. M., Rocci, G., 1987. U/Pb of Precambrian rock from North-Cameroon, Orogenic evolution and chronology of the Pan-African belt of central African. *Precambrian Research* 37, 71-87.
- Toteu, S. F., Bertrand, J. M., Penaye, J., Macaudière, J., Angoua, S. and Barbey, P., 1991. Cameroon: a tectonic keystone in the pan-african network. In Lewry, J.F. and Stauffer, M. R. eds, the Early proterozoic Trans-Hudson orogen of North America. *Geological Association of Canada, Special Paper 37*, 483-496.
- Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., Penaye, J., Nyobe, J. B., 1994. U-Pb and Sm-Nb evidence for Eburnian and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of Southern Cameroon. *Precambrian Research* 67, 321-347.
- Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., Penaye, J., Michard, A., 2001. New U-Pb and Sm-Nd data from North-Central Cameroon and its bearing on the pre-pan African history of Central Africa. *Precambrian Research* 108, 45-73.
- Toteu, S. F., Penaye, J., Djomani Poudjom, Y., 2004. Geodynamic evolution of the Pan-African belt in Central Africa with special reference to Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences* 41, 73 –85.
- Toteu, S.F., Penaye, J., Deloule, E., Van Schmus, W.R., Tchameni, R., 2006. Diachronous evolution of volcano-sedimentary basins north of the Congo craton: insights from U e Pb ion microprobe dating of zircons from the Poli, Lom and Yaound\_e Series (Cameroun). *Journal of African Earth Sciences* 44, 428-442.
- Tsaléfac M., 2007. Climate. In *Atlas of Cameroon* (eds. N. Houstin and C. Seignobos). *Les Éditions Jeune Afrique, Paris*. pp. 62-63.

- Trompette, R., 1994. Geology of western Gondwana (2000-500Ma). Pan-African-Brasiliano aggregation of South America and Africa. *A. A. Balkema edition, Rotterdam, 350p.*
- Trompette, R., 1997. Neoprotozoic (600 Ma) aggregation of: western Gondwana a tentative Scenario. *Precambrian Research 82, 101-112.*
- Townley, B.K., Héral, G., Maksaev, V., Palacios, C., de Parseval, P., Sepulveda, F., Orellana, R., Rivas, P., Ulloa, C., 2003. Gold grain morphology and composition as an exploration tool: application to gold exploration in covered areas. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis 3, 29-38.*
- Van Schmus, W. R., Toteu, S. F., 1992. Were the Congo Craton and Sao Francisco craton paired during the fusion of Gondwana land? *Eostrans Agu. Spring Meeting, 73, 365p.*
- Van Schmus, W. R., Oliveira, E. P., da Silva Filho, A. F., Toteu, S. F., Penaye, J., Guimarães, I.P., 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. *Geological Society of London, special Publications 294, 69-99.*
- Velosky, J.C., Stern, R.J., Johnson, P.R., 2003. Geological control of massive sulfide mineralization in the Neoproterozoic Wadi Bidah shear zone, southwestern Saudi Arabia, inferences from orbital remote sensing and field studies. *Precambrian Research 123 (2-4), 235-247.*
- Vicente, L.E., Filho, C.R.S., 2011. Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote Sensing Environment 115, 1824-1836.*
- Vishiti, A., 2009. Primary and eluvial gold in the Batouri North Gold District, southeastern Cameroon. Unpublished M.Sc. thesis, *University of Buea, 75 p.*
- Vishiti, A., Suh, C.E., Lehmann, B., Egbe, J.A., Shemang, E.M., 2015. Gold grade variation and particle microchemistry in exploration pits of the Batouri gold district, SE Cameroon. *Journal of African Earth Sciences 111, 1-13.*
- Watkins, J.M., Clemens, J.D., Treloar, P.J., 2007. Archaean TTGs as sources of younger granitic magmas: melting of sodic metatonalites at 0.6-1.2 GPa. *Contributions to Mineralogy and Petrology 154, 91-110.*
- Yajima, T., Yamaguchi, Y., 2013. Geological mapping of the Francistown area in northeastern Botswana by surface temperature and spectral emissivity information derived from Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) thermal infrared data. *Ore Geology Reviews, 134, 134-144.*
- Yamaguchi Y.I., Fujisada, H., Kudoh, M., Kawakami, T., Tsu, H., Kahle, A.B., Pniel, M., 1999. ASTER instrument characterization and operation scenario. *Advanced Space Research, 23, 1415-1424.*
- Yamaguchi Y.I., Fujisada, H., Kahle, A.B., Tsu, H., Kato, M., Watanabe, H., Sato, I., Kudoh, M., 2001. ASTER instrument performance, operation status, and application to Earth sciences. *IEEE Transactions of Geosciences and Remote Sensing, p. 1215-1216.*
- Yang, X.M., Lentz, D.R., Chi, G., Thorne, K.G., 2008. Geochemical characteristics of gold-related granitoids in southwestern New Brunswick, Canada. *Lithos 104, 355-377.*
- Yao, K.T., 2011. Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits en milieu de socle. *Revue de télédétection 161-178p*
- Yao, T., Fouché-Grobla, O., Oga, M.S., Assoma, V., 2012. Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits, en milieu de socle précambrien métamorphisé. *Teledetection 10, 161-178.*
- Yesou, H., Saint-Jean, R., Pion, J.C., Besnus, R., 1993. Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo). In J.M.M. Dubois et F. Blasco (eds). Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. Série *Actualité Scientifique, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy, 492 p.*
- Zoheir, B.A., Mehanna, A.M., Qaoud, N.N., 2008. Geochemistry and geothermobarometry of the Um Eleiga Neoproterozoic island arc intrusive complex, SE Egypt: genesis of a potential gold-hosting intrusion. *Applied Earth Sciences 117 (3), 89-111.*
- Zoheir, B., Emam, A., El-Amawy, M., Abu-Alam, T., 2018. Auriferous shear zones in the central Allaqi-Heiani belt: Orogenic gold in post-accretionary structures, SE Egypt. *Journal of African Earth Sciences 146, 118-131.*

# **ANNEXES**

- Tableau
- Articles publiés

## Annexe I : Données de terrain collectées dans la région de Ngoura-Colomines

Code des puits	Coordonnées		Epaisseur de gravier minéralisé (m)	Epaisseur de stérile (m)	Teneur en or (g/m <sup>3</sup> )
	Y	X			
COL-1	N04°58'47"	E014°22'10"	0,3	2,1	2,3
COL-2	N04°59'49"	E014°21'55"	0,6	3,3	2,6
COL-3	N04°59'48"	E014°21'55"	0,4	3,6	3,7
COL-4	N04°58'42"	E014°22'09"	0,7	3,2	4,2
COL-5	N05°06'52"	E014°16'27"	0,4	3,7	3,4
COL-6	N05°34'39"	E014°05'17"	0,3	3,9	3,1
COL-7	N04°58'39"	E014°22'56"	0,6	3,3	2,1
COL-8	N04°58'32"	E014°22'47"	0,7	3,4	2,2
COL-9	N04°58'55"	E014°22'37"	0,9	3,6	2
COL-10	N04°58'37"	E014°22'20"	0,3	4	2,6
COL-11	N04°58'17"	E014°22'13"	0,4	3,6	1,8
COL-12	N04°58'19"	E014°21'51"	0,3	3,3	2,9
COL-13	N04°58'02"	E014°21'44"	0,7	4,1	2,4
COL-14	N04°57'57"	E014°21'32"	0,3	4,3	3,2
COL-15	N04°59'22"	E014°23'26"	0,6	4,2	1,9
COL-16	N04°58'42"	E014°23'36"	0,4	4,3	2,3
COL-17	N04°58'27"	E014°24'08"	0,9	4,6	2,8
COL-18	N04°59'05"	E014°22'46"	0,8	4,1	1,8
COL-19	N04°57'39"	E014°21'46"	0,6	4,3	1,3
COL-20	N04°57'20"	E014°22'16"	0,7	4,6	1,2
COL-21	N04°57'20"	E014°22'35"	0,4	3,7	2,7
COL-22	N04°57'53"	E014°23'06"	0,8	3,3	2,9
BOUT-1	N04°59'54"	E014°22'11"	0,6	3,1	3,2
MAD-1	N05°00'01"	E014°24'22"	0,7	3	3,1
MAD-2	N04°59'41"	E014°24'14"	0,8	3	4
MAD-3	N04°59'55"	E014°24'47"	0,4	3,9	3,2
MAD-4	N05°00'02"	E014°23'44"	0,9	3	2,9
MAD-5	N05°00'26"	E014°23'10"	0,3	3,9	2,4
MAD-6	N05°00'26"	E014°24'05"	0,6	3,4	1,9
MAD-7	N05°01'4"	E014°24'26"	0,7	3,1	2,6
MAD-8	N05°01'14"	E014°24'53"	0,4	3,2	3,7
TASS-1	N05°02'22"	E014°21'03"	0,3	3,9	4,6
TASS-2	N05°01'38"	E014°20'11"	0,7	3	3,8
TASS-3	N05°01'25"	E014°20'32"	0,8	3,1	1,1
TASS-4	N05°01'46"	E014°20'54"	0,6	3,3	1,7
TASS-5	N05°02'57"	E014°21'23"	0,9	3,2	3,8
TASS-6	N05°02'49"	E014°20'07"	0,7	4,1	3,9
TASS-7	N05°03'05"	E014°21'56"	0,6	4,3	4,1
TASS-8	N05°02'27"	E014°22'44"	0,6	4,6	3,2
TASS-9	N05°01'45"	E014°22'53"	0,4	4,7	2,2

NGOU-1	N04°52'34"	E014°14'48"	0,3	4,4	2,9
NGOU-2	N04°52'46"	E014°15'29"	0,7	4,6	1,1
NGOU-3	N04°53'29"	E014°15'41"	0,8	3,9	1,3
NGOU-4	N04°53'38"	E014°15'29"	0,9	3,6	1,4
NGOU-5	N04°53'39"	E014°15'10"	0,4	3,4	0,8
NGOU-6	N04°53'05"	E014°15'43"	0,3	3,3	0,1
NGOU-7	N04°52'36"	E014°14'06"	0,9	3,9	0,6
NGOU-8	N04°53'38"	E014°14'50"	0,3	3,4	0,5
PT de LIA	N04°50'54"	E014°13'59"	0,8	3	0,9
KAD-1	N04°53'26"	E014°19'10"	0,8	3	0,9
KAD-2	N04°54'22"	E014°19'51"	0,3	4,2	4,6
KAD-3	N04°54'43"	E014°19'51"	0,4	4,7	2,2
KAD-4	N04°57'04"	E014°20'21"	0,7	4,3	2,7
KAD-5	N04°57'51"	E014°21'28"	0,6	4	2,1
KAD-6	N04°57'52"	E014°22'50"	0,8	4,3	2,8
KAD-7	N04°57'24"	E014°24'24"	0,9	3,8	0,9
OU-1	N04°54'26"	E014°08'56"	0,3	3,6	0,3
OU-2	N04°56'11"	E014°09'02"	0,9	3,3	1,7
OU-3	N04°56'13"	E014°11'02"	0,6	3,4	0,2
OU-4	N04°58'07"	E014°12'17"	0,7	3,7	0,6
OU-5	N04°59'39"	E014°10'45"	0,6	3,3	0,1
OU-6	N04°59'51"	E014°12'44"	0,8	3,8	0,8
OU-7	N04°59'09"	E014°13'46"	0,6	3,9	4,6
OU-8	N05°00'14"	E014°15'58"	0,7	3,4	1,7
OU-9	N05°01'05"	E014°10'42"	0,8	3,3	3,1
OU-10	N05°02'27"	E014°15'36"	0,4	3,6	1,8
OU-11	N04°59'42"	E014°11'55"	0,5	3,2	1,9
OU-12	N04°58'50"	E014°15'36"	0,7	3,1	3,6
OU-13	N05°00'50"	E014°13'46"	0,9	3,2	2,4
KAD-8	N04°50'39"	E014°17'50"	0,7	3,4	1,1
KAD-9	N04°54'17"	E014°22'14"	0,4	3,6	1,7
OU-14	N04°55'10"	E014°14'26"	0,7	3,3	2

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/303936882>

# Use of Landsat 7 ETM+ data for the geological structure interpretation: Case study of the Ngoura–Colomines area, Eastern Cameroon

Article · June 2016

DOI: 10.12691/jgg-4-3-3

CITATIONS

3

READS

685

6 authors, including:



**Takodjou Wambo Jonas didero**

University of Yaounde I

8 PUBLICATIONS 4 CITATIONS

SEE PROFILE



**Ganno Sylvestre**

University of Yaounde I

27 PUBLICATIONS 75 CITATIONS

SEE PROFILE



**Afahnwie Ngambu Aloysius**

THE UNIVERSITY OF BAMENDA

6 PUBLICATIONS 3 CITATIONS

SEE PROFILE



**Nzenti Jean Paul**

University of Yaounde I

44 PUBLICATIONS 704 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Genesis of banded iron formations hosted iron ore in the Ntem Complex (Congo craton), southern Cameroon: constraints from geochemistry, stable isotope compositions and fluid inclusions. [View project](#)



Cameroon Panafrican Basement [View project](#)

# Use of Landsat 7 ETM<sup>+</sup> Data for the Geological Structure Interpretation: Case Study of the Ngoura-Colomines Area, Eastern Cameroon

Jonas Didero TAKODJOU WAMBO<sup>1</sup>, Sylvestre GANNO<sup>1,\*</sup>, Aloysius AFAHNWIE NGAMBU<sup>2</sup>, Emmanuel NOMO NEGUE<sup>1</sup>, Joseph MVONDO ONDOA<sup>1</sup>, Jean Paul NZENTI<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Department of Earth Sciences, University of Yaoundé I, P. O. Box 812 Yaounde, Cameroon

<sup>2</sup>Department of Geology, University of Buea, P. O. Box 63 Buea, Cameroon

\*Corresponding author: [sganno@uy1.uninet.cm](mailto:sganno@uy1.uninet.cm)

**Abstract** Remote sensing and Geographical Information System (GIS) technology have opened a new era in the field of applied geology. In this study, combined field and remote sensing applications through the processing of the Landsat-7 Enhance Thematic Mapper Plus (ETM<sup>+</sup>) were used to monitor to geologic structures in Ngoura-Colomines area. This mapping approach led to the detection of 654 lineaments in which two main types have been distinguished. The type-I (15%) shows two main directions (NE-SW and NW-SE) and corresponds to large-scale or regional structures while type-II (85%) with dominant NE-SW-trends represents foliation trajectories. In addition, type-I lineaments are compatible with the Riedel fault system composed of P and P' fractures oriented NE-SW and NNE-SSW respectively; E-W trending R fractures and R' fractures with NW-SE trends. Our findings provide the evidence of a polyphase ductile-brittle structures such as shear zone and faults. These structures constitute pathway for both mineralizing fluids and ground water circulation. Since several gold artisanal mines exist in Ngoura-Colomines area, the proposed mapping approach is an important guide for the identification of the structures that control the gold mineralisation in the area.

**Keywords:** Landsat ETM<sup>+</sup> images, Lineaments, Riedel fault system, Ngoura-colomines

**Cite This Article:** Takodjou Wambo, J.D., Ganno, S., Afahnwie, N.A., Nomo, N.E., Mvondo, O.J., and Nzenti, J.P., "Use of Landsat 7 ETM<sup>+</sup> Data for the Geological Structure Interpretation: Case Study of the Ngoura-Colomines Area, Eastern Cameroon." *Journal of Geosciences and Geomatics*, vol. 4, no. 3 (2016): 61-72. doi: 10.12691/jgg-4-3-3.

## 1. Introduction

Remote Sensing and Geographical Information System technology play a major role in thematic map generation and integrated analysis for mapping, managing and monitoring the natural resources. A remote sensing observation from space provides a synoptic view of terrain, thus provide ability in detecting lithology, land form and lineaments on the imagery. Since more than two decades, satellite imagery has been used for the identification and mapping of geologic structures which appear in geomorphology [1,2]. Lineaments are the linear, rectilinear and curvilinear features of tectonic origin observed on satellite image. These lineaments normally show tonal, textural, soil tonal, relief, drainage and vegetation linearity's and curvilinearities on satellite data. The identification of these structures and specifically of linear structures or lineaments can be successfully done by visual interpretation of aerial photographs, but nowadays, with the development of SIG technology, the automatic processing of satellite images such as SRTM and Landsat ETM images is highly recommended because of the high resolution of such data and the quantity of the information that they can provided. Many authors (eg., [3,4] and

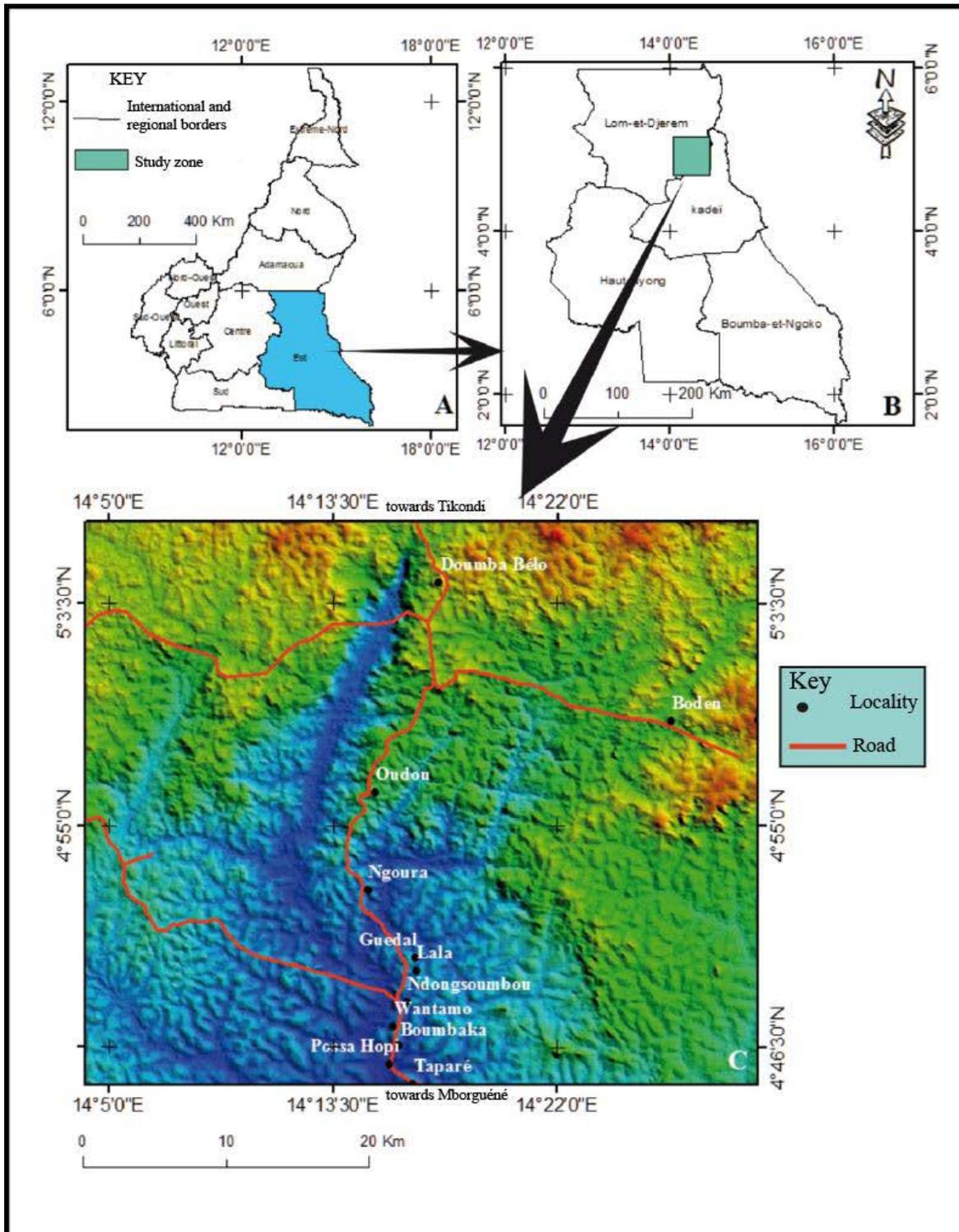
references therein) have suggested that the combination of SIG techniques and field mapping is the more efficiency tools for geological map in rainforest areas. In a remote sensing study, interpretation of the lineament constitutes the essential key for geological and structural mapping [5]. Once the framework of lineaments has been set-up, the interpretation and validation of these structures are based on their comparison with field data. This exercise is complex in humid tropical region due to the important vegetation cover and the thick terrigenous materials recovery, which lead to the scarcity of outcrops [6,7], or of the discontinuity of outcrops when they exist [3]. The principle of the analysis of lineaments is that the principal collectors of the drainage systems as well as the resulting reliefs are dependent on the surrounding structures and thus carry a mark of the surrounding tectonics [7,8,9]. In the satellite images, all the linear features do not automatically correspond to geologic structures. For example, roads, railway and electrical lines as well as other human infrastructures are seen as lineaments. The challenge of the study of lineaments detection is to discriminate these objects and giving their geologic significance. Akame et al. [10] have suggested that the extraction of lineaments without applying directional filters does not bring out all the lineament networks, but it

remains an important step in the pre-analysis of structural mapping.

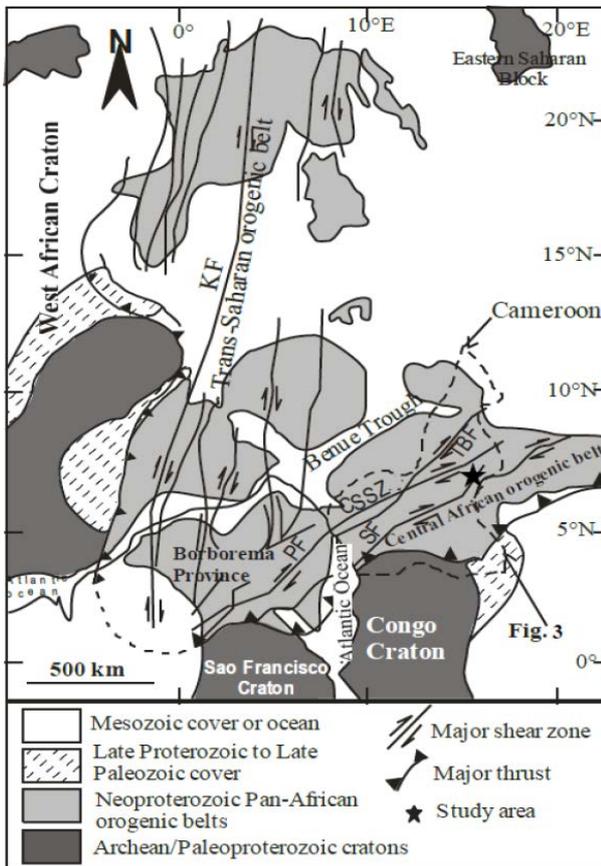
In characterizing the tectonic framework of the Ngoura-Colomines area, the present study also improves the knowledge on the geologic structures of the Pan African basement of the eastern Cameroon. Major and minor lineaments were interpreted from the satellite data and validated with the field studies. The approach used as well as the obtained data constitute an important guide for the mineral exploration in the area, since many artisanal gold mines exist in the Ngoura-Colomines.

## 2. Geologic Setting

Ngoura-Colomines area is located to the eastern Cameroon and extends between latitudes  $4^{\circ} 50' 02''$  and  $5^{\circ} 03' 33''$  N and longitudes  $14^{\circ} 08' 23''$  and  $14^{\circ} 25' 02''$ E (Figure 1). The geomorphology of the area falls within the so called ‘Southern Cameroonian plateau’, characterized by elevations that range between 550 and 850 m. The general topography of the area consists of small hills generally resulting from erosion which, in most cases, ends in valleys (Figure 1).



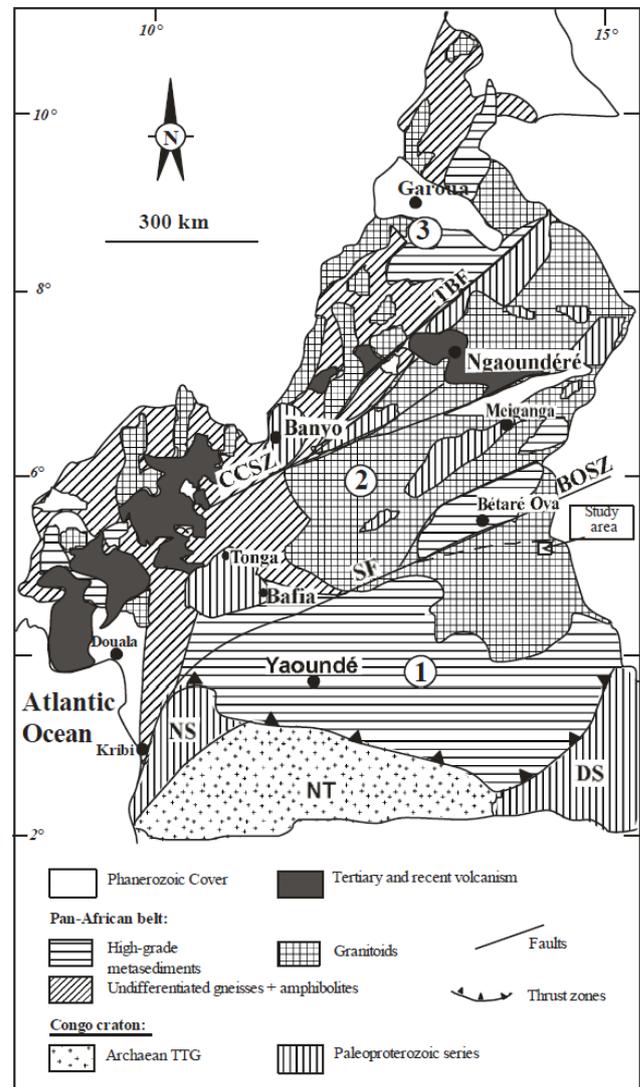
**Figure 1.** Location of area of study: A) Administrative map of Cameroon; B) Administrative map of the eastern region of Cameroon; C) Digital elevation model of the study area



**Figure 2.** Pre-drift reconstruction of Pan-African and Brasiliano terranes (modified from [19]): CCSZ: Central Cameroon Shear Zone; SF: Sanaga Fault; TF: Tibati Fault; PF: Patos Fault

The study area belongs to the North-Equatorial Fold Belt (NEFB) or Central African Orogen which is a major Neoproterozoic Orogen linked to the Trans-Saharan belt of western Africa and to the Brazilian Orogen of northeastern Brazil (Figure 2). In Cameroon, the Neoproterozoic realm [11-16] is subdivided into three geodynamic domains from south to north (Figure 3): (1) the southern domain, which corresponds to the northern edge of the Congo craton, comprises Neoproterozoic metasediments deposited in a passive margin environment and were metamorphosed under high P conditions at 616 Ma. An alkaline magmatism [17,18] was also recognized in association with these Neoproterozoic units; (2) the northern domain consists of subordinate 830 Ma-old metavolcanic rocks of tholeiitic and alkaline affinities associated with metasediments known as the Poli series. Widespread 630-660 Ma-old calc-alkaline granitoids, presently orthogneissified, result from a major episode of crustal accretion; (3) the central domain, which contains the present study area, is positioned between the Sanaga fault and the Betare-Oya shear zone (BOSZ) to the south and the Tibati-Banyo fault to the north. These large NE-striking transcurrent faults, as well as the Adamaoua fault inside the central domain, are regarded as possible prolongations of the major shear zones of NE Brazil in a pre-drift Gondwana reconstruction [19-26]. The central domain consists of Archean to Paleoproterozoic high-grade gneisses intruded by widespread Neoproterozoic syntectonic plutonic rocks of high-K calc-alkaline affinities [11,12,16,27,28,29,30]. The hosting basement rocks were intensively reworked during a polyphase Pan-African  $D_1$ - $D_2$  deformation associated with amphibolite

facies metamorphism. Ngoura-Colomines area is located in eastern part of the central domain. Previous geological investigations [31] have recognized of orthogneiss and migmatite intruded by granitoids. These granitoids include syn- to post-tectonic granite and granodiorite [32] (Figure 4).



**Figure 3.** Geologic map of Cameroon [12] showing the location of the Ngoura-Colomines area and the main lithotectonic domains: (1) southern domain; (2) central domain; (3) northern domain; BOSZ: Bétaré-Oya Shear Zone; SF: Sanaga Fault; TBF: Tibati-Banyo Fault; NT: Ntem complex; DS: Dja Series; NS: Nyong Series

### 3. Material and Methods

#### 3.1. Types of Used Data

Various types of datum were used in this study. These data included: (i) Landsat-7 ETM+ images (Path 184 and Row 057) of December 24, 2003 (beginning of the dry season) and corresponding to Zone 33 of the map projection, Universal Transverse Mercator (UTM) which uses the geodetic reference system WGS 84; (ii) the SRTM satellite image covering the area of study; (iii) the geologic map of Batouri East at the 1/500 000 [31], and (iv) the topographic map of scale 1/200 000 covering the explored area. The choice of these images was based on their spectral characteristics and spatial resolution. The

main characteristics of the Landsat satellite images used in this study are presented in Table 1. The analysis of the

different resulting maps was made using ArcGIS 10, Erdas Imagine 2014, and Geomatica 2012 software

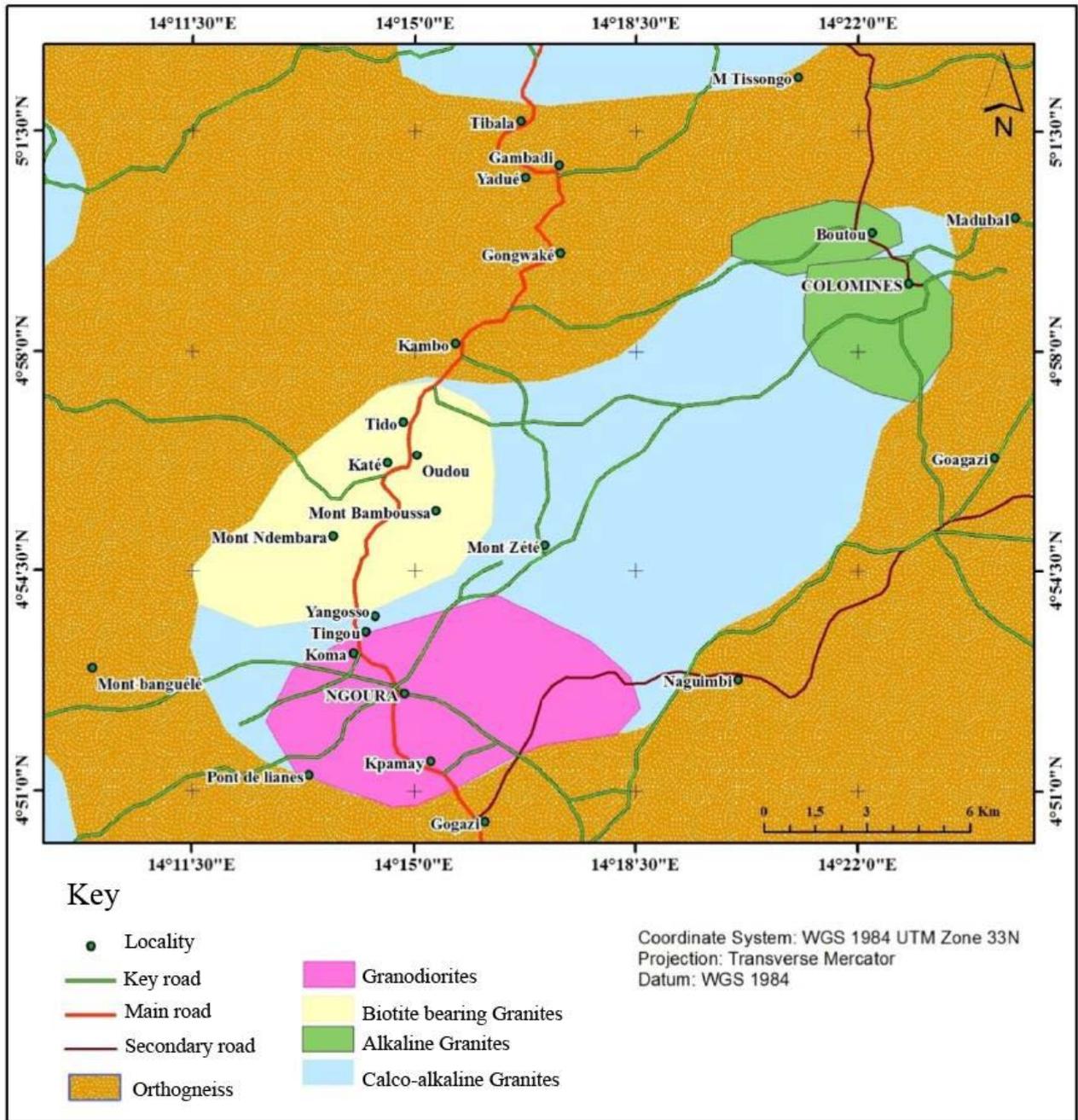


Figure 4. Geologic map of the studied area (modified from [31])

Table 1. Characteristics of the Landsat 7 ETM+ bands used in this study

Frequency bands of the ETM+ instrument	Spectral bands	Spatial resolution	Wavelength
Band 1	Blue (visible)	30 m	0.45 - 0.5 μm
Band 2	Green (visible)	30 m	0.52 - 0.6 μm
Band 3	Red (visible)	30 m	0.63 - 0.69 μm
Band 4	Near IR	30 m	0.75 - 0.9 μm
Band 5	Medium IR	30 m	1.5 - 1.7 μm
Band 6/1	Thermal IR / distant	60 m	10.4 - 12.5 μm
Band 6/2		120 m	
Band 7	Medium IR	30 m	2.08 - 2.35 μm
Band 8	Panchromatic (Green-Red-IR)	15 m	520 - 900 nm

### 3.2. Treatment Methods of Satellite Images

There are a wide variety of techniques for the improvement of the satellite images. The choice of a particular technology depends on its application, the available data, the experience and preferences of the image analyst. Different types of treatments were carried out. The aim of the image processing was to obtain a particular spectral signature for the lithology and to make the lineament easily detectable. This approach requires a pre-treatment which assumes a good knowledge of the sensor and of the conditions of acquisition. It is not subject to a particular thematic application and allows the development of an image from a raw signal and the improvement of the said image. The pre-treatment operations consisted in this case in radiometric and geometric corrections, so as to remedy error images and the different distortions caused by the movement of the platform, generally caused by atmospheric disturbances.

#### 3.2.1. Improvement or Enhancement of the Contrast

An enhancement operator aims to replace the central pixel by the sum of the differences with its neighbors. Images thus corrected have been processed with the aim of increasing their visual perception (improvement of quality to make them more expressive) which leads to a better visualization of discontinuities. To do this, four main techniques were used: (i) the Principal Component

Analysis (PCA); (ii) coloured composition; (iii) the combination of bands and, (iv) spatial filtering.

#### -The Principal Component Analysis (PCA)

The principal component analysis (PCA) is part of the group of multidimensional descriptive methods called Factorial methods. To compress the redundant data of multi-band images and find a combination of the most discriminatory colorful composition, PCA proposes from a rectangular array of data containing values of  $p$ , quantitative variable for  $n$  units (also called individuals), geometric representations of these units and these variables [33]. The raw ETM+ band are strongly correlated as shown in Table 2. The correlation matrix reflects the strong redundancy of the information contained in the Landsat-7 ETM+ images. It is therefore correct to carry out a principal component analysis in order to overcome the redundancy and to improve the contrast of the image. This technique also reduces the number of bands to be treated by compressing the information according to a hierarchy. Six ETM+ channels (1, 2, 3, 4, 5 and 7) with the same resolution (30 m) were retained for the PCA techniques. The result of the two first components (the neo-channels ACP1 and ACP2) represents respectively 70.6 and 13.2 % of the information contained in the original multi-spectral image with nine bands. The obtained transformed images contain the maximum information and were thus combined through a colorful composition.

Table 2. Correlation matrix of raw Landsat ETM+ bands

	ETM1	ETM2	ETM3	ETM4	ETM5	ETM7
ETM1	1.000000	0.738563	0.733769	0.005681	0.484322	0.639578
ETM2	0.738563	1.000000	0.839243	0.304762	0.724692	0.757614
ETM3	0.733769	0.839243	1.000000	0.072603	0.758965	0.890240
ETM4	0.005681	0.304762	0.072603	1.000000	0.549949	0.168209
ETM5	0.484322	0.724692	0.758965	0.549949	1.000000	0.874637
ETM7	0.639578	0.757614	0.890240	0.168209	0.874637	1.000000

#### - Colored composition

This technique consists in transforming the gray level pictures into colored three bands images by assigning one of the primary colors: red (R), green (G) and blue (B). In order to optimize the visual analysis and to adapt the variations of tones to the human visual system, the colorful compositions were applied to the ETM+ Landsat-7 image from the near infrared (NIR) and medium infrared (MIR1 and MIR2) bands respectively (Figure 5). In fact, each of these bands integrates additional information that could reveal the structure of the soil. This property allows the clearly discrimination between geologic features and the vegetation, thus facilitating the visual distinction of the lineament.

#### - Combination of bands

The combination of bands is an arithmetic operation (addition, subtraction, and division) applied on the bands. According to Kouame [34], TM7-TM4/TM7+TM4 band reports allows the visualization of the lineaments related to the hydrographic network, while TM6-TM7/TM6+TM7 bands helped to highlight the regional lineaments, e.g, the large-scale structures and the large fracture zones of the bedrock [35]. These fractures would either be faulted

zones or shear zones. This second report, which implies the use of the spectral band of the thermal/distant IR, has been possible only after the re-sampling of the TM6 band according to the same spatial resolution as the other bands. The application of the technique of bands combination is an asset for the structural mapping of the Ngoura-Colomines are due to the fact that the hydrographic network is dependent to the tectonics [32].

#### - Spatial filtering

The technique of spatial filtering of the image consists of the recalculation of the value of each pixel by analyzing the surrounding radiometry. The aim of this method is the increasing of the image's contrast. A linear filter convolutes the radiometry of the image by convolution windows (small square matrix centered on the current pixel) whose coefficients determine the effect of the filtering [36]. In this study the convolution is applied on an image  $I(x, y)$  with a function  $f(x, y)$  called impulse response (or convolution operator) of the filter. In a general case, the filtered image is given by:

$$I_f(x, y) = (f \times I)(x, y) \\ = \int_{-\infty}^{+\infty} \int_{-\infty}^{+\infty} f(x', y') I(x - x', y - y') dx' dy'$$

In a specific case and to take the simplified example of a square image, the areas of  $I$  and  $f$  have end points. The domain of  $I$  is  $[-N/2, +N/2]^2$  if  $N$  refers to the size of the image and the domain of  $f$  is  $[-K/2, +K/2]^2$  with  $K \leq N$  necessarily. The convolution is then written:

$$I_f(x, y) = (f \times I)(x, y) = \sum_{i'=-k/2}^{i'+k/2} \sum_{j'=-k/2}^{j'+k/2} f(i-i', j-j')I(i', j')$$

We can notice that the linear filtering simply consists in replacing each gray level by a linear combination of the gray levels of the neighboring points. The filters used here are the directional filters which are applied in four (4) main directions: N-S, E-W, NE-SW, SE-NW. Table 3 gives an example of convolution matrixes for the directional filters of Sobel used in this study. Sobel's algorithm is an operator used in image processing for the detection of contours.

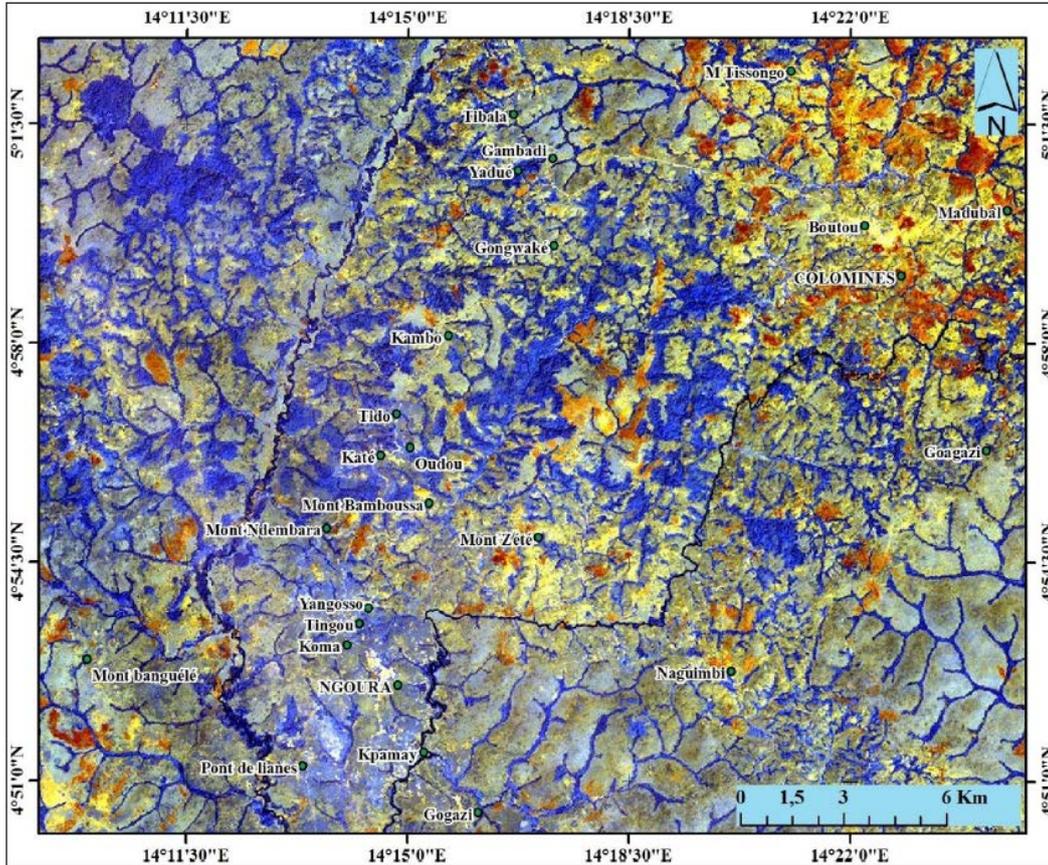


Figure 5. RGB 754 coloured composition image of the area of study area

Table 3. Convolution matrixes of the Sobel 7 x 7 filter and the gradient of Yésou et al. [37]

<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-3</td><td>-4</td><td>-3</td><td>-2</td><td>-1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-2</td><td>-3</td><td>-2</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-2</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> </table> <p>Sobel N-S</p>	1	1	1	2	1	1	1	1	1	2	3	2	1	1	1	2	3	4	3	2	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	<table border="1"> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-2</td><td>0</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-3</td><td>0</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-2</td><td>-3</td><td>-4</td><td>0</td><td>4</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-3</td><td>0</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-2</td><td>0</td><td>2</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> </table> <p>Sobel E-W</p>	-1	-1	-1	0	1	1	1	-1	-1	-2	0	2	1	1	-1	-2	-3	0	3	2	1	-2	-3	-4	0	4	3	2	-1	-2	-3	0	3	2	1	-1	-1	-2	0	2	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1	<table border="1"> <tr><td>0</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>-1</td><td>0</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>3</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-2</td><td>0</td><td>3</td><td>4</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-3</td><td>0</td><td>3</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-2</td><td>-4</td><td>-3</td><td>0</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-3</td><td>-2</td><td>-2</td><td>-2</td><td>0</td><td>1</td></tr> <tr><td>-2</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>0</td></tr> </table> <p>Sobel NE-SW</p>	0	1	1	1	1	1	2	-1	0	2	2	2	3	1	-1	-2	0	3	4	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1	-1	-2	-4	-3	0	2	1	-1	-3	-2	-2	-2	0	1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	0
1	1	1	2	1	1	1																																																																																																																																															
1	1	2	3	2	1	1																																																																																																																																															
1	2	3	4	3	2	1																																																																																																																																															
0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																															
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1																																																																																																																																															
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1																																																																																																																																															
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1																																																																																																																																															
-1	-1	-1	0	1	1	1																																																																																																																																															
-1	-1	-2	0	2	1	1																																																																																																																																															
-1	-2	-3	0	3	2	1																																																																																																																																															
-2	-3	-4	0	4	3	2																																																																																																																																															
-1	-2	-3	0	3	2	1																																																																																																																																															
-1	-1	-2	0	2	1	1																																																																																																																																															
-1	-1	-1	0	1	1	1																																																																																																																																															
0	1	1	1	1	1	2																																																																																																																																															
-1	0	2	2	2	3	1																																																																																																																																															
-1	-2	0	3	4	2	1																																																																																																																																															
-1	-2	-3	0	3	2	1																																																																																																																																															
-1	-2	-4	-3	0	2	1																																																																																																																																															
-1	-3	-2	-2	-2	0	1																																																																																																																																															
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0																																																																																																																																															
<table border="1"> <tr><td>2</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>0</td></tr> <tr><td>1</td><td>3</td><td>2</td><td>2</td><td>2</td><td>0</td><td>-1</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>4</td><td>3</td><td>0</td><td>-2</td><td>-1</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>3</td><td>0</td><td>-3</td><td>-2</td><td>-1</td></tr> <tr><td>1</td><td>2</td><td>0</td><td>-3</td><td>-4</td><td>-2</td><td>-1</td></tr> <tr><td>1</td><td>0</td><td>-2</td><td>-2</td><td>-2</td><td>-3</td><td>-1</td></tr> <tr><td>0</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-2</td></tr> </table> <p>Sobel NW-SE</p>	2	1	1	1	1	1	0	1	3	2	2	2	0	-1	1	2	4	3	0	-2	-1	1	2	3	0	-3	-2	-1	1	2	0	-3	-4	-2	-1	1	0	-2	-2	-2	-3	-1	0	-1	-1	-1	-1	-1	-2	<table border="1"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td><td>0</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> <tr><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td><td>-1</td></tr> </table> <p>Yésou et al. (1993)[37]</p>	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1																																																		
2	1	1	1	1	1	0																																																																																																																																															
1	3	2	2	2	0	-1																																																																																																																																															
1	2	4	3	0	-2	-1																																																																																																																																															
1	2	3	0	-3	-2	-1																																																																																																																																															
1	2	0	-3	-4	-2	-1																																																																																																																																															
1	0	-2	-2	-2	-3	-1																																																																																																																																															
0	-1	-1	-1	-1	-1	-2																																																																																																																																															
1	1	1	1	1	1	1																																																																																																																																															
1	1	1	1	1	1	1																																																																																																																																															
1	1	1	1	1	1	1																																																																																																																																															
0	0	0	0	0	0	0																																																																																																																																															
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1																																																																																																																																															
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1																																																																																																																																															
-1	-1	-1	-1	-1	-1	-1																																																																																																																																															

In practice, the operator calculates the gradient of the intensity of each pixel. This indicates the direction of the greatest variation from light to dark, as well as the rate of change in this direction. We know then the points of

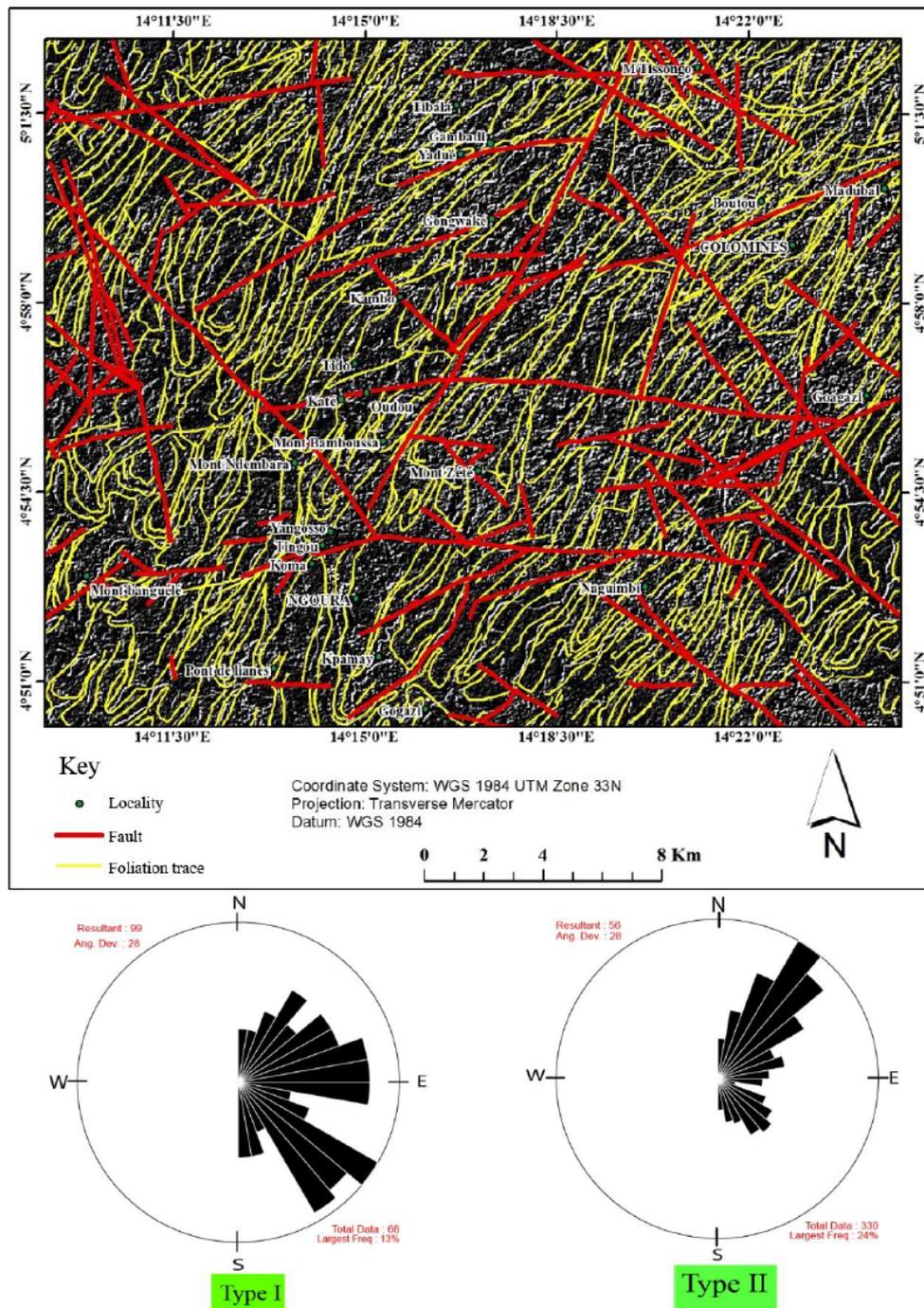
sudden change in brightness, corresponding probably to the edges, as well as the orientation of these edges. The operator uses convolution matrix. The matrix (in the present case of size  $7 \times 7$ ) undergoes a convolution with

the image to calculate approximations from horizontal and vertical derivatives. These filters with respect to sliding 7 x 7 windows have been applied to neo-PCA channels to accentuate the lithological and structural discontinuities, and facilitate the discrimination of the lineament. After the filtering of images following the mentioned directions, the next step was in the manual and automatic extraction of lineaments.

**3.2.2. Extraction of the Lineament by Photo-Interpretation**

Based on the available data and with the help of field observations, the automatic and manual extraction of lineaments has been undertaken in the framework of this study. Nevertheless, it has been capital to design a

geographic information system (GIS) database of the entire anthropic features (road network, electric cables, forest delimitation and cultivated areas, etc.) listed in the explored area. The superimposition of these features on the final rendering allows us to eliminate all unwanted features because only lineaments of tectonic origin are the scope of this study. Manual extraction consisted in digitalizing of all linear structures observed on the transformed, enhanced and filtered satellite image. The automatic extraction of the second family of major lineaments was made using the satellite image processing software Geomatica 2012. The final structural map is obtained after the validation of the automatic extracted lineaments by comparison with those observed in the field.



**Figure 6.** Major tectonic accidents depicted by the Sobel filtering and the Yésou et al. [37] gradient applied to the PCA 1 image and associated directional rosette

## 4. Results and Discussion

### 4.1. Structural Mapping and characteristics of the Lineament Frame

After transformation, enhancement and filtering of the images, both automatic extraction and visual interpretation enabled us to highlight the tectonic lineaments and to notice their locally curved junctions. With the purpose of studying the geometry of the lineament network and identifying the dominant directions, a statistical analysis was carried out. This analysis identified 654 linear elements. These lineaments show rectilinear trajectories sporadically relayed by curves. Two main types of lineaments have been distinguished. The first type or type-I corresponds to large-scale or regional structures. It is characterized by a more accentuated tracing, a mapping continuity and a sparser spatial density and represents

about 15% of the frame while the second type (type-II) represents approximately 85% and is made up of curved portions. Figure 6 presents the results of the directional filtering on which type-I regional lineaments have been manually digitalized, while the lineaments with curved portions (type-II) were automatically generated. Also, type-I linear structures induce the offset of the type II lineaments at their contact and thus represent fractures in the study area. Type-II linear structures, due to their penetrative character, correspond to the foliation trace. This interpretation is confirmed by field data which have revealed foliation surfaces with NE-SW-trends. The rose diagrams associated to the two lineament types are also presented in the Figure 6. These directional diagrams show two main directions (NE-SW and NW-SE) for type-I lineaments and a dominant NE-SW-trends and secondary N-S and E-W-trends for foliation trace (type-II linear structures).

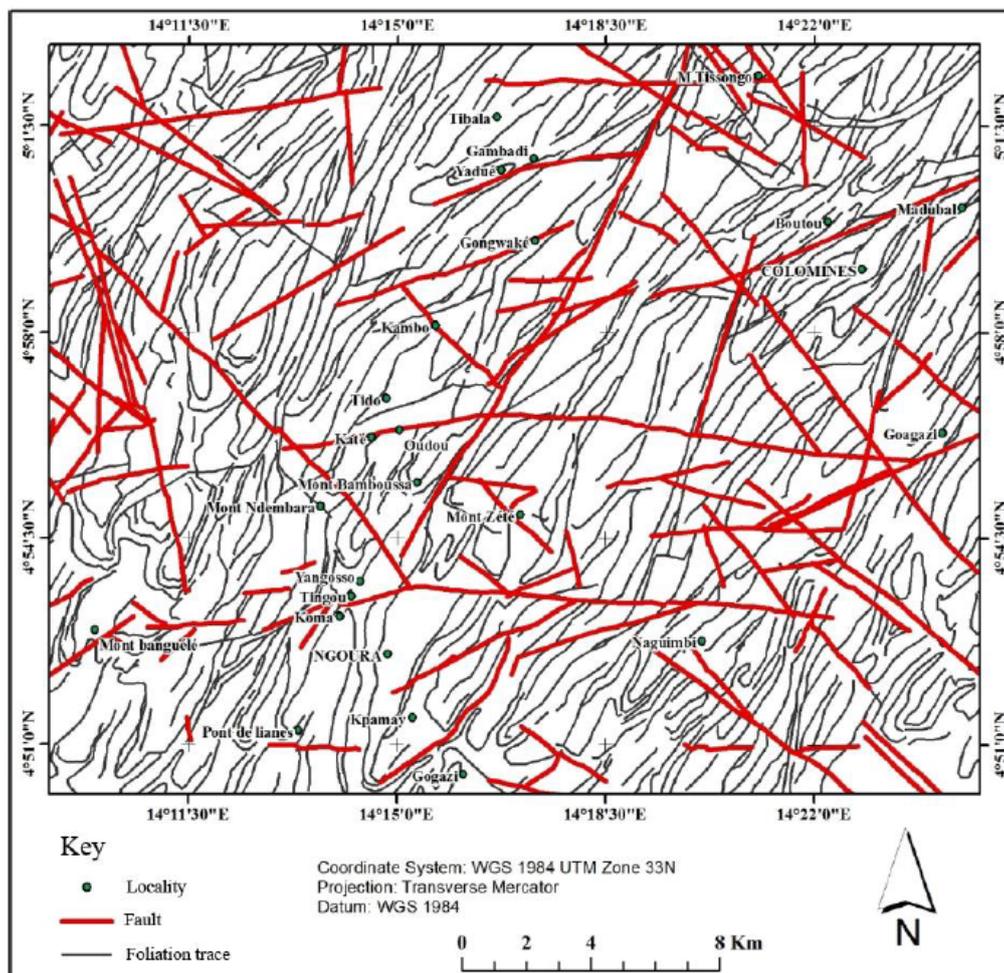


Figure 7. Structural map of the Ngoura-colomines area obtained from the analysis of Landsat 7 ETM+ images

Figure 7 presents the structural map of the study area obtained from the analysis of both satellite images and the topographic map. This map shows the general configuration of the principal strike-slip fault and associated satellite faults, and the predominant NE-SW direction of foliation trajectories in the study area. Figure 8 is the detailed geologic map of the Ngoura-Colomines area obtained from the combination of the structural map layer and the reconnaissance lithological map layer of Gazel and Gerard [31].

### 4.2. Tectonic Architecture and Evidence for the Riedel Fractures System

The structural map (Figure 7) has been superimposed to the hydrographic network in order to obtain the morphostructural map of the study area (Figure 9). On this map, it is important to notice that the foliation trajectories are shifted away by fractures. This is indicative of the lateness character of the fractures with respect to the tectonic episodes.

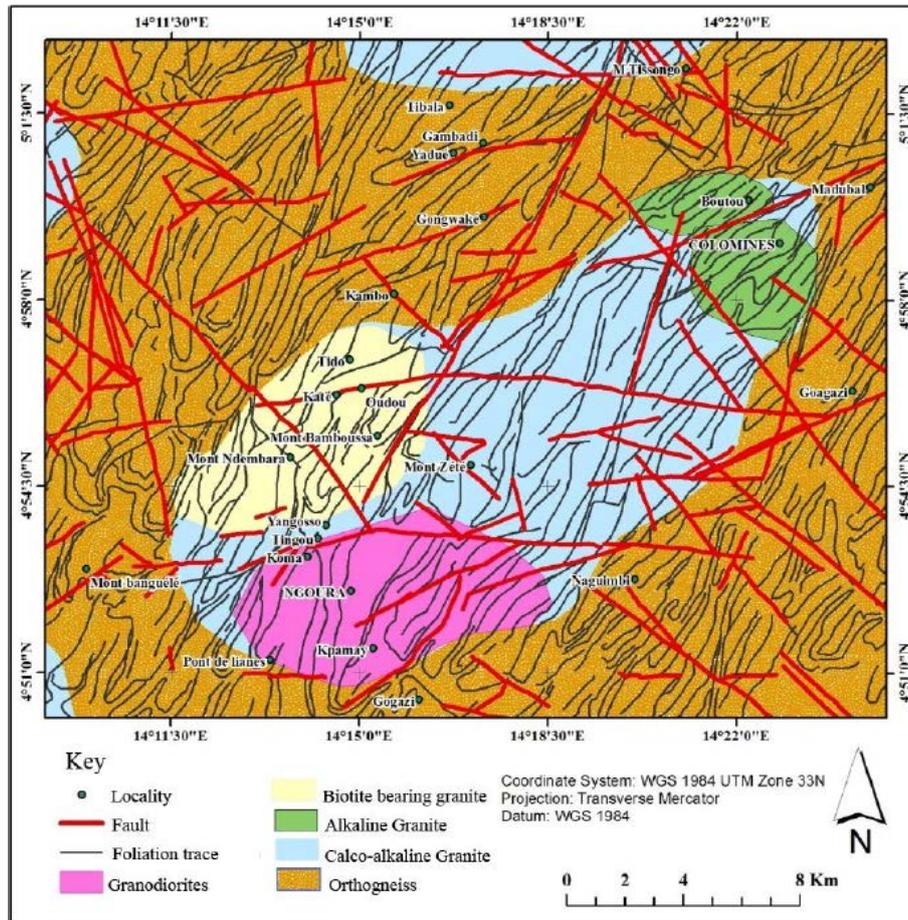


Figure 8. Geologic map of the Ngoura-Colomines area obtained from the combined field-based and remote sensing methods

In addition, five (05) major families of fractures have been distinguished: (i) the first one corresponds to a network of dextral shear planes with ENE-WSW direction; satellite faults of this network formed the Riedel fractures system composed of: (ii) P' fractures with NNE-SSW-

trend; (iii) R' fractures oriented NW-SE; (iv) R fractures trending E-W; and (v) P fractures with NE-SW direction. At the map scale, the foliation trajectories show a mega folding structure resulting from WNW-ESE to NW-SE shortening.

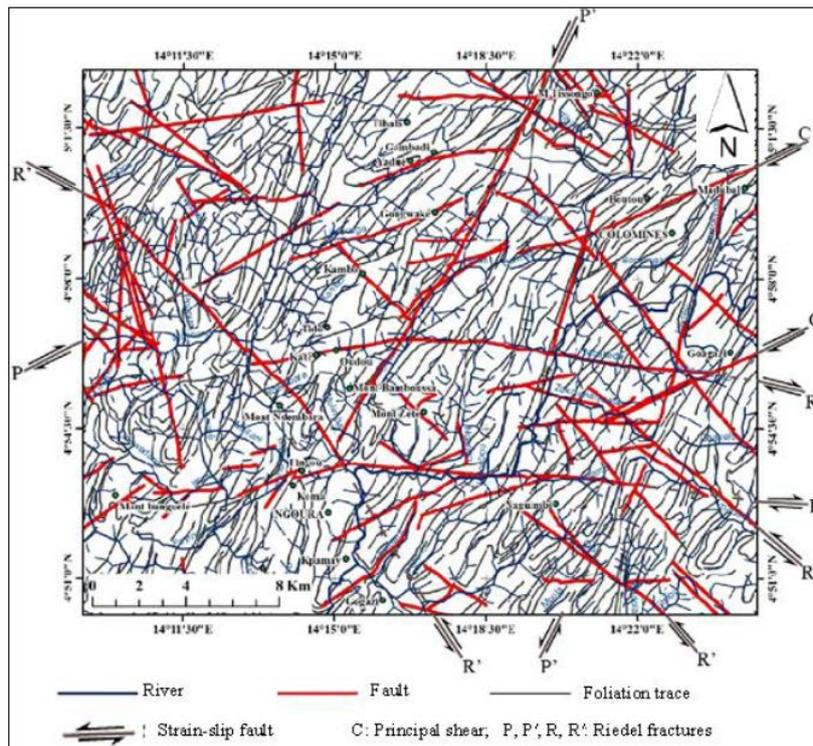


Figure 9. Morphostructural map of Ngoura-Colomines area showing the principal shear zone (C) and the Riedel faults system (P, P', R and R')

The distribution frequency of the tectonic lineaments is shown in Figure 10, where the lineaments are grouped in classes according to their length. At the regional scale, the main strike-slip faults identified in this study have the same direction with both the Sanaga fault [38] and the Bétaré-Oya fault [25], pointing to the prolongation of these regional structures in the Ngoura-Colomines area.

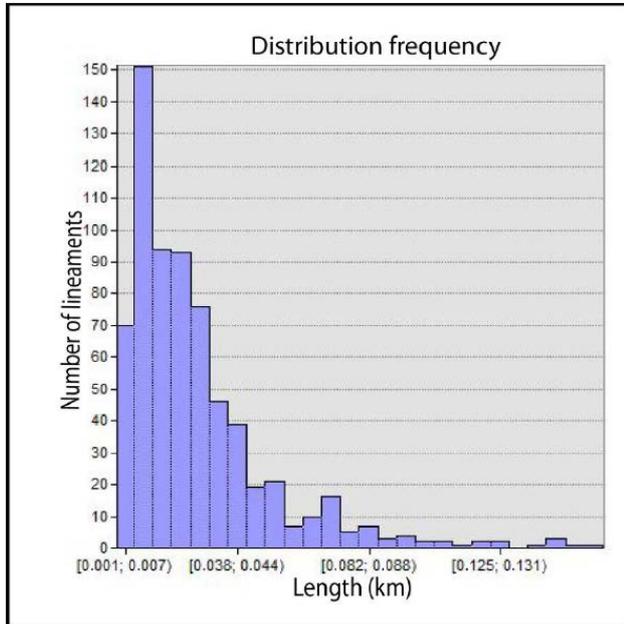


Figure 10. Histogram showing the distribution frequency of lineaments

### 4.3. Relationship between Field Data and Satellite Imagery Data

The Ngoura-Colomines area is composed mainly of syn- to post-tectonic granitoids. Field investigations have consisted of exploring the outcrops, identifying and measuring the geological structures. Geometric analysis of these structures has revealed three main deformational phases.

- The first phase ( $D_1$ ) is associated with the development of  $S_1$  mylonitic foliation and  $B_1$  boudins (Figure 11A).  $S_1$  foliation is outlined by composition banding (Figure 11B) and by the preferred orientation of minerals (Figure 11A), while the  $B_1$  boudins are developed on both the mafic and the quartzofeldspathic layers (Figure 11B), and can be attributed to multilayer boudins of Ghosh and Sengupta [39].

- The second deformation phase ( $D_2$ ) is marked by boudinated aplitic and pegmatite dykes crosscutting the  $S_m$  foliation, and the conjugated shear structures with sinistral shear movement (Figure 11C and Figure 11D).

- The last tectonic phase ( $D_3$ ) is mainly brittle and marked by fractures including dyke and faults, which affect the  $D_1$  and  $D_2$  structures (Figure 11E). Their directions vary from N045E to N115E, similar to Type-II lineament depicted from Landsat image processing.

Overall, the geological structures obtained from the image processing correspond to the ductile-brittle structures such as shear zone and faults. These structures constitute pathway for both mineralizing fluids and ground water.

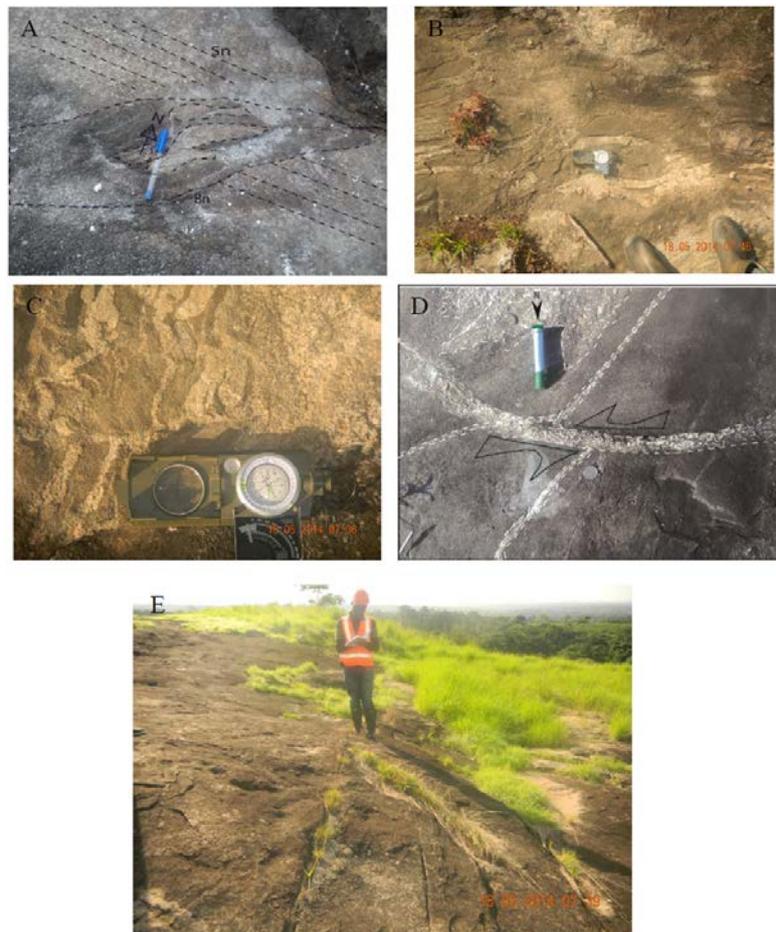


Figure 11. Structures identified during the field (a) Boudin of amphibolite encased in mylonitic foliation (b) Lithologic banding with intrafolial boudinage (c) Conjugated shearing, note the chocolate bar structure (d) Sinistral shearing structures (e) Brittle structures

## 5. Conclusion

The use of Landsat-7 ETM+ images in the Ngoura-Colomines area has allowed the development a new methodology for the mapping of major regional tectonic accidents. The obtained lithotectonic map of Ngoura-Colomines is the result of several treatments performed on the satellite images and validated with the field survey. The combination of field-based mapping and remote sensing methods are useful tool for the mapping of regional geological structures. The present study has shown that the satellite data is very useful in various aspects of geological, geomorphological and lineament mapping studies. The proposed method allows the detail lineament mapping in rainforest area and could be applied in other areas elsewhere. Since several gold artisanal mines exist in Ngoura-Colomines area, the new mapping approach could constituted an important guide for the identification of the structures that control the gold mineralisation in the area.

## Acknowledgements

The data presented here form a part of the first author's Ph.D thesis supervised by S. Ganno and J.P. Nzenti at the University of Yaoundé I, Cameroon. We gratefully acknowledge the anonymous reviewers for their critical and constructive comments of the manuscript. This is the contribution to ICGP-Y 646 project.

## References

- [1] Parsons, A.J., Yearley, R.J. An analysis of geologic lineaments seen on Landsat MSS imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 7(12), 1773-1782, 1986.
- [2] Ozer, A., Marion, J.M., Roland, C., Tréfois, P. Signification des linéaments sur une image S.P.O.T. dans la région liégeoise. *Bulletin de la Société Belge de Géologie*, 97(2), 153-172, 1988.
- [3] Metang, V., Nkoubou, C., Tchakounté, N.J., Njopwouo, D. Application of remote sensing for the mapping of geological structures in rainforest area: a case study at the Matomb-Makak area, Center-South Cameroon. *Journal of Geosciences and Geomatics*, 2(5), 196-207, 2014.
- [4] Koffi Y., T. Extraction de linéaments structuraux à partir d'images satellitaires, et estimation des biais induits en milieu de socle. *Revue de télédétection*, 161-178, 2011.
- [5] Scavic, J.Y. Utilisation de la télédétection dans les sciences de la terre. *Manuels et Méthodes, Éditions du BRGM, Orléans, France*, 159 p., 1983.
- [6] Faillat, J.P. Hétérogénéité et effet d'échelle dans les aquifères fissurés. Approches par pompages d'essais sur station expérimentale (Afrique de l'Ouest). *BRGM, Hydrogéologie*, 1, 65-76, 1986.
- [7] Biemi J. Contribution à l'étude géologique, hydrogéologique et par télédétection des bassins versants subsabéliens du socle précambrien d'Afrique de l'ouest: hydrostructurale, hydrodynamique, hydrochimie et isotopie des aquifères discontinus des sillons et aires granitiques de la haute Marahoué (Côte d'Ivoire). *Thèse de Doctorat d'état, Université Nationale de Côte d'Ivoire*, 479 p., 1992.
- [8] Horton, R. Erosional development of streams and their drainage basins: hydrological approach to quantitative morphology. *Bulletin Geological Society of America, New York*, 56, 275-370, 1945.
- [9] Bessoles, B. Géologie de l'Afrique: le craton Ouest-africain. *Mémoire BRGM, France*, 88, 403p., 1977.
- [10] Akame, J.M., Mvondo Ondo, J., Assatse, T.W., Owona, S., Olinga, J.B, Messi, O.E.J, Ntomba, S. Apport des images landsat-7 ETM+ à l'étude structurale du socle archéen de Sangmélima (Sud-Cameroun). *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection*, 206, 15-25, 2014.
- [11] Nzenti, J.P., Barbey, P., Bertrand, J.M., Macaudière, J. La Chaîne panafricaine au Cameroun: Cherchons suture et modèle. *15ème Réunion des Sciences de la Terre, Nancy, France, Société Géologique de France*, p. 99,1994.
- [12] Nzenti, J.P., Abaga, B., Suh, C.E., Nzolang, C. Petrogenesis of peraluminous magmas from the Akum-Bamenda Massif, Pan-African Fold Belt, Cameroon. *International Geology Review*, 53(10), 1121-1149, 2011.
- [13] Ngotue, T., Nzenti, J.P., Barbey, P., Tchoua, F.M. The Ntui-Bétamba high-grade gneisses: a northward extension of the pan-African Yaoundé gneisses in Cameroon: *Journal of African Earth Sciences*, 31, 369-381, 2000.
- [14] Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J.M., Njanko, T. Panafrican tectonic evolution in central and Southern Cameroon: transpression and transtension during sinistral shear movement. *Journal of African Earth Sciences*, 36, 207-214, 2003.
- [15] Mvondo, H., Owona, S., Mvondo, J., Essono, J. Tectonic evolution of the Yaoundé segment of the Neoproterozoic Central African Orogenic Belt in southern Cameroon. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 44, 433-444, 2007.
- [16] Tanko Njiosseu, E.L., Nzenti, J.P., Njanko, T., Kapajika, B., Nedelec, A. New U/Pb zircon âges from Tonga (Cameroon): Coexisting Eburnean-Transamazonian (2.1 Ga) and Pan-African (0.6 Ga) imprints. *Compte Rendu Géosciences*, 337, 551-562, 2005.
- [17] Nzenti, J.P. L'Adamaoua panafricain (région de Banyo) : une zone clé pour un modèle de la chaîne panafricaine nord-équatoriale au Cameroun. *Thèse Doctorat d'État, Université Cheikh Anta Diop - Université de Nancy I*, 176 p., 1998.
- [18] Ngotue, T., Ganno, S., Nzenti, J.P., Schulz, B., Tchaptchet, T.D., Suh, C.E. Geochemistry and geochronology of Peraluminous high-K granitic leucosomes of Yaoundé series (Cameroon): evidence for a unique Pan-African magmatism and melting event in north equatorial fold belt. *International Journal of Geosciences*, 3, 525-548, 2012.
- [19] Castaing, C., Triboulet, C., Feybesse, J.L., and Chèvremont, P. Tectonometamorphic Evolution of Ghana, Togo, Benin in the light of the Pan-African/Braziliano orogeny. *Tectonophysics*, 218, 323-347, 1994.
- [20] Trompette, R. Geology of western Gondwana (2000 - 500Ma). Pan-African-Braziliano aggregation of South America and Africa. *A.A. Balkema, Rotterdam, the Netherlands*, 350p., 1994.
- [21] Brito Neves, B.D., Van Schmus, W.R., Fetter, A. North-West Africa North-Eastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. *Journal of African Earth Sciences*, 34, 275-273, 2002.
- [22] Cordani, U.G., D'Agrella-Filho, M.S., Brito-Neves, B.B., Trindade, R.I.F. Tearing up Rodinia: the Neoproterozoic palaeogeography of South American cratonic fragments. *Terra Nova*, 15, 350 - 359, 2003.
- [23] Njonfang, E., Ngako, V., Moreau, C., Affaton, P., Diot, H. Restraining bands in high temperature shear zones: The "Central Cameroon Shear Zone", Central Africa. *Journal of African Earth Science*, 52, 9-20, 2008
- [24] Ganno, S., Nzenti, J.P., Ngotué, T., Kankeu, B., Kouankap Nono, G.D. Polyphase deformation and evidence for transpressive tectonics in the Kimbi area, Northwestern Cameroon Pan-African Fold Belt. *Journal of Geology and Mining Research*, 4 (2), 001-015, 2010.
- [25] Kankeu, B., Nzenti, J.P., Greiling, R.O., Ganno, S., Ngotué, T., Basahak, J. & Hell, J.V. Application de la technique de l'Anisotropie de la Susceptibilité Magnétique (ASM) à l'identification des structures géologiques: le cisaillement panafricain de Bétaré Oya dans le district aurifère de l'Est Cameroun. *Annales de la Faculté des Sciences, Série Sciences de la Terre*, 38 (1), 17-30, 2010.
- [26] Silva Filho, A.F.D., Guimarães, I.P., Van Schmus, W.R., Armstrong, R.A., Rangel da Silva, J.M., Osako, L.S., Cocentino, L.M. SHRIMP U-Pb zircon geochronology and Nd signatures of supracrustal sequences and orthogneisses constrain the Neoproterozoic evolution of the Pernambuco-Alagoas domain, southern part of Borborema Province, NE Brazil. *International Journal of Earth Sciences*, 103, 2155-2190, 2014.
- [27] Nzenti, J.P., Kapajika, B., Wörner, G., Lubala, R.T. Synkinematic emplacement of granitoids in a Pan-African shear zone in Central Cameroon. *Journal of African Earth Science*, 45, 74-86, 2006.

- [28] Nzolang, C., Kagami, H., Nzenti, J.P., Holtz, F. Geochemistry and preliminary Sr-Nd isotopic data on the Neoproterozoic granitoids from the Bantoun area, west Cameroon: evidence for a derivation from a paleoproterozoic to Archean crust. *Polar Geosciences*, 16, 196-226, 2003.
- [29] Djouka-Fonkwe, M.L., Schulz, B., Schüssler, U., Tchouankoué, J.P., Nzolang, C. Geochemistry of the Bafoussam Pan-African I- and S-type granitoids in western Cameroon. *Journal of African Earth Science*, 50, 148-167, 2008.
- [30] Ganwa, A.A., Wolfgang, F., Wolfgang, S., Cosmas, K.S., Mvondo Ondo, J., Muharrem, S., Tchakounté, J.N. Zircon 207Pb/206Pb evaporation as of panafrican metasedimentary in the Kombé II area (Bafia Group, Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 51, 77-88, 2008.
- [31] Gazel, J., Gerard, G. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500000, feuille de Batouri-Est avec notice explicative. *Mémoire Direction des Mines et de la Géologie, Yaoundé, Cameroun*, 43 p., 1954.
- [32] Takodjou Wambo, J.D. Étude pétro-structurale et potentialités aurifères du secteur Ngoura-Colomines (Nord-Est de Batouri). *Unpublished Master thesis, University of Yaoundé I*, 120 p., 2015.
- [33] Duby, C., Robin, S. Analyse en Composantes Principales. *Institut National Agronomique Paris – Grignon*, 54 p., 2006.
- [34] Kouame, F. Méthode de cartographie des discontinuités-images extraites d'images satellitales: exemple de la région semi-montagneuse à l'ouest de la Côte d'Ivoire. *Télétection*, 1, 139-156, 1999.
- [35] Savané, I. Contribution à l'étude géologique et hydrogéologique des aquifères discontinus du socle cristallin d'Odienné Nord-Ouest de la Côte d'Ivoire). Apports de la télédétection et d'un Système d'Information Hydrogéologique à Référence Spatiale. *Thèse de doctorat ès Sciences Naturelles, Université d'Abidjan-Côte d'Ivoire*, 386 p., 1997.
- [36] Polidori, L. Introduction à la télédétection spatiale. *Manuel de cours, École Supérieure des Géomètres Topographes, France*, 60 p., 2006.
- [37] Yesou, H., Saint-Jean, R., Pion, J.C., Besnus, R. Amélioration des données SPOT pour la cartographie structurale en milieu tropical. Exemple de la région des chapeaux de fer de Pagala (Togo). In J.M.M. Dubois et F. Blasco (eds). Outils micro-informatiques et télédétection de l'évolution des milieux. *Série Actualité Scientifique, Presses de l'Université du Québec/AUPELF, Sainte-Foy*, 492 p., 1993.
- [38] Dumont, J.F. Identification par télédétection de l'accident de la Sanaga (Cameroun). Sa position dans le contexte des grands accidents d'Afrique Centrale et de la limite nord du craton congolais. *Géodynamique*, 1, 13-19, 1986.
- [39] Ghosh, S.K., Sengupta, S. Progressive evolution of structures in a ductile shear zone. *Journal of Structural Geology*, 9, 277-288, 1987.

See discussions, stats, and author profiles for this publication at: <https://www.researchgate.net/publication/323753184>

# Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura–Colomines area, Eastern Cameroon: Implications for the exploration of primary gold dep...

Article · March 2018

DOI: 10.1016/j.jafrearsci.2018.03.015

CITATIONS

9

READS

1,347

7 authors, including:



**Takodjou Wambo Jonas didero**

University of Yaounde I

14 PUBLICATIONS 43 CITATIONS

SEE PROFILE



**Ganno Sylvestre**

University of Yaounde I

41 PUBLICATIONS 242 CITATIONS

SEE PROFILE



**Djibril Kouankap**

THE UNIVERSITY OF BAMENDA

30 PUBLICATIONS 132 CITATIONS

SEE PROFILE



**Donald Hermann Fossi**

University of Yaounde I

1 PUBLICATION 9 CITATIONS

SEE PROFILE

Some of the authors of this publication are also working on these related projects:



Komatiites in the 2.1Ga Nyong serie, NW border of Congo Craton in Cameroon. [View project](#)



Research [View project](#)



# Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: Implications for the exploration of primary gold deposit

Jonas Didero Takodjou Wambo<sup>a</sup>, Sylvestre Ganno<sup>a,\*</sup>, Yannick Sthopira Djonthu Lahe<sup>a,b</sup>, Gus Djibril Kouankap Nono<sup>c</sup>, Donald Hermann Fossi<sup>a</sup>, Milan Stafford Tchouatcha<sup>d</sup>, Jean Paul Nzenti<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Department of Earth Sciences, University of Yaoundé I, P.O. Box 812, Yaounde, Cameroon

<sup>b</sup> Institute for Geological and Mining Research, P.O.Box 333, Garoua, Cameroon

<sup>c</sup> Department of Geology, HTTC, University of Bamenda, P.O. Box: 39 Bambili, Bamenda, Cameroon

<sup>d</sup> Department of Earth Sciences, University of Dschang, P.O. Box 67, Dschang, Cameroon

## ARTICLE INFO

### Article history:

Received 25 July 2017

Received in revised form

31 January 2018

Accepted 13 March 2018

Available online 14 March 2018

### Keywords:

Geostatistic

Ordinary kriging

GIS

Alluvial gold

Mineral exploration

Ngoura-colomines

## ABSTRACT

Linear and nonlinear geostatistic is commonly used in ore grade estimation and seldom used in Geographical Information System (GIS) technology. In this study, we suggest an approach based on geostatistic linear ordinary kriging (OK) and Geographical Information System (GIS) techniques to investigate the spatial distribution of alluvial gold content, mineralized and gangue layers thicknesses from 73 pits at the Ngoura-Colomines area with the aim to determine controlling factors for the spatial distribution of mineralization and delineate the most prospective area for primary gold mineralization. Gold content varies between 0.1 and 4.6 g/m<sup>3</sup> and has been broadly grouped into three statistical classes. These classes have been spatially subdivided into nine zones using ordinary kriging model based on physical and topographical characteristics. Both mineralized and barren layer thicknesses show randomly spatial distribution, and there is no correlation between these parameters and the gold content. This approach has shown that the Ngoura-Colomines area is located in a large shear zone compatible with the Riedel fault system composed of P and P' fractures oriented NE-SW and NNE-SSW respectively; E-W trending R fractures and R' fractures with NW-SE trends that could have contributed significantly to the establishment of this gold mineralization. The combined OK model and GIS analysis have led to the delineation of Colomines, Tissongo, Madubal and Boutou villages as the most prospective areas for the exploration of primary gold deposit in the study area.

© 2018 Elsevier Ltd. All rights reserved.

## 1. Introduction

Detailed geo-information is one of the prerequisites for successful management of natural resources in many applied geoscience fields. In common studies, maps of spatial variables have primarily generated by using extrapolation methods. In general because of the high cost of data collection in field surveys, only a limited number of sampling sites are investigated, and based on the data collected and on statistical and/or mental models the conditions for the whole area of interest are inferred. Spatial variability

does not depend on a single factor but rather is usually the result of a number of complex inter-related processes working over a long period of time. Kriging also referred to as geo-statistical interpolation originated in the early 1950s as a means of improving ore reserve estimations. This idea was first proposed by the mining engineer D. G. Krige and the statistician H. S. Sichel and the technique was first published in Krige (1951), but it took almost a decade until a French mathematician G. Matheron derived the formulas and basically established the whole field of linear geostatistics (Cressie, 1990; Webster and Oliver, 2001; Zhou et al., 2007). A standard version of kriging is called Ordinary Kriging (OK). It is the most desirable method from a statistical observation view point. It can be used both for interpolation and two dimensions spatial extrapolation.

\* Corresponding author.

E-mail addresses: [sganno@uy1.uninet.cm](mailto:sganno@uy1.uninet.cm), [sganno2000@yahoo.fr](mailto:sganno2000@yahoo.fr) (S. Ganno).

Mineral deposits occurring in a group are a general geological phenomenon and can be observed in many metallogenic provinces in the world (e.g., Lisitsin, 2015; Blenkinsop, 2014; Agterberg, 2013; Carranza, 2009; Mamuse et al., 2009; Zuo et al., 2009; Raines, 2008; Blenkinsop and Sanderson, 1999; Cheng and Agterberg, 1995; Agterberg et al., 1993; Carlson, 1991). The clustered spatial relationship of deposits can be quantified by using spatial analysis in support by a geographic information system (GIS), such as the second-order property of a point pattern, which can help unravel the geological processes that were crucial in the formation of the particular type of mineral deposits (Lisitsin, 2015; Gumiel et al., 2010). Systematic spatial data analysis can facilitate the identification of the properties of mineral deposits within a metallogenic province (Lisitsin, 2015; Carlson, 1991; Agterberg, 1975, 1984). Exploring the spatial distribution of mineral deposits and the relationship between mineral deposits and the controlling geological factors by using spatial analysis with the aid of GIS appears to be an appropriate investigation approach that can provide invaluable information to the geologist or explorationist. The analysis of spatial point patterns has a long history in geology, and there are a number of tests available to characterize and explore such data (Perry, 2004). These tests can provide important insights into the spatial distribution of mineral deposits.

In this study, mining data (thickness of the mineralized and barren layers, gold grade) were collected from seventy-three alluvial exploitation pits in Ngoura-Colomines area. Spatial point pattern statistics, kriging and GIS analyses were applied to investigate the spatial distribution of gold mineralization with the aim to (1) explore the drainage pattern, rock lithology and fault systems as the main controlling factors on the spatial distribution of the mineralization and (2) to identify the most prospective area for the exploration of primary gold deposit in the area.

## 2. Geologic setting

Ngoura-Colomines area belongs to the North-Equatorial Fold Belt (NEFB) or Central African Orogen which is a major Neoproterozoic orogen linked to the Trans-Saharan belt of western Africa and to the Brazilian Orogen of northeastern Brazil (Fig. 1). It is located in eastern Cameroon and extends between latitudes 4°50'02" and 5°03'33" N and longitudes 14°08'23" and 14°25'02"E. The geomorphology of the area falls within the so called 'Southern Cameroonian plateau', characterized by elevations that range between 550 m and 850 m. Previous geological investigations have recognized orthogneiss and migmatite intruded by granitoids. These granitoids include syn-to post-tectonic granite and granodiorite (Takodjou Wambo et al., 2016). Gold deposit in Cameroon are restricted to the east region of the country and confined to the NE-SW trending shear zones (Suh et al., 2006). Three main gold districts were recognized (Fig. 2). (1) *Bétaré-Oya district* contains gold in quartz veins striking N030°E-N40°E dipping gently toward the north (35°). The veins occur in brecciated and locally silicified metavolcanic and metasedimentary rocks, which were intruded by post-tectonic mafic and felsic magmas of unknown age. The host rocks are biotite schists, sericite and chlorite schists, quartzites and shales that constitute a rock sequence locally known as the Lom series (Soba, 1989; Kankeu et al., 2009). (2) The *Batouri district* extends southwards into the Congo craton. Here primary gold mineralization is related to structurally controlled discordant quartz veins/veinlets (Vishiti, 2009; Asaah et al., 2015), weathering profiles and altered wallrock restricted to NE-SW trending shear zones (Suh et al., 2006) that cut across Pan-African I-type granites. The veins are highly fractured, often foliated and have variable thicknesses along strike. The mineralized veins form a network of anastomosing veinlets composed of quartz ± gold ± hematite ± sulphide ± carbonate ± goethite and few selvages of

wallrock bearing sericite (Asaah et al., 2015). (3) *Boden district* covers the colomines (study area) and it is characterised by a large complex of late-to post-tectonic calc-alkaline to alkaline granite plutons (Takodjou Wambo et al., 2016). The early granite plutons are deformed at their margins. Gold is found in the NE-SW trending quartz veins along zones of shearing and pegmatitic veining that transect the plutons (Suh et al., 2006). The source of the primary gold mineralization in this district is poorly known due to the thick lateritic cover. Modern geostatistical methods have not been applied to the alluvial gold, in such a way as to constrain their spatial distribution in order to delineate the most prospective area for primary gold mineralization.

## 3. Methods

### 3.1. Data acquisition

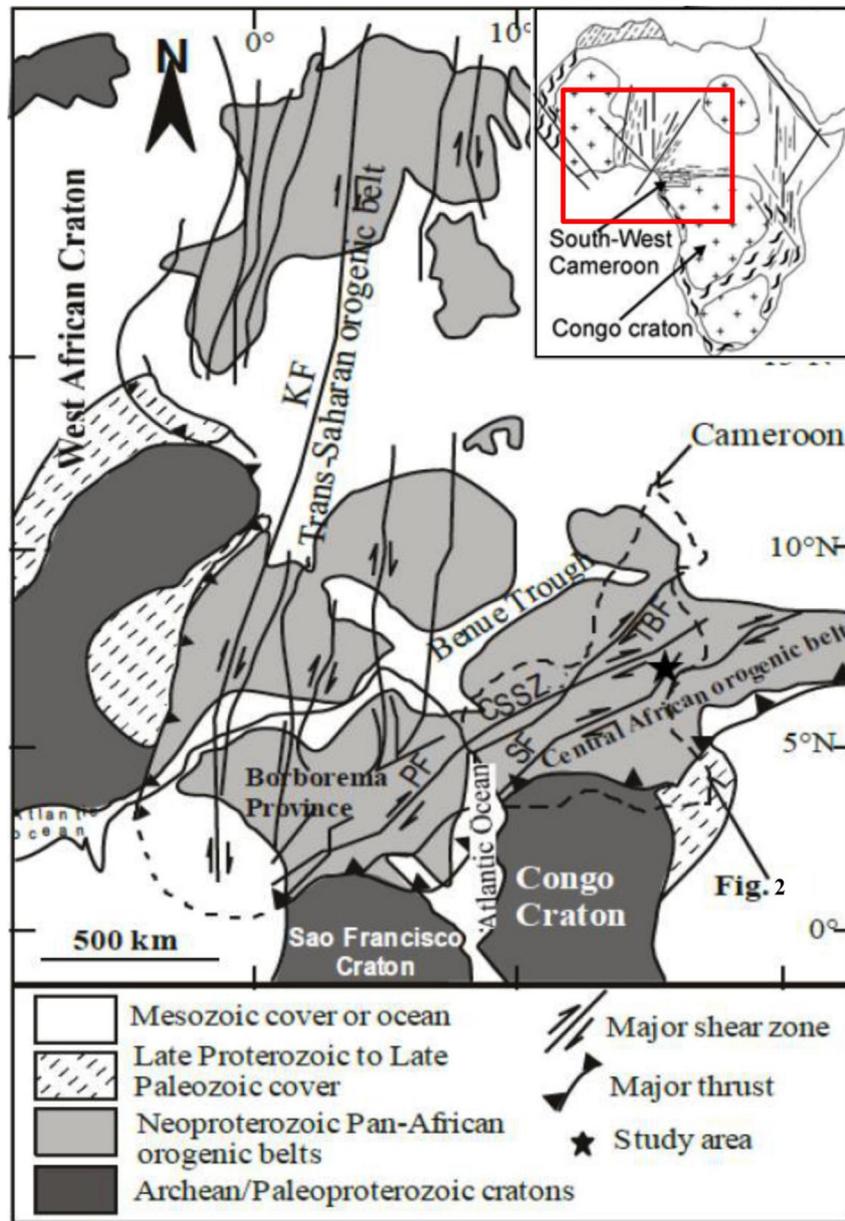
Various types of data were used in this work. These data included: (i) Landsat-7 ETM + images (Path 184 and Row 057) of December 24, 2003 (beginning of the dry season) and corresponding to Zone 33 of the map projection, Universal Transverse Mercator (UTM) which uses the geodetic reference system WGS 84; (ii) the SRTM satellite image covering the area of study; (iii) the geologic map of Batouri East at the scale 1/500,000 (Gazel and Gerard, 1954), and (iv) the topographic map of scale 1/200,000 covering the explored area. The choice of these images was based on their spectral characteristics and spatial resolution. The resolution of the images used in this work are 30m for band 1 to 5 respectively Blue (visible), Green (visible), Red (visible), Near IR, Medium IR, and 7 Medium IR, 60m for band 6/1, 120m for 6/2 (Thermal IR/distant) and 15m for Band 8 that is Panchromatic (Green-Red-IR) spectral band. With the exported format pixel dimensions of width (3020) and height (3514) for a size of 10.07 × 11.71 inches with 300 pixels per inch and a color depth of 32-bit color W/alpha.

The mining data came from alluvial exploration pits (Takodjou Wambo, 2017). We measured the thickness of different levels from surface to the deep for all exploration pits. To do this, we measured the thickness of barren layer after that of mineralized gravel and finally we assessed the gold content in the mineralized gravel. This operation was carried out for each alluvial exploration pits as well, the database consist of (i) the thickness of the barren and mineralized gravel layer and (ii) the gold content of each explored pit. For the evaluation of gold content of each pit, we use the panning technique to recover the gold concentrate which was weighed using high precision balance. For this purpose, ten pans (volume of 10 L) of alluvium were collected and washed at each studied pit site. Simple conversions were applied to obtain the gold content of each pit in g/m<sup>3</sup>.

Two representative sampling pits with high gold content were selected for gold morphology study. These pits are located at Madubal and Tissongo areas in the northeastern corner of the study area. Gold grains were mounted on glass slides and examined using a binocular microscope.

### 3.2. Data processing

The field data were analysed using the geostatistical and GIS techniques. Geostatistical analysis involves spatial anisotropy method (construction of directional variograms, followed by the anisotropy) and kriging method. Three main kriging techniques namely simple kriging, ordinary kriging and universal kriging are widely used for the improvement of spatial distribution characteristics of mineral deposits. Simple kriging has a stationary variable with a known mean, ordinary kriging has stationary variables



**Fig. 1.** Pre-drift reconstruction of Pan-African and Brasiliano terranes (modified from [Castaing et al., 1994](#)): CCSZ: Central Cameroon Shear Zone; SF: Sanaga Fault; TBF: Tibati-Banyo Fault; PF: Patos Fault.

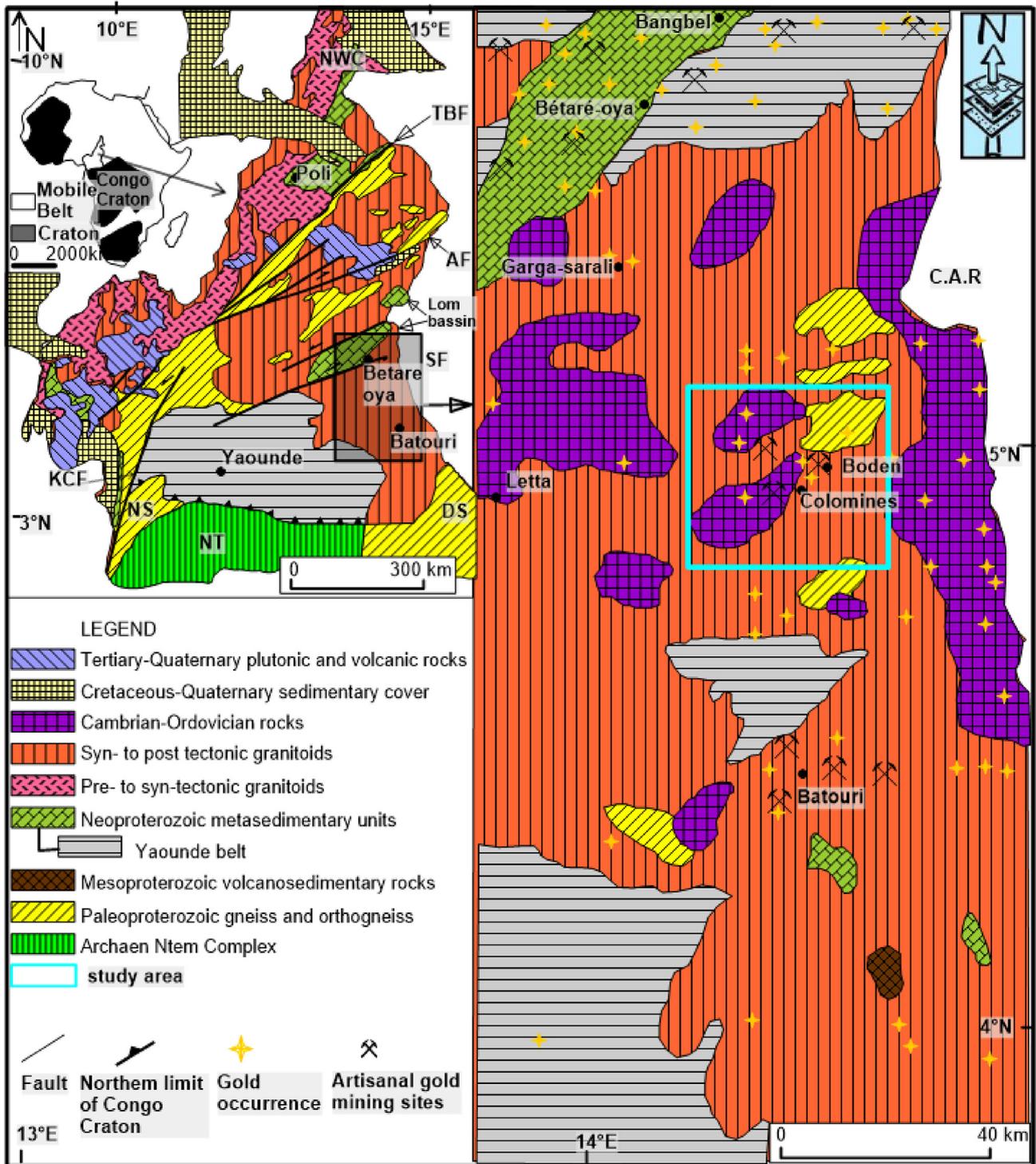
with an unknown mean and universal kriging has non-stationary variables (which has a tendency). Here we are focusing on ordinary kriging a common spatial estimator, but more precisely on punctual Kriging ([Heriawan and Koike, 2008](#)), because it is the most suitable geostatistical method which fits with the type of data used in this work. An advantage of kriging is that it provides an estimate variance or standard deviation that have the favorability of the data configuration used in the estimation. A high estimation variance indicates a lack of data given the spatial continuity of the studied phenomenon ([Matheron, 1963](#)).

### 3.2.1. Variogram

Spatial interpolation is a classical problem of estimating a function  $F(x)$ , where  $x = (x, y)$ , at a point  $x_p$  of the plane from known values of  $F$  at a certain number,  $m$  of points around  $X_i$ :

$$F(x_p) = \sum_{i=1}^m W_i \cdot F(x_i) \quad (1)$$

The difficulty here is to determine the weight ( $W_i$ ), of each neighboring points. There are several ways of choosing  $W_i$ . The two most common methods are (i) the linear interpolation (as a function of the inverse distance) and (ii) the cubic splines method (adjustment of cubic polynomes). The kriging method chooses the weights based on the degree of similarities among the values of  $F$ , which then is the covariance among the points with respect to the distance between the points. The only condition indispensable to use the kriging method is that the mean and the variance of the function  $F$  should be stationary, that is, it should not depend on the position of the points but only on the distance between the points ([Gratton et al., 2002](#)). The variogram is then simply the total



**Fig. 2.** Geology of southeastern Cameroon. (a) Geological map of Cameroon (modified after Toteu et al., 2001). The Central African Shear Zone is defined by a system of NE-trending faults comprising Tchollire-Banyo Fault (TBF), Adamawa Fault (AF), Sanaga Fault (SF), and Kribi-Campo Fault (KCF). The inset is the map of the African continent, showing the location of Cameroon relative to the distribution of cratons and mobile belts. (b) Regional geological map of southeastern Cameroon showing artisanal gold mining sites and other reported gold indications (modified after Milési et al., 2004). (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

variance minus the covariance with respect to the distance between the points (Journel and Huijbregts, 1978). The kriging method will then use half of the variogram to determine the weight in the equation (1). The semi-variogram is calculated using the equation (2) for the  $n(h)$  points  $x_i$  and  $Y_i$  separated by a distance  $h = |x_i - y_i|$ :

$$\gamma(h) = \frac{1}{2n(h)} \sum_{i=1}^{n(h)} (x_i - y_i) \tag{2}$$

The choice of the semi-variogram is then validated by statistical tests. Statistical tests are used here to detect whether the observed

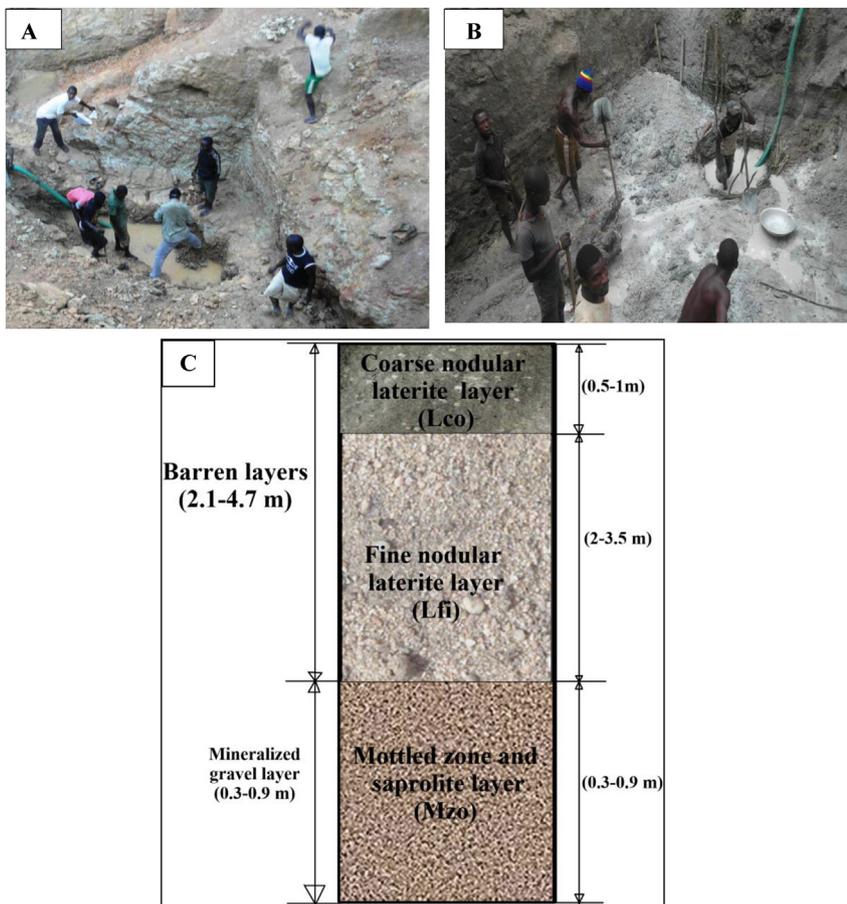


Fig. 3. Sites of gold artisanal mining showing sampling pits at Colomines (A) and along the river Kadei bank (B); a sketch of typical profile of alluvial gold deposit at study area, showing the relative position of barren (gangue) and mineralized gravel layers as well as their typical thicknesses (C).

fluctuations between the spatial mean, the variance and the overall semi-variogram with the associated mean values, variance of dispersion and semi-variogram (theoretical statistics) are consistent with the random field model and the size of the domain. The objectives here are to evaluate the agreement between the experimental statistics of the simulated random field and the corresponding statistics model.

3.2.2. Ordinary kriging

The kriging method consists of computing the weight  $W_i$  of equation (1) using the values of the function  $\gamma(h)$  corresponding to the chosen  $m$  points. The method consists of determining the combination of the weights i.e, the combination of the  $W_i$  of the equation (1), which guarantees that the computed values using the targeted point  $X_p$  will be found on the model curve expected (Gratton et al., 2002). The weights are obtained by multiplying the  $W_i$ , for each of the  $m$  points, by each of the semi-variance  $m$  associated to this point (the lines of the matrix  $A$  in equation (3)). The challenge is express finally under the form of the  $m+1$  linear equation system to  $m+1$  unknown according to Davis (1986).

$$A \cdot W = B \tag{3}$$

Where  $A = \begin{bmatrix} \gamma(h_{11}) & \gamma(h_{12}) & \dots & \gamma(h_{1m}) & 1 \\ \gamma(h_{21}) & \gamma(h_{22}) & \dots & \gamma(h_{2m}) & 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \gamma(h_{m1}) & \gamma(h_{m2}) & \dots & \gamma(h_{mm}) & 1 \\ 1 & 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}$ ,  $W = \begin{bmatrix} W_1 \\ W_2 \\ \dots \\ W_m \\ \lambda \end{bmatrix}$  and

$$B = \begin{bmatrix} \gamma(h_{1p}) \\ \gamma(h_{2p}) \\ \dots \\ \gamma(h_{mp}) \\ 1 \end{bmatrix}$$

The  $\gamma(h_{ij})$  being the values of the semi-variogram corresponding to the distance  $h_{ij}$  between the points  $x_i$  and  $x_j$ . The  $\gamma(h_{ij})$  have already been calculated using the analytical function adjusted to the semi-variogram. For the solution to be optimal, the sum of the weight ( $W_i$ ), should be equal to 1 (Davis, 1986). This last set of information imposes an additional challenge. This additional challenge is dealt with by adding a free variable  $\lambda$ , with is a Lagrange multiplier, to minimize estimation errors. The vector  $W$  is obtained by each side of equation (3) by the inverse of matrix  $A$ . The value expected at point  $X_p$  is then calculated by using the known values of  $F$ , the  $F(x_i)$ , via equation (1). The variance of the estimation  $s_p^2$  that is the squares of the standard errors on each point is obtained by the relation.

$$S_p^2 = W^T \cdot B \tag{4}$$

Where the  $T$  indicates the transpose of the vector  $W$ . Supposing that the estimation errors are normally distributed around the right value, therefore the probability that the right value is  $F(x_p) \pm s_p$  is of 68%, meanwhile the probability that the right value is  $F(x_p) \pm 2s_p$  is of 95% (Davis, 1986).

**Table 1**  
Field data collected in Ngoura-Colomines area.

Pit code	Coordinates		Mineralized layer thickness (m)	Barren layer thickness (m)	Gold content (g/m <sup>3</sup> )
	Y	X			
COL-1	N04°58'47"	E014°22'10"	0.3	2.1	2.3
COL-2	N04°59'49"	E014°21'55"	0.6	3.3	2.6
COL-3	N04°59'48"	E014°21'55"	0.4	3.6	3.7
COL-4	N04°58'42"	E014°22'09"	0.7	3.2	4.2
COL-5	N05°06'52"	E014°16'27"	0.4	3.7	3.4
COL-6	N05°34'39"	E014°05'17"	0.3	3.9	3.1
COL-7	N04°58'39"	E014°22'56"	0.6	3.3	2.1
COL-8	N04°58'32"	E014°22'47"	0.7	3.4	2.2
COL-9	N04°58'55"	E014°22'37"	0.9	3.6	2
COL-10	N04°58'37"	E014°22'20"	0.3	4	2.6
COL-11	N04°58'17"	E014°22'13"	0.4	3.6	1.8
COL-12	N04°58'19"	E014°21'51"	0.3	3.3	2.9
COL-13	N04°58'02"	E014°21'44"	0.7	4.1	2.4
COL-14	N04°57'57"	E014°21'32"	0.3	4.3	3.2
COL-15	N04°59'22"	E014°23'26"	0.6	4.2	1.9
COL-16	N04°58'42"	E014°23'36"	0.4	4.3	2.3
COL-17	N04°58'27"	E014°24'08"	0.9	4.6	2.8
COL-18	N04°59'05"	E014°22'46"	0.8	4.1	1.8
COL-19	N04°57'39"	E014°21'46"	0.6	4.3	1.3
COL-20	N04°57'20"	E014°22'16"	0.7	4.6	1.2
COL-21	N04°57'20"	E014°22'35"	0.4	3.7	2.7
COL-22	N04°57'53"	E014°23'06"	0.8	3.3	2.9
BOUT-1	N04°59'54"	E014°22'11"	0.6	3.1	3.2
MAD-1	N05°00'01"	E014°24'22"	0.7	3	3.1
MAD-2	N04°59'41"	E014°24'14"	0.8	3	4
MAD-3	N04°59'55"	E014°24'47"	0.4	3.9	3.2
MAD-4	N05°00'02"	E014°23'44"	0.9	3	2.9
MAD-5	N05°00'26"	E014°23'10"	0.3	3.9	2.4
MAD-6	N05°00'26"	E014°24'05"	0.6	3.4	1.9
MAD-7	N05°01'4"	E014°24'26"	0.7	3.1	2.6
MAD-8	N05°01'14"	E014°24'53"	0.4	3.2	3.7
TASS-1	N05°02'22"	E014°21'03"	0.3	3.9	4.6
TASS-2	N05°01'38"	E014°20'11"	0.7	3	3.8
TASS-3	N05°01'25"	E014°20'32"	0.8	3.1	1.1
TASS-4	N05°01'46"	E014°20'54"	0.6	3.3	1.7
TASS-5	N05°02'57"	E014°21'23"	0.9	3.2	3.8
TASS-6	N05°02'49"	E014°20'07"	0.7	4.1	3.9
TASS-7	N05°03'05"	E014°21'56"	0.6	4.3	4.1
TASS-8	N05°02'27"	E014°22'44"	0.6	4.6	3.2
TASS-9	N05°01'45"	E014°22'53"	0.4	4.7	2.2
NGOU-1	N04°52'34"	E014°14'48"	0.3	4.4	2.9
NGOU-2	N04°52'46"	E014°15'29"	0.7	4.6	1.1
NGOU-3	N04°53'29"	E014°15'41"	0.8	3.9	1.3
NGOU-4	N04°53'38"	E014°15'29"	0.9	3.6	1.4
NGOU-5	N04°53'39"	E014°15'10"	0.4	3.4	0.8
NGOU-6	N04°53'05"	E014°15'43"	0.3	3.3	0.1
NGOU-7	N04°52'36"	E014°14'06"	0.9	3.9	0.6
NGOU-8	N04°53'38"	E014°14'50"	0.3	3.4	0.5
PT de LIA	N04°50'54"	E014°13'59"	0.8	3	0.9
KAD-1	N04°53'26"	E014°19'10"	0.8	3	0.9
KAD-2	N04°54'22"	E014°19'51"	0.3	4.2	4.6
KAD-3	N04°54'43"	E014°19'51"	0.4	4.7	2.2
KAD-4	N04°57'04"	E014°20'21"	0.7	4.3	2.7
KAD-5	N04°57'51"	E014°21'28"	0.6	4	2.1
KAD-6	N04°57'52"	E014°22'50"	0.8	4.3	2.8
KAD-7	N04°57'24"	E014°24'24"	0.9	3.8	0.9
OUD-1	N04°54'26"	E014°08'56"	0.3	3.6	0.3
OUD-2	N04°56'11"	E014°09'02"	0.9	3.3	1.7
OUD-3	N04°56'13"	E014°11'02"	0.6	3.4	0.2
OUD-4	N04°58'07"	E014°12'17"	0.7	3.7	0.6
OUD-5	N04°59'39"	E014°10'45"	0.6	3.3	0.1
OUD-6	N04°59'51"	E014°12'44"	0.8	3.8	0.8
OUD-7	N04°59'09"	E014°13'46"	0.6	3.9	4.6
OUD-8	N05°00'14"	E014°15'58"	0.7	3.4	1.7
OUD-9	N05°01'05"	E014°10'42"	0.8	3.3	3.1
OUD-10	N05°02'27"	E014°15'36"	0.4	3.6	1.8
OUD-11	N04°59'42"	E014°11'55"	0.5	3.2	1.9
OUD-12	N04°58'50"	E014°15'36"	0.7	3.1	3.6
OUD-13	N05°00'50"	E014°13'46"	0.9	3.2	2.4
KAD-8	N04°50'39"	E014°17'50"	0.7	3.4	1.1
KAD-9	N04°54'17"	E014°22'14"	0.4	3.6	1.7
OUD-14	N04°55'10"	E014°14'26"	0.7	3.3	2

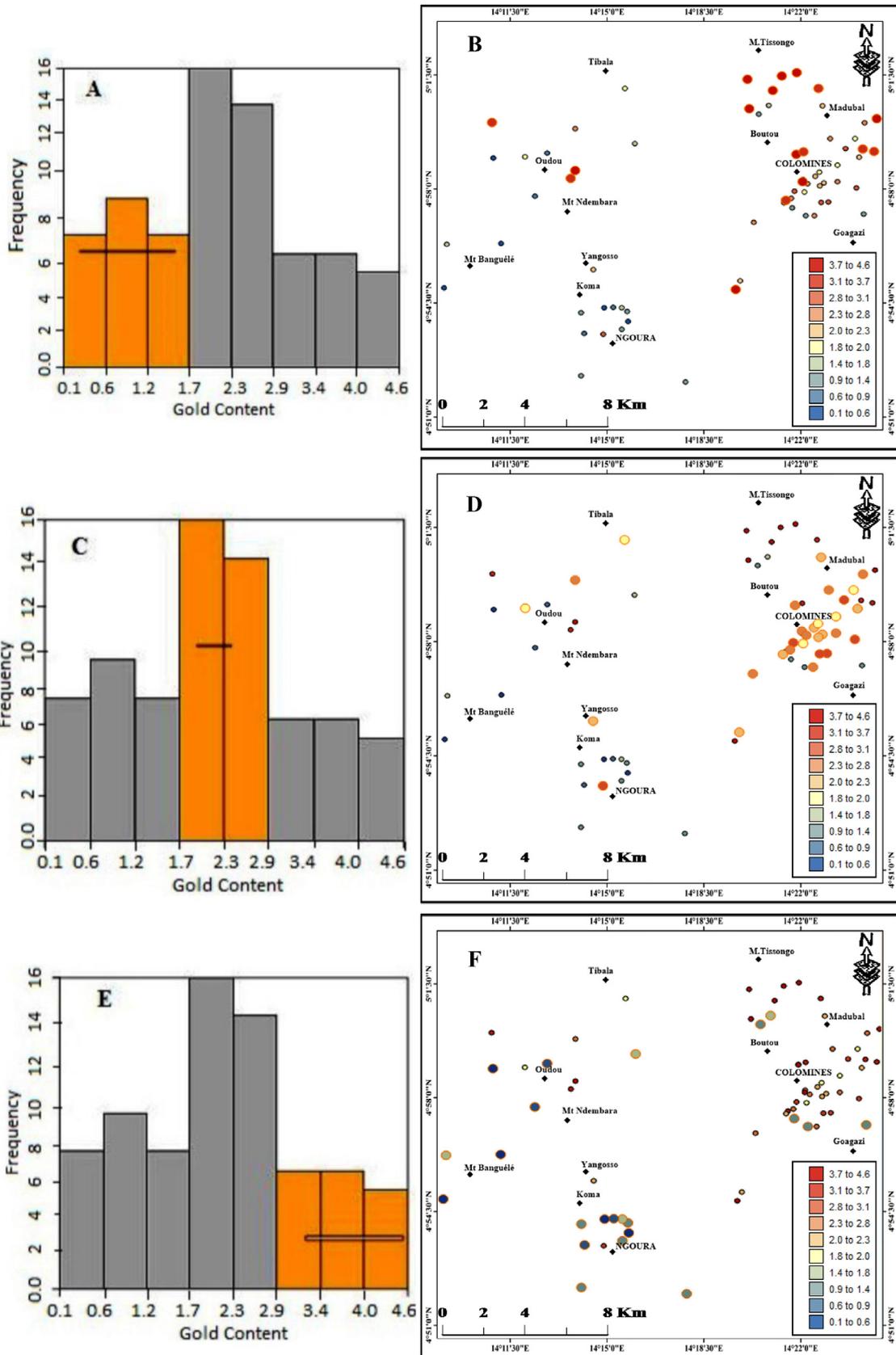


Fig. 4. Histogram (a, c & e) and grade distribution of gold mineralization (b, d & f) in Ngoura-Colomines area.

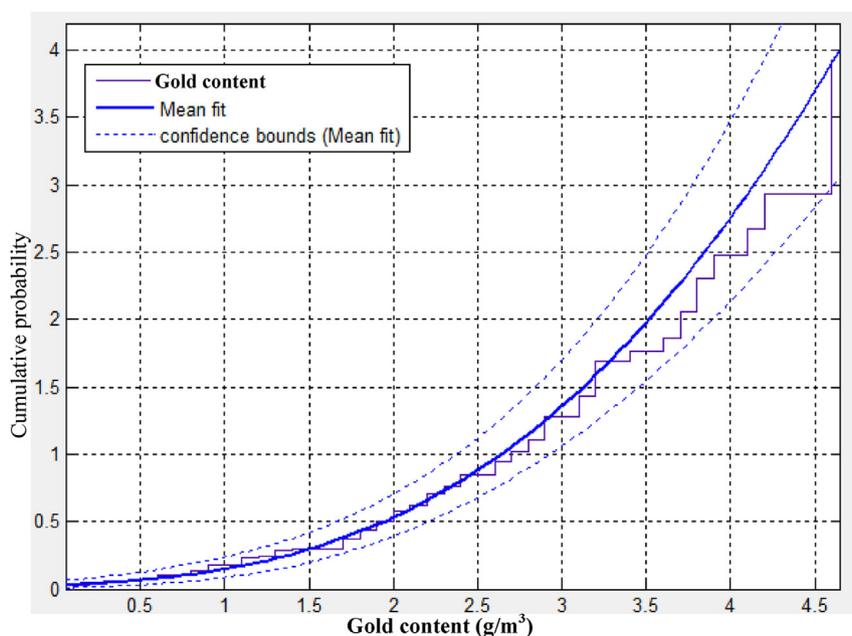


Fig. 5. Relation between gold grade, mean fit and confidence bound.

Table 2

Statistical summary of field data collected in Ngoura-Colomines area.

Statistical parameters	Mineralized layer thickness (m)	Barren layer thickness (m)	Gold content (g/m <sup>3</sup> )
Number of data	73	73	73
Minimum	0.30	2.10	0.10
Maximum	0.90	4.70	4.60
Mean	0.60	3.65	2.28
Mode	0.70	3.30	2.90
Variance	0.04	0.27	1.35
Standard deviation	0.20	0.52	1.16
First quartile	0.40	3.30	1.37
Median	0.60	3.60	2.25
Upper quartile	0.80	4	3.10
Coefficient of variation	0.33	0.14	0.50

### 3.2.3. GIS analysis

The previous processing techniques are followed by the GIS analysis which consists of the creation of a database for the effective management of the data and an appropriate discussion of the results. The GIS analysis of the obtained results was made using ArcGIS 10, Erdas Imagine 2014, and Geomatica 2012 software. The choice of the projection system and ellipsoid is one of the fundamental steps in a study where spatial analysis and cartography play a predominant role. Several ellipsoids such as GRS80 and WGS84 exist. The choice of the ellipsoid depends on the geographical zone where it is found. In our work the data will be georeferenced in the projection WGS84 in UTM coordinates, zone 33N. WGS 84 is an Earth-centered, Earth-fixed terrestrial reference system and geodetic datum. WGS 84 is based on a consistent set of constants and model parameters that describe the Earth's size, shape, gravity and geomagnetic fields. WGS 84 is the standard U.S. Department of Defense definition of a global reference system for geospatial information and is the reference system for the Global Positioning System (GPS). It is compatible with the International Terrestrial Reference System (ITRS). Field investigations were made in a manner such as to sweep a representative area of Ngoura-Colomines, combining observations at different scales. It is worth to note that the information contained in our GIS database comes from multiple sources including field work, available maps and data

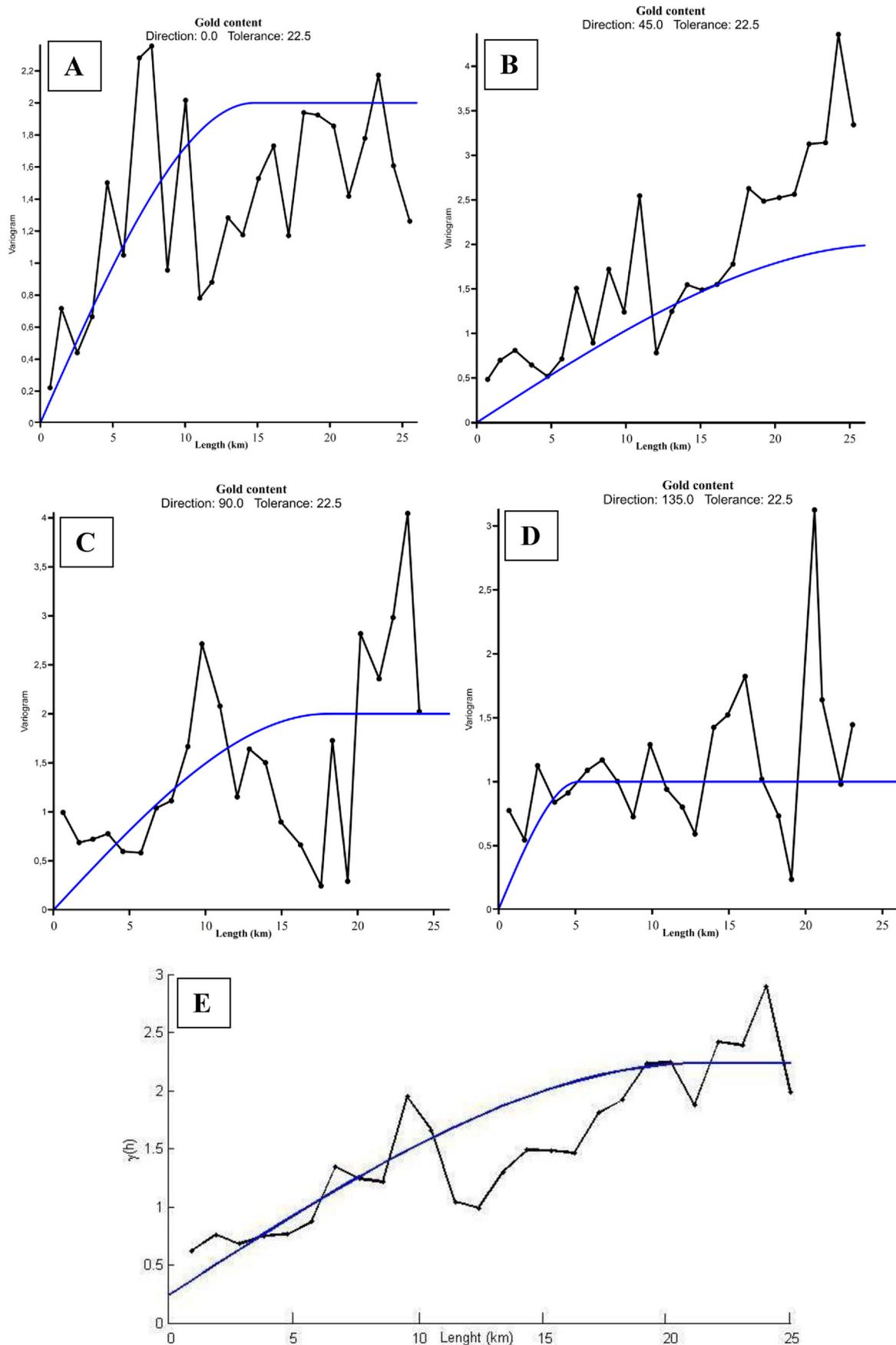
from mining companies. All these data are grouped into layers and presented as maps.

## 4. Results

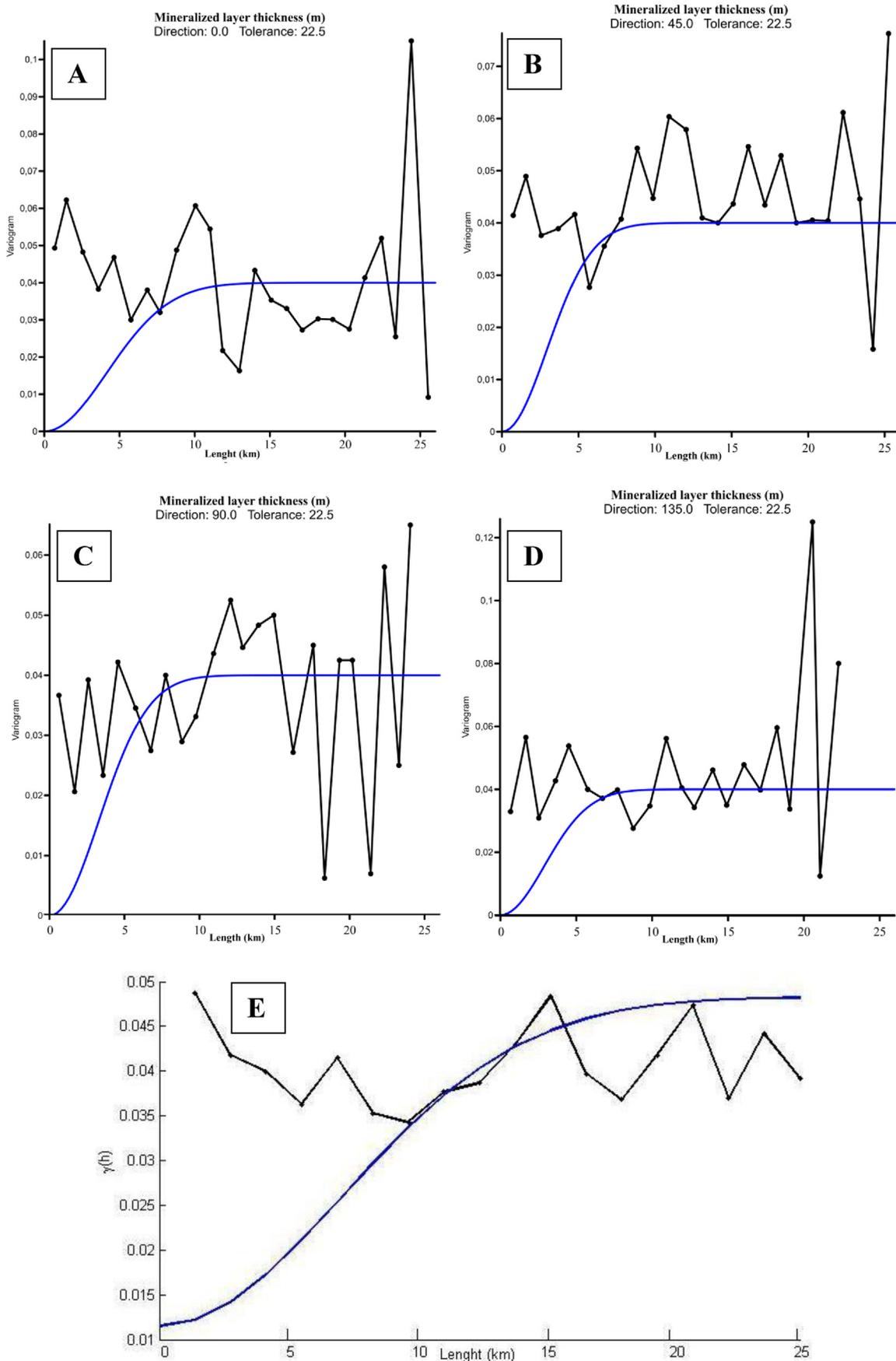
### 4.1. Description of alluvial exploration pits and mineralized layer

Seventy-three alluvial test pits were studied. An example of sampling sites is presented in Fig. 3(A and B). Globally, three principal horizons were discerned along the entire studied pit site. These included, from surface to the deep, (i) coarse nodular laterite *Lco*, (ii) fine nodular laterite *Lfi* (both constitute barren layers) and (iii) mottled zone *Mzo* that is mineralized gravel layer (Fig. 3c). *Lco* is about 0.5–1 m thick, brownish in color, gravelly and contains nodules that range in size from 0.8 to 4.7 cm. *Lfi* varies in thickness from 2 to 3.5 m. It is brown to reddish brown in color, sandy to gravelly and contains nodules ranging in size from 0.4 to 3.9 cm. *Lfi* changes abruptly to lower levels in the mottled zone with a thickness between 0.3 and 0.9 m. This horizon is silty, clayey to sandy and varies in color from yellow to yellowish brown to reddish brown. The *Mzo* gradually turns into saprolite.

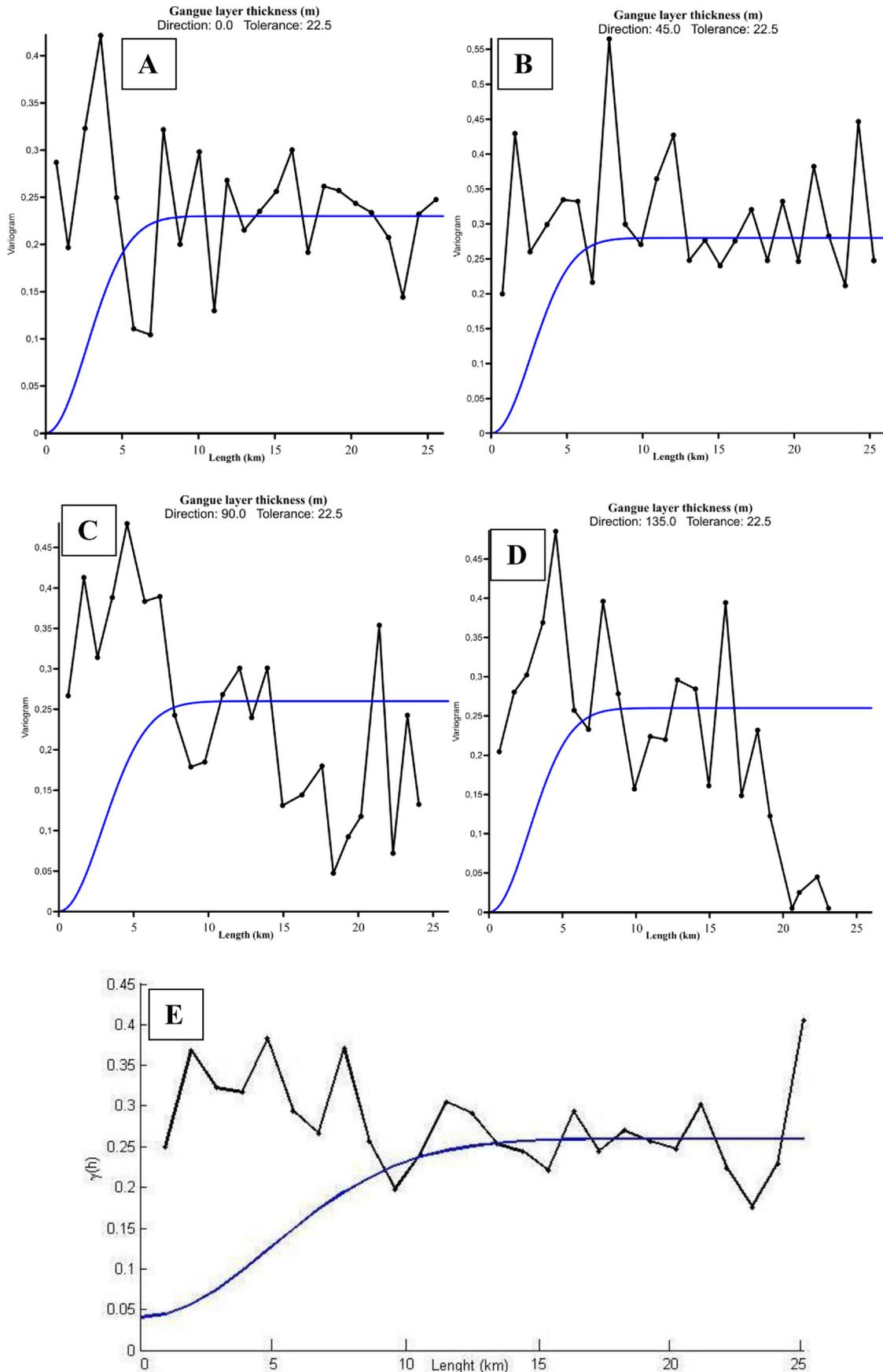
The mottled zone has been sampling for gold grains and heavy mineral characterization. The result shows a fair amount and number of heavy minerals associated with gold grains. They include



**Fig. 6.** Directional variogram of spatial distribution of gold content in Ngoura-Colomines area modeling with a linear combination of a nugget effect and spherical function with tolerance 22.5 in four main directions for (A) N-S, (B) NE-SW, (C) W-E, (D) SE-NW and (E) with tolerance 90 for omnidirectional variogram. Empirical model variogram is the black line and variogram indicator is blue for A, B, C, D and E. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)



**Fig. 7.** Directional variogram of spatial distribution thickness of mineralized layers in Ngoura-Colomines area modeling with a linear combination of a nugget effect and a Gaussian function with tolerance 22.5 in four main directions for (A) N-S, (B) NE-SW, (C) W-E, (D) SE-NW and (E) with tolerance 90 for omnidirectional variogram. Empirical model variogram is the black line and variogram indicator is blue for A, B, C, D and E. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)



**Fig. 8.** Directional variogram of spatial distribution thickness of gangue layers in Ngoura-Colomines area modeling with a linear combination of a nugget effect and a Gaussian function with tolerance 22.5 in four main directions for (A) N-S, (B) NE-SW, (C) W-E, (D) SE-NW and (E) with tolerance 90 for omnidirectional variogram. Empirical model variogram is the black line and variogram indicator is blue for A, B, C, D and E. (For interpretation of the references to color in this figure legend, the reader is referred to the Web version of this article.)

tourmaline, rutile, zircon and epidote, suggesting felsic igneous rock source. This result is in line with the general geology of the study area predominantly made up of granitoids.

4.2. Geostatistical analysis of field data

Three main parameters including the gold content, the thickness of mineralized gravel-rich layer, and the thickness of barren layer were investigated (Table 1).

4.2.1. Gold content

The gold content varies between 0.1 and 4.6 g/m<sup>3</sup>. The frequency distribution (histogram) of the gold content and their spatial distribution are shown in Fig. 4. The histograms are used here to represent content variables having a continuous character that are divided into classes for the purpose of the graphical representation. This allowed us to sketch a statistical description of gold content into three main classes based on its histogram having a unimodal and symmetric distribution, and cumulative distribution curve (Fig. 5). We worked on the basis of a confidence interval by estimating the probability that the average observed in the population will fall within this range. The statistical distribution of gold concentrations has a range of 4.5 for an average of 2.28, a variance of about 1.351, mode 2.9, median 2.25, lower quartile 1.375, and upper

quartile 3.1 (Table 2).

The first class represents 31.50% of total data and consists of gold content values ranging from 0.1 to 1.78 g/m<sup>3</sup> (average = 1.01g/m<sup>3</sup>); the gold content of the second class (42.46%) varies from 1.78 to 2.91 g/m<sup>3</sup> (Fig. 4c); whereas the third class included the high gold concentration values (2.91–4.60 g/m<sup>3</sup> with an average of 3.62 g/m<sup>3</sup>) and represents 26.02% of the whole data (Fig. 4e). From the gold content distribution map, it appears that the samples with moderate (class 2) to high (class 3) gold concentration are mainly concentrated close to Colomines village (Fig. 4b and d), while samples with low gold content are widespread with the most concentration around the Ngoura village (Fig. 4f). In addition, with regard to the spatial correlation between each population of gold content and their corresponding layers thicknesses, we found that the first class was the one with the lowest to medium barren layer thicknesses values ranging from 3.40 to 3.83m with mineralized gravel layer thicknesses also relatively low (0.48–0.81m). The barren layers thickness for the second class is somewhat disparate from a spatial point of view but just as weak as those of the first class with a mean value centered on 3.83 in the study area but decreasing considerably to a value of 3.40 around the Colomines and Boutou villages. The thickness of the mineralized gravel in this class is very small and almost always centered on the 0.48–0.64 m range. The third class represented here by the high gold concentration values, although very

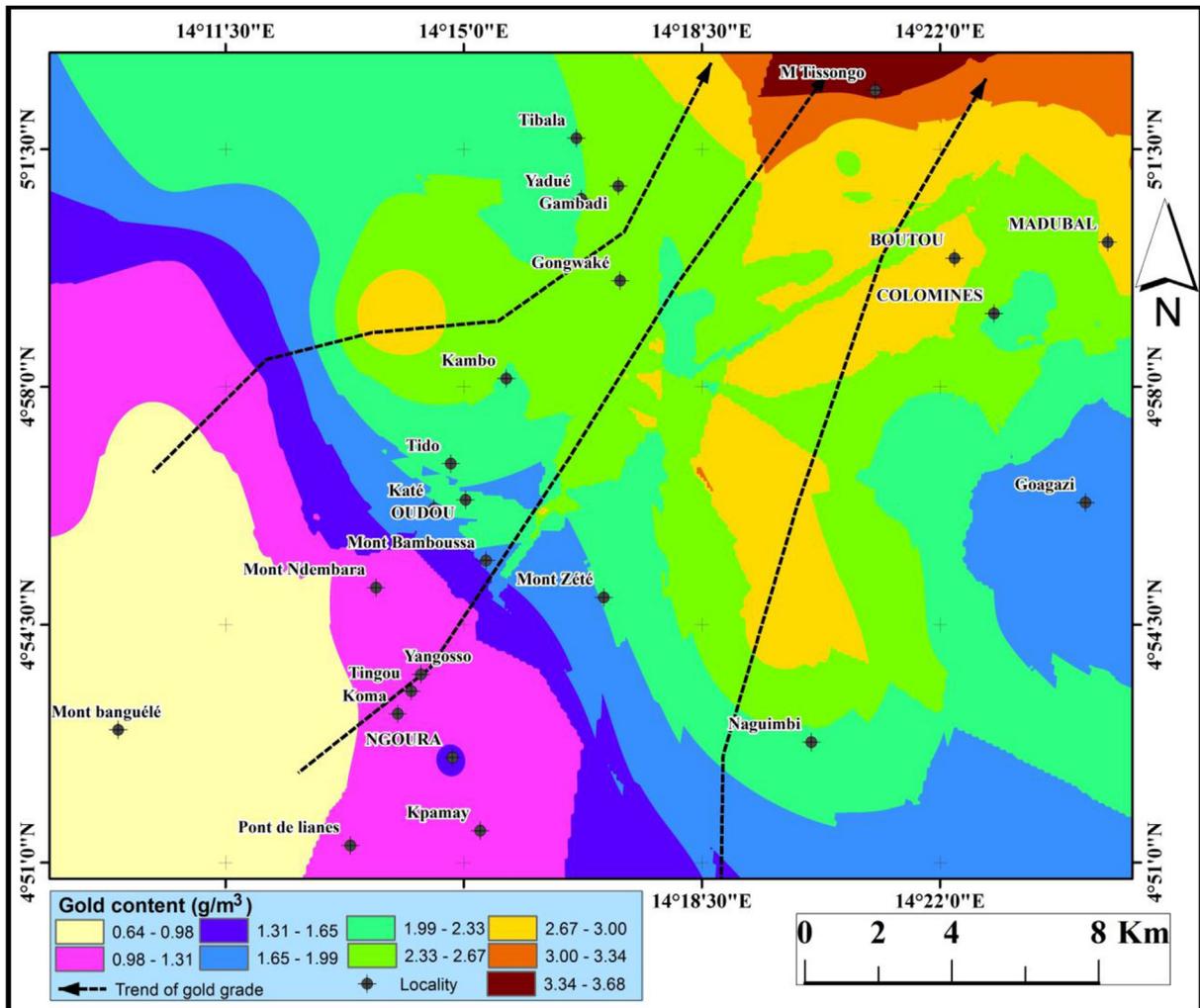


Fig. 9. Gold iso-content map obtained by ordinary kriging estimation.

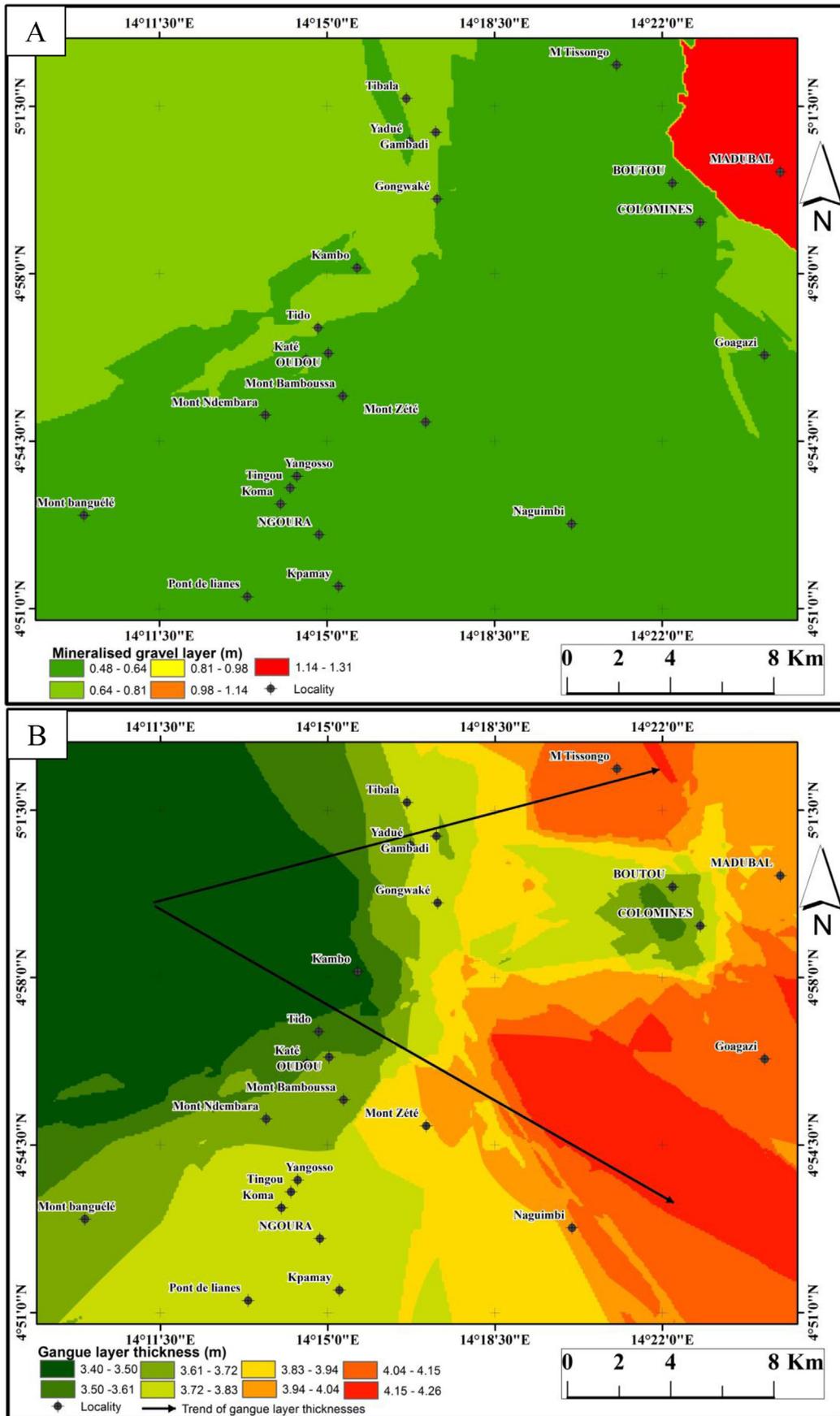


Fig. 10. Iso-thickness maps of mineralized (A) and barren (B) layers obtained by kriging techniques.

representative in the study area. It has a low to medium barren layer thickness (3.50–3.83m) for gold content ranging from 1.4 to 2.8 g/m<sup>3</sup> and slightly higher (3.94–4.04 g/m<sup>3</sup>) for the highest gold content (3.7–4.6 g/m<sup>3</sup>). However, the thickness of mineralized gravel in this class remains relatively low (0.48–0.64m) over the entire S and NNE portion of the investigated area but with a sharp growth (1.14–1.31m) in the NE portion over an area that covers the Madubal village and the surroundings of Boutou and Madubal. The spatial continuity of the gold content has been evaluated using variography. Fig. 6 shows directional variogram of spatial distribution of gold content modelling with a linear combination of a nugget effect and a spherical function characterized by scale of 2, length of about 1 and anisotropy ratio that range 7 with tolerance 22.5° in four main directions for N-S (Fig. 6a), NE-SW (Fig. 6b), W-E (Fig. 6c), SE-NW (Fig. 6d) and omnidirectional variogram with tolerance 90° (Fig. 6e). Here nugget variance is 0.231, sill variance 2.006 and range is about 0.216. The directional variograms are noisier that can be due to the reduced number of data pairs used for estimation. They do not really show overwhelming evidence of anisotropy. Gaussian model characterized by scale of 1.925, length of about 0.127 and anisotropy ratio that range 2.161 with nugget variance is 0.231, sill variance 2.006 and range is about 0.216 where used to fit each empirical (directional with tolerance 22.5° and omnidirectional with tolerance 90°) variograms for thickness of mineralized and gangue layers (Figs. 7 and 8). The thickness of gangue layers directional variogram (Fig. 8) shows some decreasing spatial correlation with distance. The magnitude of spatial correlation decreases with separation distance (Fig. 8C and D) until a distance at which no spatial correlation exists that is around 21 Km for NW-SE direction (Fig. D).

Fig. 9 is the gold iso-content map obtained by the kriging process using omnidirectional variogram. Kriging estimation and variogram parameters used for estimating gold content and layers thicknesses are 100 rows x 45 columns for grid size with linear component type, anisotropy angle (0), and anisotropy ratio (1), all the krigings were done using the 73 closest neighbours of the point to estimate maximum number of neighbourhood data (3) and variogram slope (1). The technique consists of a spatial interpolation of localized data based on a variance game, the target being to do the cartography of a natural phenomenon. From the map (Fig. 9), it is observed that the western part of the study area is the least gold mineralized zone, while the eastern part is the most enriched. Within this eastern part, the northeastern sector is more enriched than the southeastern one. In addition, the central part of the investigated area, especially around Tido and Kambo villages, shows moderate gold enrichment. The kriging map of gold content shows principal trends of gold grade distribution in NE-SW and secondary NNE and ENE directions (Fig. 9).

#### 4.2.2. Thickness of mineralized and gangue layers

The thicknesses of the mineralized and gangue layers were measured in each pit and the value obtained expressed in meter. These thicknesses were vectorized as points. The mineralized gravel layer has a thickness which varies between 0.3m and 0.9m, with high proportion of values ranging from 0.3 to 0.5 m (Table 1). The mineralized gravel layer iso-thickness map (Fig. 10a) is obtained by kriging process using omnidirectional variogram. From there, we can see that the layer thickness does not have a preferred geographic distribution. However, the pits with high mineralized layer thickness are mainly located at the northeastern part of the study area, especially around Madubal village.

The barren layer thickness ranges between 2.1 and 4.7 m (Table 1). The application of kriging modelisation techniques with omnidirectional variogram has led to the construction of gangue layer iso-thickness map (Fig. 10b) which shows two preferred geographic trends of gangue layer thicknesses distribution

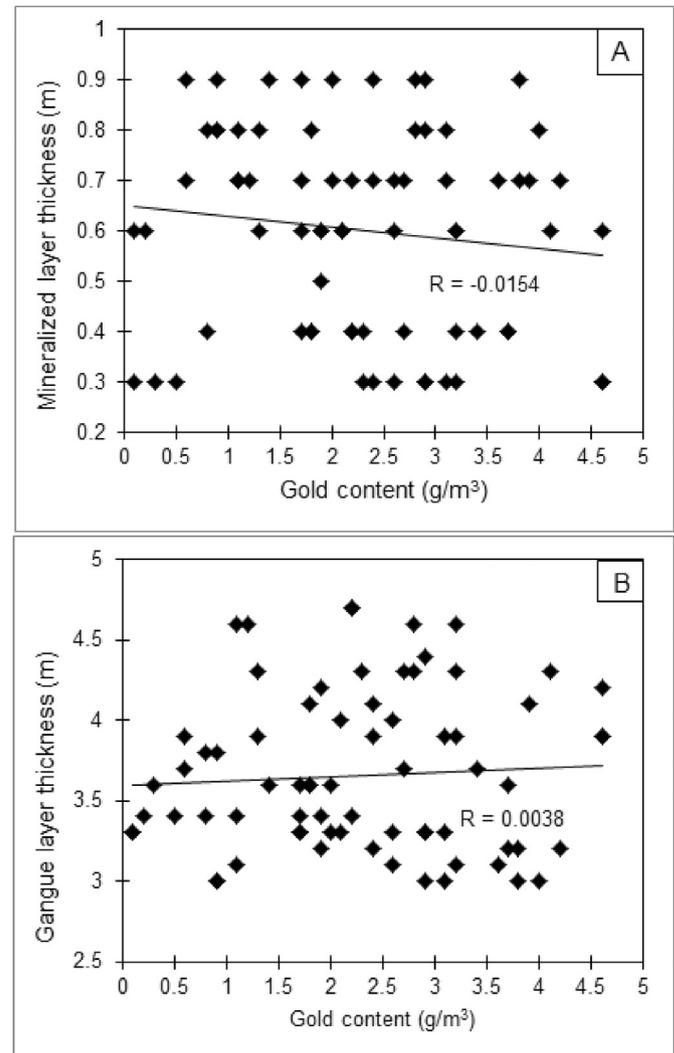


Fig. 11. Binary plots of mineralized (A) and barren layers thickness (B) vs. gold content.

relatively in NW-SE and NE-SW directions.

The statistical distribution of mineralized and gangue layers thicknesses is respectively 0.60 and 3.65 for the mean; 0.04 and 0.27 for the variance, 0.60 and 3.60 for the median and 0.20 and 0.52 for the standard deviation (Table 2).

When compared with the gold content, both mineralized and gangue layers thicknesses do not show any correlation (Fig. 11a and b). In other words, the three parameters (gold content, mineralized gravel thickness and the gangue layer thickness) are independent from each other.

#### 4.3. GIS data analysis

The data analysis is the last phase in the conception of a GIS. This phase presents the obtained results and tries to provide answer to several questions. Data analysis in a project entails a number of operations varying from the presentation of the entities to the complex multi-step analytical model (ESRI, 2005). In this work two types of data analysis were done, including the display of the geographical distribution of data and the superposition of different data layers.

The digital model of altitude (NMA) of the study area was derived from Landsat and SRTM images using ArcGIS software. The

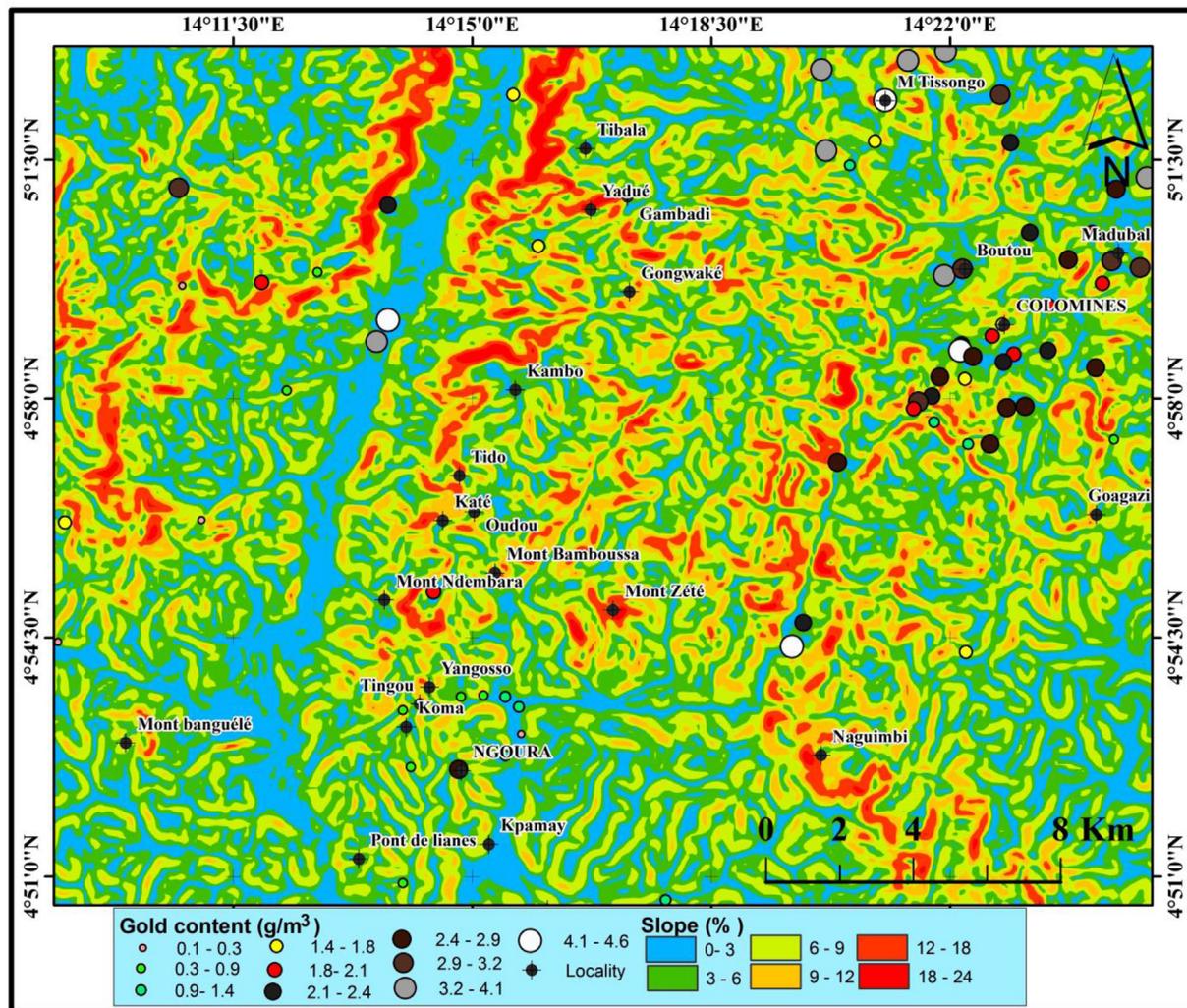


Fig. 12. Superposition of the gold content with the slope.

NMA leads to the construction of the slope map which shows spatial variation of the slopes (expressed in percentage) and enables a rapid identification of flat zones. The superposition of the gold content and the slope map shows that the pits which high gold content are found around low lands and that the gold contents are also very high around slopy areas (around 9–18%) in the north-eastern part of the study area (Fig. 12). The main observation done is that the limbs of the Colomines hill are very steep with values reaching 24%. The main consequence of such a relief is a high degree of erosion which could explain the high concentration of gold in the Colomines valleys.

The drainage pattern has been digitalized as lines from the topographic map. The data base contains as such the name and the order of each water body. The main transportation agent of mineralization in the low lands is water so its importance is worth noting. The superposition of the gold contents on the drainage pattern (Fig. 13) shows that the main mineralized rivers in the study area are the *Kadei* and the *Oudou* with their tributaries. This map also shows that the high mineralized pits are found on the river beds and that the pits with lowest grade of mineralization are mainly located at the junction points between a principal river and its tributaries. This observation is quite normal since the prospecting concerned alluvial gold. However, random distribution is observed for the mineralized and barren layers thicknesses with both the drainage system and the topography.

#### 4.4. Gold grains morphology

Two samples of gold grains concentrate with a total weight of 0.6 g (0.3 g each) was examined under binocular. The morphoscopy study of gold grains from each of these two pits has revealed that irregularly shaped grains predominate, with smaller proportions of dendritic and prismatic forms (Fig. 14). The general morphology of gold grains varies from angular to round and their surfaces are rough to blunt (Table 3). The gold grains from the two pits have a bright yellow color. Their size varies from 0.12 to 1.4 mm. Sample from Madubal pit shows gold grains with angular, sub-angular, sub-rounded to round shapes. Some grains are elongated, with long axis of 1.36 mm (Fig. 14C). At Tissongo area, gold grains show a wide range of shapes, ranging from elongated to flattened grains (Fig. 14). The surfaces are generally rough. The flattened grains show voids, probably related to dissolution during weathering.

## 5. Discussion

### 5.1. Controlling factors on the spatial distribution of the mineralization

In order to adapt a theoretical model of David (1988) for a concrete understanding of the database, it was important to analyze the whole empirical variogram, especially the low and high

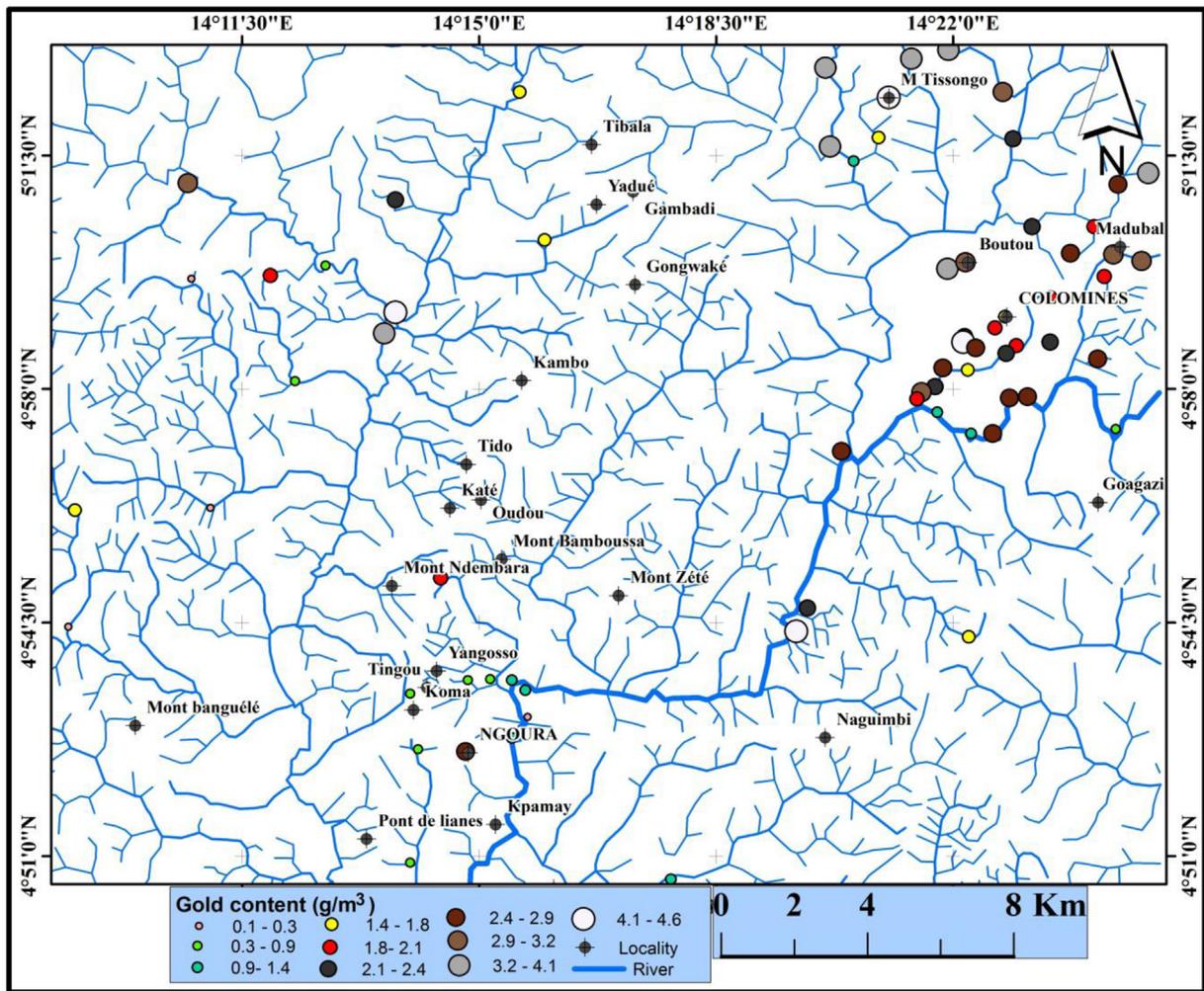
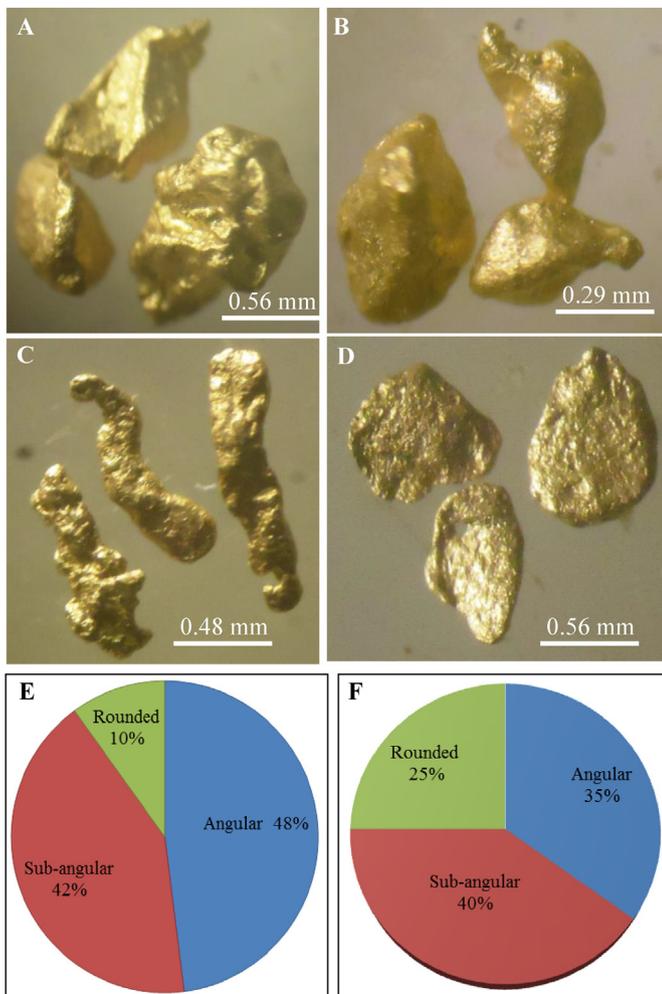


Fig. 13. Drainage pattern map showing location of sampling pit and their related gold content.

value that was the distance  $h$  between the observations. When the empirical variogram showed an apparent positive interception at the origin, it meant that two very similar samples have different values. This phenomenon was also known as 'nugget effect' (Matheron, 1963) and reflected either measurement errors or variability at scales smaller than the sampling grid or both. A linear combination of nugget and spherical model was visually adjusted to each empirical variogram of the gold content index. It clearly appear here that apart from NE-SW trends where there was some absence of directional dependence of the variogram, certain dependence between the model and empiric curve is observed in N-S, E-W and NW-SE-directions (Fig. 6). The presence of directional dependence of variograms may be related to the nature and disposition of increasing gold content following a preferential N-S and E-W-directions. This interpretation was also confirmed by the gradual and targeted increase in gold concentration groups essentially concentrated in the NNE-SSW direction and exceptionally E-W ensuring good spatial continuity in these different directions. This apparent anisotropy may also be due in part to tectonic control factors previously mentioned in the study area. Indeed, Takodjou Wambo et al. (2016) have reported major tectonic accidents that is fault and regional foliation trace associated with large scale Riedel fault system composed of P and P' faults respectively oriented NE-SW and NNE-SSW; and R and R' faults with E-W to NW-SE trends (Fig. 15). The rose diagrams associated to

these tectonic features are also presented in Fig. 15. These directional diagrams show two main directions (NE-SW and NW-SE) for fault and a dominant NE-SW-trends and secondary N-S and E-W-trends for regional foliation. They argued that these structures represent pathway for both mineralizing fluids and ground water flow in the study area. Thus the tectonic has probably played a major role on the distribution of the alluvial gold mineralization in the study area. This is confirmed by the gold content distribution map which that the pits with moderate to high concentration of gold form a linear distribution with preferential alignment being follow the NNE-SSW direction, from Colomines to the north-east to Ngoura to the south-west.

The construction of directional variograms, followed by the anisotropic one is used to perform a two-dimensional kriging estimate of the gold content indicators for each exploration pits. Kriging maps are then compared to large-scale feature maps to analyze the relationship between these fractures and the major gold content observed in the NE portion of the explored area (Fig. 15). This map reveals an interesting sector with high gold mineralization potential. This zone corresponds to the northeast margin of the study area. It can be noted that the considerable gold contents are found around intensely fractured zones (Fig. 15). This observation, in addition with the fact that there is no correlation whether it is positive or not between the gold content and the different layer thicknesses and that exploration is done on fault-



**Fig. 14.** Morphological characteristics (A-angular shape; B- Rounded shape; C- elongated grains; D- Flattened grains) and distribution (E- Tissongo pit; F-Madubal pit) of gold grains.

controlled river, highlights the proximity of primary gold mineralization in these areas. The potency of primary gold deposit seems to be related to the faults system which might control the gold mineralization. Moreover, the absence of correlation between the data used points out the nugget effect, but this time not that of the variograms but rather that of the distribution of gold in the mineralized gravel. Indeed, if this distribution was normal and in the layers gold was disseminated in the same proportion as the sand and the other constituents of the layer, an increase in the thickness of the layer will have implied an increase of the content and the correlation will be visible. Much more, a steep increase in the gold content to Tissongo on the one hand (Fig. 9), a considerable increase in the thickness of mineralized gravel (Fig. 10) with a moderate gold content around Madubal and finally a decrease in the thickness of gangue to Colomines and Boutou with a still moderate gold content may be direct signs of structural control on the deposit environment with the implementation of the

consequent meanders to shelter the mineralization (Figs. 9, 10 and 13). This result indicated that the alluvial gold mineralization at Colomines area comes from primary lode hosted in pegmatite dykes and aplitic quartz veins and controlled by NE-SW-trends ductile to brittle shear zone system. This interpretation was confirmed by the field investigation which revealed the presence of abundant NE-SW-trends mineralized quartz veins around Madubal and Tissongo areas at the place called 'trou du rat' in the Colomines neighborhood. Based on the above an area of 191 km<sup>2</sup> has been identified as the most prospective target for primary gold deposit in the study area (Fig. 16).

## 5.2. Morphological characteristics of Au grains and distance-to-source indicator

The samples from both sites are composed of a mixture of gold grains with angular and rounded shape (Fig. 14A–D). However, the proportion of rounded grains is greater in the Madubal sample (25%) than that of Tissongo (only 10%). Gold particles with angular shape represent 48% of the whole sample from the Tissongo area and 35% in the Madubal pit, whereas grains with the sub-angular shape are present in almost equal proportion in both samples (Fig. 14E–F). Many authors argued that the morphology of gold particle is alluvial placer deposit is related to distance of sorting and time spent in fluvial systems (Youngson and Crow, 1999; Knight et al., 1999; Townley et al., 2003; Fuanya et al., 2014). The irregularity in shape indicated that the gold particles from the study area have undergone various distance of transportation from their source. The angular to sub-angular shape is related to little or short distance (0–300 m) of transport while the rounded and blunt grains reflect a relative long distance (>1000 m) of transport (Townley et al., 2003).

The investigated gold particles are characterized by the fine-grained size. Edou Minko et al. (1992) have suggested that the finesse size of the gold grains in alluvial deposit is related to the fractionation and partial dissolution of the primary gold particles during meteoric weathering. In the study area, both gold samples show some grains with voids which can be attributed to the dissolution process.

From the morphoscopy study, it can be concluded that alluvial gold mineralization within the study area has proximal to sub-proximal source. The predominantly angular shape of gold particles from the Tissongo pit reflected their proximal (0–50 m) source whereas a sub-proximal 50–300 m to relative distal (300–1000 m or more) source is suggested for the gold grains from the Madubal pit. This conclusion is also supported by the presence of dismembered quartz veins-related gold mineralization in lateritic soils at the upstream of the exploration pits. The gold grains recovered from these veins show primary mineral imprints and inclusions of quartz and pyrite, suggesting their primary environment.

## 6. Conclusion

The combined geostatistic and GIS analysis of spatial distribution of alluvial gold content in the Ngoura-Colomines area has led to the following conclusion:

**Table 3**  
Morphological characteristics and proportion of Au grains in Tassongo and Madubal pits.

Au grains morphology	Angular (vol. %)	Sub-angular (vol. %)	Rounded (vol. %)	Total
Tassongo	48	42	10	100
Madubal	35	40	25	100

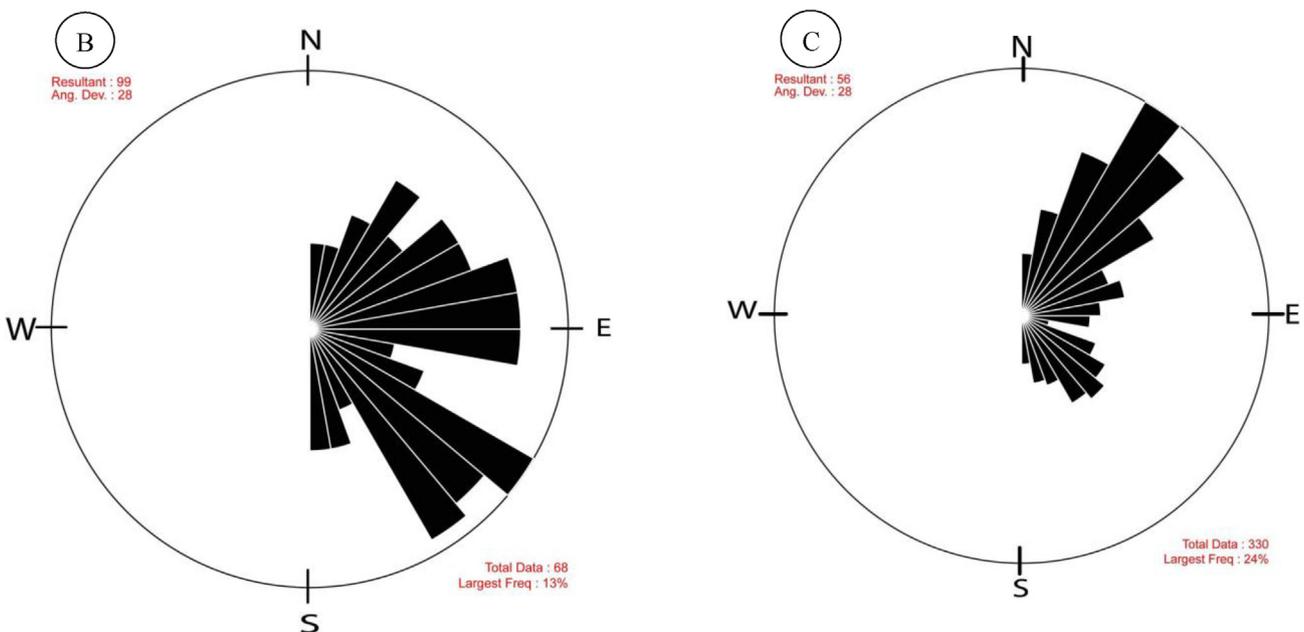
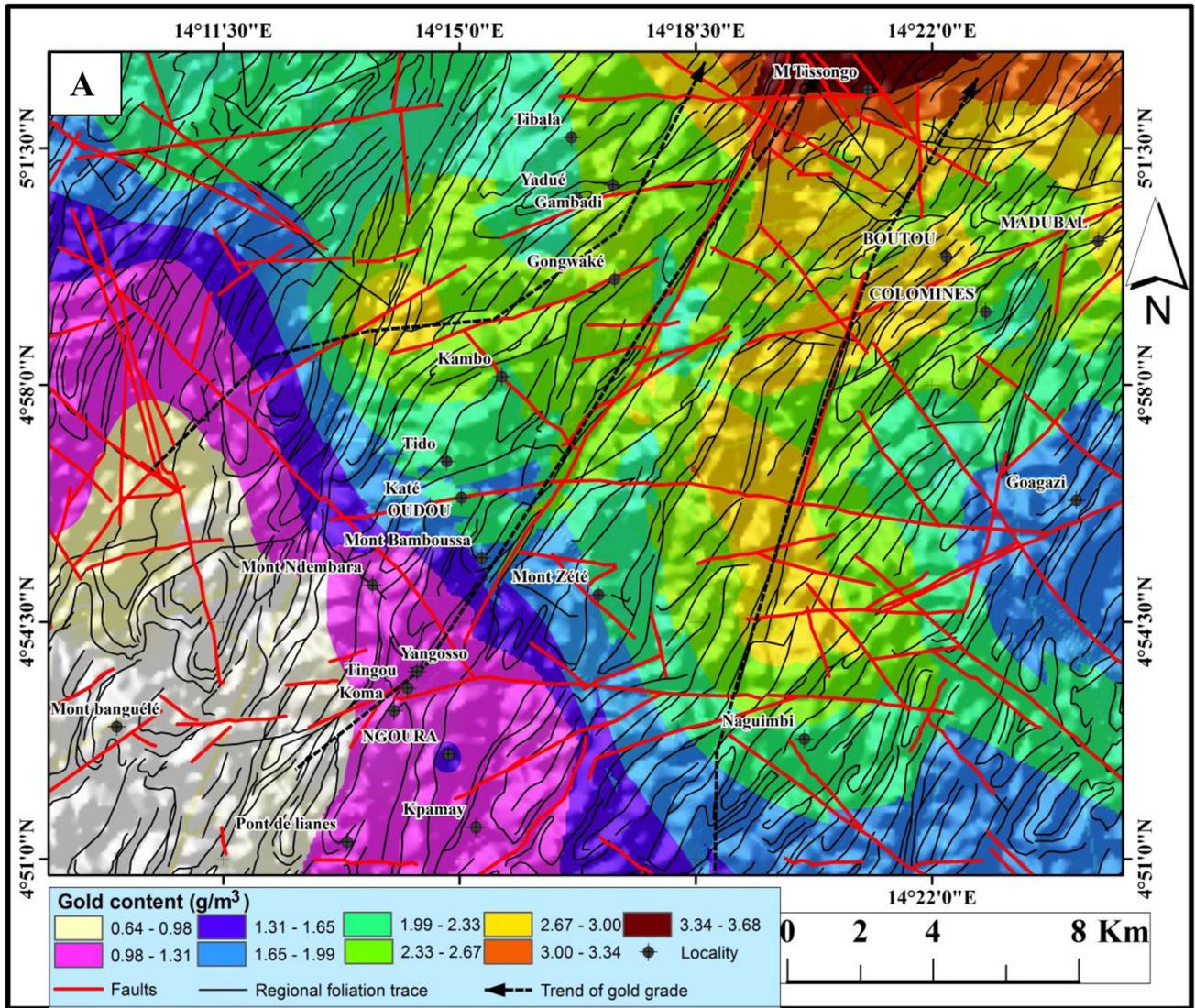


Fig. 15. Relation between gold content distribution and tectonic (A) and associated directional rosette for fault (B) and regional foliation trace (C).

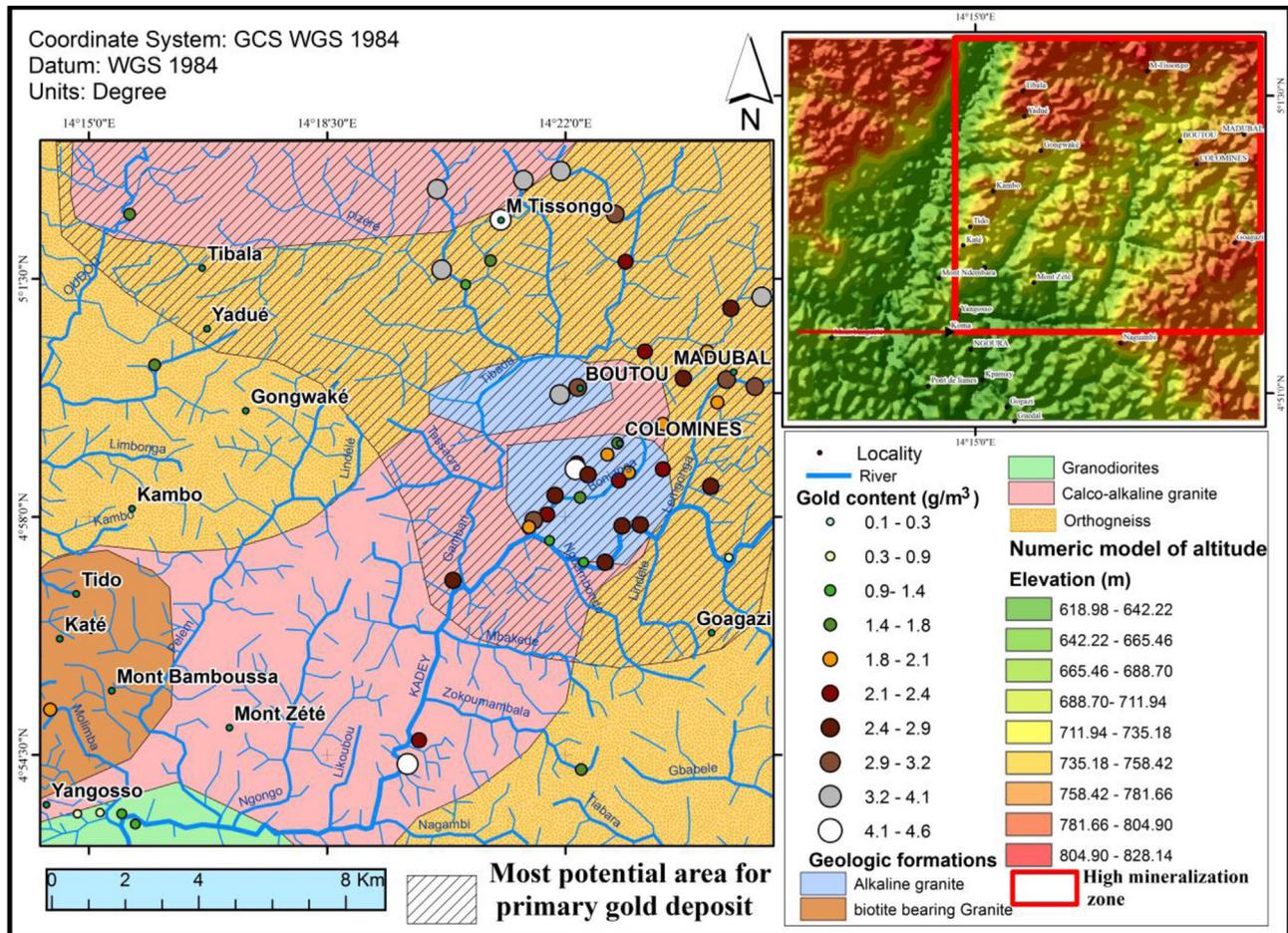


Fig. 16. Superposition of the digital model (NMA), drainage pattern, gold content, and lithology of the Colomines area.

- (1) Three main statistical classes of the gold content with concentration ranging from  $0.1$  to  $1.78 \text{ g}/\text{m}^3$ ,  $1.78$ – $2.91 \text{ g}/\text{m}^3$  and  $2.91$ – $4.60 \text{ g}/\text{m}^3$  respectively for class 1, class 2 and class 3, have been reported. Class 2 and class 3 are mainly concentrated close to Colomines village, while class 1 is widespread with the most concentration around the Ngoura village.
- (2) The spatial continuity of the gold content, gradual and targeted increase in gold concentration groups essentially concentrated in the NE-SW direction and exceptionally E-W ensuring good spatial continuity in these different directions.
- (3) Both mineralized and gangue layer thicknesses show randomly spatial distribution, and there is no correlation between these parameters and the gold content.
- (4) The size and morphology of gold particles from Tissongo and Madubal areas indicated the proximity of primary mineralization from which originated the gold.
- (5) The most prospective area for primary lode gold deposit has been identified. This area comprises Colomines, Madubal and Tissongo villages.

### Acknowledgements

The data presented here form a part of the senior author's Ph.D thesis supervised by S. Ganno and J.P. Nzenti at the University of Yaoundé I, Cameroon. We gratefully acknowledge the associate Editor, Prof. Herald G. Dill, Dr Mohamad Nur Heriawan and one anonymous reviewer for their critical and constructive comments

of the manuscript. This is the contribution of ICGP-Y 646 project.

### References

- Agterberg, F.P., 1975. Spatial clustering and lognormal size distribution of Volcanogenic Massive sulphide deposits in the Bathurst area. *Geol. Surv. Canada* 169–173, 15–1C.
- Agterberg, F.P., 1984. Use of spatial analysis in mineral resource evaluation. *J. Int. Assoc. Math. Geol.* 16 (6), 565–589.
- Agterberg, F.P., 2013. Fractals and spatial statistics of point patterns. *J. Earth Sc.* 24 (1), 1–11.
- Agterberg, F.P., Cheng, Q.M., Wright, D.F., 1993. Fractal modeling of mineral deposits. In: Elbrond, J., Tang, X. (Eds.), *Application of Computers and Operations Research in the Mineral Industry. Proceedings of 24th APCOM Symposium*, Montreal 1, pp. 143–153.
- Asaah, A.V., Zoheir, B., Lehmann, B., Frei, D., Burgess, R., Suh, C.E., 2015. Geochemistry and geochronology of the ~620 Ma gold-associated Batouri granitoids. *Cameroun. Int. Geol. Rev.* 57 (11–12), 1485–1509.
- Blenkinsop, T.G., Sanderson, D.J., 1999. Are gold deposits in the crust fractals? A study of gold mines in the Zimbabwe craton. *Geol. Soc. Lond. Spec. Publ.* 155 (1), 141–151.
- Blenkinsop, T., 2014. Scaling Laws for the distribution of gold, geothermal, and gas resources. *Pure Appl. Geophys.* 172 (7), 2045–2056.
- Carlson, C.A., 1991. Spatial distribution of ore deposits. *Geology* 19 (2), 111–114.
- Carranza, E.J.M., 2009. Controls on mineral deposit occurrence inferred from analysis of their spatial pattern and spatial association with geological features. *Ore Geol. Rev.* 35 (3–4), 383–400.
- Castaing, C., Feybesse, J.L., Thiéblemont, D., Triboulet, C., Chèvremont, P., 1994. Palaeogeographical reconstructions of the Pan-African/Brasiliano Orogen: closure of an oceanic domain or intracontinental convergence between major blocks? *Precambrian Res.* 69, 327–344.
- Cheng, Q.M., Agterberg, F.P., 1995. Multifractal modeling and spatial point processes. *Math. Geol.* 27 (7), 831–845.
- Cressie, N., 1990. The origins of kriging. *Math. Geol.* 22 (3), 239–252.
- David, M., 1988. *Handbook of Applied Advanced Geostatistical Ore Reserve*

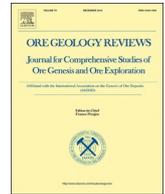
- Estimation. Elsevier, Amsterdam, p. 216.
- Davis, J.C., 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*, second ed. John Wiley & Sons, New York, p. 289.
- Edou Minko, A., Colin, F., Trescases, J.J., Lecomte, P., 1992. Alteration lateritique du gite aurifere d'Ovala (Gabon) et formation d'une anomalie superficielle de dispersion. *Miner. Deposita* 27, 90–100.
- ESRI, 2005. *Utilisation D'ArcMap*, p. 600.
- Fuanya, C., Yongue, F.T., Kankeu, B., 2014. Geological study of gold indices at Ako'ozam, Akom II region (south Cameroon). *Sci. Technologies et Développement* 15, 98–106.
- Gazel, J., Gerard, G., 1954. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500000, feuille de Batouri-Est avec notice explicative. *Mémoire Direction des Mines et de la Géologie*, p. 43. Yaoundé, Cameroun.
- Gratton, Y., Prieur, L., Ingram, R.G., Lafleur, C., 2002. Les courants en mer d'Alborán Est pendant la campagne Almofront-I. *Rapport interne. INRS-ETE*.
- Gumiel, P., Sanderson, D.J., Arias, M., Martin-Izard, A., 2010. Analysis of the fractal clustering of ore deposits in the Spanish Iberian Pyrite Belt. *Ore Geol. Rev.* 38 (4), 307–318.
- Heriawan, M.N., Koike, K., 2008. Uncertainty assessment of coal tonnage by spatial modeling of seam structure and coal quality. *Int. J. Coal Geol.* 76, 217–226.
- Journel, A.G., Huijbregts, Ch. J., 1978. *Mining Geostatistics*. Academic Press Inc, p. 760.
- Kankeu, B., Greiling, R.O., Nzenti, J.P., 2009. Pan-African strike-slip tectonics in eastern Cameroon-magnetic fabrics (AMS) and structure in the Lom basin and its gneissic basement. *Precambrian Res.* 174, 258–272.
- Knight, J.B., Morison, S.R., Mortensen, J.K., 1999. The relationship between placer gold particle shape, rimming, and distance of fluvial transport as exemplified by gold from the Klondike District, Yukon Territory, Canada. *Econ. Geol.* 94, 635–648.
- Krige, D.G., 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *J. Chem. Metal. Min. Soc.* 52, 119–139.
- Lisitsin, V., 2015. Spatial data analysis of mineral deposit point patterns: applications to Exploration Targeting. *Ore Geol. Rev.* 71, 861–881.
- Mamuse, A., Porwal, A., Kreuzer, O., Beresfordet, S., 2009. A new method for spatial centrographic analysis of mineral deposit clusters. *Ore Geol. Rev.* 36 (4), 293–305.
- Matheron, G., 1963. Principles of geostatistics. *Econ. Geol.* 58, 1246–1266.
- Milési, J.P., Toteu, S.F., Deschamps, Y., Feybesse, J.L., Lerouge, C., Cocherie, A., Tchameni, R., Moloto-A-Kenguemba, G., Kampunzu, H.A.B., Nicol, N., Duguey, E., Leistel, J.M., Saint-Martin, M., Ralay, F., Henry, C., Doumnang Mbaigane, J.C., Chêne, F., Monthel, J., Boutin, P., Rolin, P., 2004. Geology and Major Ore Deposits of Central Africa. BRGM, Orléans.
- Perry, G.L.W., 2004. SpPack: spatial point pattern analysis in Excel using visual basic for applications (VBA). *Environ. Model. Software* 19 (6), 559–569.
- Raines, G.L., 2008. Are fractal dimensions of the spatial distribution of mineral deposits meaningful? *Nat. Resour. Res.* 17 (2), 87–97.
- Soba, D., 1989. Thèse de doctorat d'Etat. La série du Lom: étude géologique et géochronologique d'un bassin volcanosédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est du Cameroun, vol. 6. Université Pierre et Marie Curie Paris, p. 198.
- Suh, C.E., Lehmann, B., Mafany, G.T., 2006. Geology and geochemical aspects of lode gold mineralization at Dimako- Mboscorro SE Cameroon. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 6, 295–309.
- Takodjou Wambo, J.D., Ganno, S., Afahnwie, N.A., Nomo, N.E., Mvondo, O.J., Nzenti, J.P., 2016. Use of Landsat 7 ETM+ data for the geological structure interpretation: case study of the Ngoura Colomines area, Eastern Cameroon. *J. Geosci. Geomatics* 4 (3), 61–72.
- Takodjou Wambo, J.D., 2017. *Structural Study and Evaluation of the Gold Potential in Ngoura-colomines (East Region - Cameroon)*. Unpublished Master thesis. University of Bamenda, p. 113.
- Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J., Michard, A., 2001. New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on the pre-Pan-African history of central Africa. *Precambrian Res.* 108, 45–73.
- Townley, B.K., Héral, G., Maksaev, V., Palacios, C., de Parseval, P., Sepulveda, F., Orellana, R., Rivas, P., Ulloa, C., 2003. Gold grain morphology and composition as an exploration tool: application to gold exploration in covered areas. *Geochem. Explor. Environ. Anal.* 3, 29–38.
- Vishiti, A., 2009. *Primary and Eluvial Gold in the Batouri North Gold District, Southeastern Cameroon*. Unpublished M.Sc. thesis. University of Buea, p. 75.
- Webster, R., Oliver, M.A., 2001. *Geostatistics for Environmental Scientists. Statistics in Practice*. Wiley, Chichester, p. 265.
- Youngson, J., Craw, D., 1999. Variation in placer style, gold morphology, and gold particle behaviors down gravel bed-load rivers: an example from the Shotover/Arrow-Kawarau-Clutha river system, Otago, New Zealand. *Econ. Geol.* 94, 615–634.
- Zhou, F., Huai-Cheng, G., Yun-Shan, H., Chao-Zhong, W., 2007. Scientometric analysis of geostatistics using multivariate methods. *Scientometrics* 73 (3), 265–279.
- Zuo, R.G., Cheng, Q.M., Agterberg, F.P., et al., 2009. Evaluation of the uncertainty in estimation of metal resources of skarn tin in Southern China. *Ore Geol. Rev.* 35, 415–422.



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

## Ore Geology Reviews

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/oregeorev](http://www.elsevier.com/locate/oregeorev)

# Identifying high potential zones of gold mineralization in a sub-tropical region using Landsat-8 and ASTER remote sensing data: A case study of the Ngoura-Colomines goldfield, eastern Cameroon



Jonas Didero Takodjou Wambo<sup>a,\*</sup>, Amin Beiranvand Pour<sup>b</sup>, Sylvestre Ganno<sup>a,\*</sup>, Paul D. Asimow<sup>c</sup>, Basem Zoheir<sup>d</sup>, Rodrigo dos Reis Salles<sup>e</sup>, Jean Paul Nzenti<sup>a</sup>, Biswajeet Pradhan<sup>f,g</sup>, Aidy M. Muslim<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Department of Earth Sciences, University of Yaounde I, P.O. Box 812, Yaounde, Cameroon

<sup>b</sup> Institute of Oceanography and Environment (INOS), Universiti Malaysia Terengganu (UMT), 21030 Kuala Nerus, Terengganu, Malaysia

<sup>c</sup> Division of Geological and Planetary Sciences, California Institute of Technology, Pasadena, CA 91125, USA

<sup>d</sup> Department of Geology, Faculty of Science, Benha University, Benha, Egypt

<sup>e</sup> University of Campinas, Institute of Geosciences, Cid. Univ. Zeferino Vaz, Barão Geraldo, Campinas, SP, Brazil

<sup>f</sup> Centre for Advanced Modelling and Geospatial Information Systems (CAMGIS), Faculty of Engineering and Information Technology, University of Technology Sydney, 2007 New South Wales, Australia

<sup>g</sup> Department of Energy and Mineral Resources Engineering, Choongmu-gwan, Sejong University, 209 Neungdong-ro Gwangjin-gu, Seoul 05006, Republic of Korea

## ARTICLE INFO

## Keywords:

Landsat-8

ASTER

Hydrothermal alteration

Gold exploration

Sub-tropical region

Eastern Cameroon

## ABSTRACT

Climatic conditions and vegetation constrain the use of optical satellite imagery as an exploration tool for hydrothermal ore mineralization in tropical and subtropical regions. In this investigation, Landsat-8 and ASTER satellite imagery were used to detect hydrothermal alteration zones associated with gold mineralization in the Ngoura-Colomines region, Eastern Cameroon. The study area contains several gold-bearing quartz veins associated with zones of pyritization, muscovite/sericite, iron oxides, and silicification. Principal Component Analysis (PCA), Independent Component Analysis (ICA), and specialized spectral band ratios were used to extract spectral information related to vegetation, iron oxide/hydroxide minerals, Al-OH, Fe-Mg-OH, carbonate group minerals, and silicification using Landsat-8 data at regional scale. Linear Spectral Unmixing (LSU) algorithm was implemented to ASTER VNIR + SWIR bands for detailed discrimination of hematite, jarosite, kaolinite, muscovite, chlorite and epidote at district scale. The Automated Spectral Hourglass (ASH) technique was employed to extract reference spectra directly from the ASTER bands for producing fraction images of end-members using the LSU. A comprehensive field survey was used to verify the remote sensing results. Petrographic study, X-ray diffraction analysis and reflectance spectroscopy indicated the presence of quartz, goethite and sericite, as well as the absorption features of Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>, Al-OH, OH/H<sub>2</sub>O and SiO<sub>2</sub> in the alteration zones. Several hydrothermal alteration zones of iron oxide/hydroxide, clay, carbonate minerals and silicification zones were identified, which are spatially associated with known mining areas and gold occurrences in the study area. High potential prospects were also delineated, including the Ngoura-Colomines prospects and the newly discovered Yangamo-Ndatanga and Taparé-Tapondo prospects in the southwestern and southeastern parts of the study area. Consequently, satellite-based mineral prospectivity maps at regional and district scales were generated for the study area by implementing the fuzzy logic model to the most informative thematic layers derived from image processing results. The satellite-based prospectivity maps are reliable for exploration of new gold prospective zones in the Ngoura-Colomines goldfield.

## 1. Introduction

Orogenic Au and porphyry Cu-Au systems are generally associated with hydrothermal alteration zones. Alteration mapping is therefore one of

the most important techniques in the reconnaissance stage of exploration for mineral resources related to such systems (Mars and Rowan 2010; Mars and Rowan, 2011; Duuring et al., 2012; Gabr et al., 2015; Zoheir et al., 2017; Abdelnasser et al., 2018; Pour et al., 2018a,b,c,d; Noori et al., 2019;

\* Corresponding authors.

E-mail addresses: [jonasdidero@gmail.com](mailto:jonasdidero@gmail.com) (J.D. Takodjou Wambo), [sganno2000@gmail.com](mailto:sganno2000@gmail.com) (S. Ganno).

<https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103530>

Received 19 February 2019; Received in revised form 14 February 2020; Accepted 7 April 2020

Available online 08 April 2020

0169-1368/ © 2020 Elsevier B.V. All rights reserved.

Sheikhrhimi et al., 2019; Bolouki et al., 2020). The effective management of natural resources is enhanced when detailed geological information from many sources is available, yet the efforts of exploration geologists are generally hampered by the difficulty, cost, access limits, and both natural and human risks inherent in surveying large areas. The resulting shortage of information demands a means for extrapolation and interpolation as part of any mapping model. Satellite remote sensing is an essential low-cost solution for identifying, mapping, and collecting reliable information on prospective or target areas and, indeed, advanced remote sensing data has been widely applied for identification and mapping of surface mineralogy in areas of suitable exposure (van der Meer et al., 2012; Pour et al., 2013, 2014; Salles et al., 2016; Salem et al., 2016; Pour et al., 2019a,b,c; Abubakar et al., 2019; Bolouki et al., 2020).

It is well-documented that hydrothermal alteration minerals associated with orogenic Au and porphyry Cu-Au deposits can be identified by advanced multispectral and hyperspectral imaging in the visible and near-infrared (VNIR) and short-wave infrared (SWIR) regions (Kauffmann, 1988; Fraser, 1991; Abrams, 2000; Ranjbar et al., 2004; Andrews-Deller, 2006; Ducart et al., 2006; Zhang et al., 2007; Gabr et al., 2010; Liu et al., 2011; Bedini, 2011; Amer et al., 2016; Pour et al., 2013, 2014, 2018a,b,c,d; Zoheir et al., 2017; Rajendran and Nasir, 2017; Abdelnasser et al., 2018; Liu et al., 2018; Noori et al., 2019; Sheikhrhimi et al., 2019; Bolouki et al., 2020). In particular, the hydrothermal alteration halos associated with ore deposits display absorption features of  $\text{Fe}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$ , Al-OH, Mg-OH, Si-OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  (Abrams and Hook, 1995; Carranza and Hale, 2002; Deller, 2006; Galvão et al. 2005; Vicente and Filho, 2011; Liu et al., 2011; Ducart et al., 2016; Pour et al., 2013, 2014; Pour and Hashim, 2015a,b, 2019a-c). However, in regions of heavy vegetation cover, mixing of vegetation with exposed mineralogy influences remote discrimination of mineral content.

Landsat-8 and the Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer aboard the Terra spacecraft (ASTER) multispectral imagery offer wavelength bands that may be sensitive to the alteration minerals in heavy vegetation cover. Although ASTER has two bands (denoted 2 and 3) specific to green vegetation (chlorophyll absorption), but it is poorly designed for measuring dry vegetation because it senses only the lignin band at  $\sim 2.3 \mu\text{m}$ , which overlaps many mineral absorptions (e.g. carbonate, chlorite, and amphibole), and not the sharp cellulose absorption at  $\sim 2.08 \mu\text{m}$ . Consequently, it may be easier to unmix vegetation and mineral information in ASTER spectra in a tropical region where most of the vegetation is green and dry vegetation is rare (Cudahy et al., 2016). Although Landsat-8 has fewer spectral bands than ASTER, Landsat-8 offers bands that are ideal for isolating dry vegetation, green vegetation, and bare soil components (Guerschman et al., 2015). Landsat-8 data have been successfully used for identifying hydrothermal alteration minerals (iron oxides, hydroxyl-bearing minerals, and carbonate-bearing minerals) at the regional scale (Pour and Hashim, 2015a; Pour et al., 2018a,b,c; Liu et al., 2018; Abdelnasser et al., 2018). Integrated use of both Landsat-8 and ASTER spectral data is an underutilized approach that might prove optimal for mapping alteration mineral groups (including Fe-oxides, Al and Mg hydroxides, and phyllosilicates) in sub-tropical settings.

The Ngoura-Colomines area is located in an inter-tropical environment in the eastern region of Cameroon and has a strong potential for gold deposits (Figs. 1 and 2). Active gold extraction from the three main gold mining districts in eastern Cameroon targets mineralization of both quartz veins and altered wall-rock (Suh et al., 2006; Tata et al., 2018). The gold-bearing quartz veins are surrounded by alteration haloes featuring silicified/ferruginized and mylonitic zones (Suh et al., 2006; Vishiti, 2009; Asaah et al., 2015; Takodjou Wambo et al., 2016, 2017, 2018). Alteration in these zones is characterized by silicification, hematization, muscovite-illite formation (sericitization), and pyritization (Suh et al., 2006; Tata et al., 2018). Multispectral remote sensing analysis has not yet been applied in this area, but it has the potential to detect altered (possibly gold-bearing) wall-rocks, to constrain their spatial distribution, and to

guide exploration for both wall-rock-hosted and primary vein gold mineralization. Identification of hydrothermal alteration zones associated with a known gold occurrence in the Ngoura-Colomines goldfield can provide a critical proof-of-concept for a combined remote sensing and focused field survey approach to mapping the spatial distribution of new prospects. Therefore, the main objectives of this research are: (i) to process and analyze multispectral Landsat-8 and ASTER images to optimize sensitivity of the maps to hydrothermal alteration minerals associated with gold mineralization in a highly vegetated sub-tropical region; (ii) to perform a comprehensive field survey and laboratory analysis to verify correlations between the Landsat-8 and ASTER spectral signatures and hydrothermal alteration zones associated with gold mineralization; and (iii) to generate prospectivity maps and specifically identify high-probability prospects in the Ngoura-Colomines goldfield at regional and district scales for future gold exploration.

## 2. Geologic setting

The Ngoura-Colomines area is situated within the North Equatorial Fold Belt of the Central African Orogen, a major Neoproterozoic orogen linked to the Trans-Saharan belt of western Africa and the Brazilian Orogen of northeastern Brazil (Fig. 1). Ngoura-Colomines is located in eastern Cameroon and extends between latitudes  $4^{\circ}50'02''$  and  $5^{\circ}03'33''$  N and longitudes  $14^{\circ}08'23''$  and  $14^{\circ}25'02''$ E (Fig. 2). The area falls within the so-called 'Southern Cameroonian Plateau', at elevations from 550 to 850 m. Previous geological investigations have recognized gneiss and migmatite intruded by syn- to post-tectonic granite and granodiorite (Takodjou Wambo et al., 2016, 2017, 2018; Ngatcha et al., 2019).

The high precipitation and humidity of the setting have led to extensive replacement of primary minerals in exposed rocks by assemblages of secondary minerals, including hematite, goethite, kaolinite and residual quartz. Such lateritization has formed extensive iron and aluminum oxides accumulation at the top of the paleosol profile, resulting in the formation of ferricretes (iron crust or duricrust) (Butt and Zeegers, 1992; Osei and Singh, 1999). Most of the exposed surface in the study area is therefore rich in iron/hydroxide minerals, which may be expected to dominate the remote sensing mapping results (Galvão et al., 2005; Deller, 2006).

Gold deposits in Cameroon are mainly found in the eastern half of the country and are confined to NE-SW trending shear zones in three recognized fields (Suh et al., 2006; Takodjou Wambo et al., 2018) (Fig. 2). (1) The Bétaré-Oya district contains gold in quartz veins striking  $N30^{\circ}E-N40^{\circ}E$  and gently dipping  $35^{\circ}$  north. The veins occur in brecciated and locally silicified meta-volcanic and metasedimentary rocks, intruded by post-tectonic mafic and felsic magmas of unknown age. Gold is hosted in a sequence of biotite schists, sericite-chlorite schists, quartzites, and phyllites locally known as the Lom series (Soba, 1989; Kankeu et al., 2009). (2) The Batouri district extends southwards into the Congo Craton. Here, primary gold mineralization is related to structurally controlled discordant quartz veins/veinlets (Vishiti, 2009; Asaah et al., 2015; Takodjou Wambo et al., 2018), weathering profiles and altered wall-rock restricted to shear zones that cut across Pan-African I-type granites. These auriferous veins are highly fractured, often foliated, have variable thicknesses along strike, and at fine scale consist of networks of anastomosing veinlets of quartz  $\pm$  gold  $\pm$  hematite  $\pm$  sulphide  $\pm$  carbonate  $\pm$  goethite with wall-rock selvages of sericite alteration (Asaah et al., 2015; Tata et al., 2018). (3) The Boden district, which includes the current study area, is characterized by a large complex of late- to post-tectonic calc-alkaline to alkaline granite plutons (Takodjou Wambo et al., 2016; Takodjou Wambo et al., 2018). The early granite plutons are deformed at their margins. Gold is found along NE-trending zones of shearing in quartz veins and pegmatite dikes transecting the plutons (Suh et al., 2006; Takodjou Wambo et al., 2018).

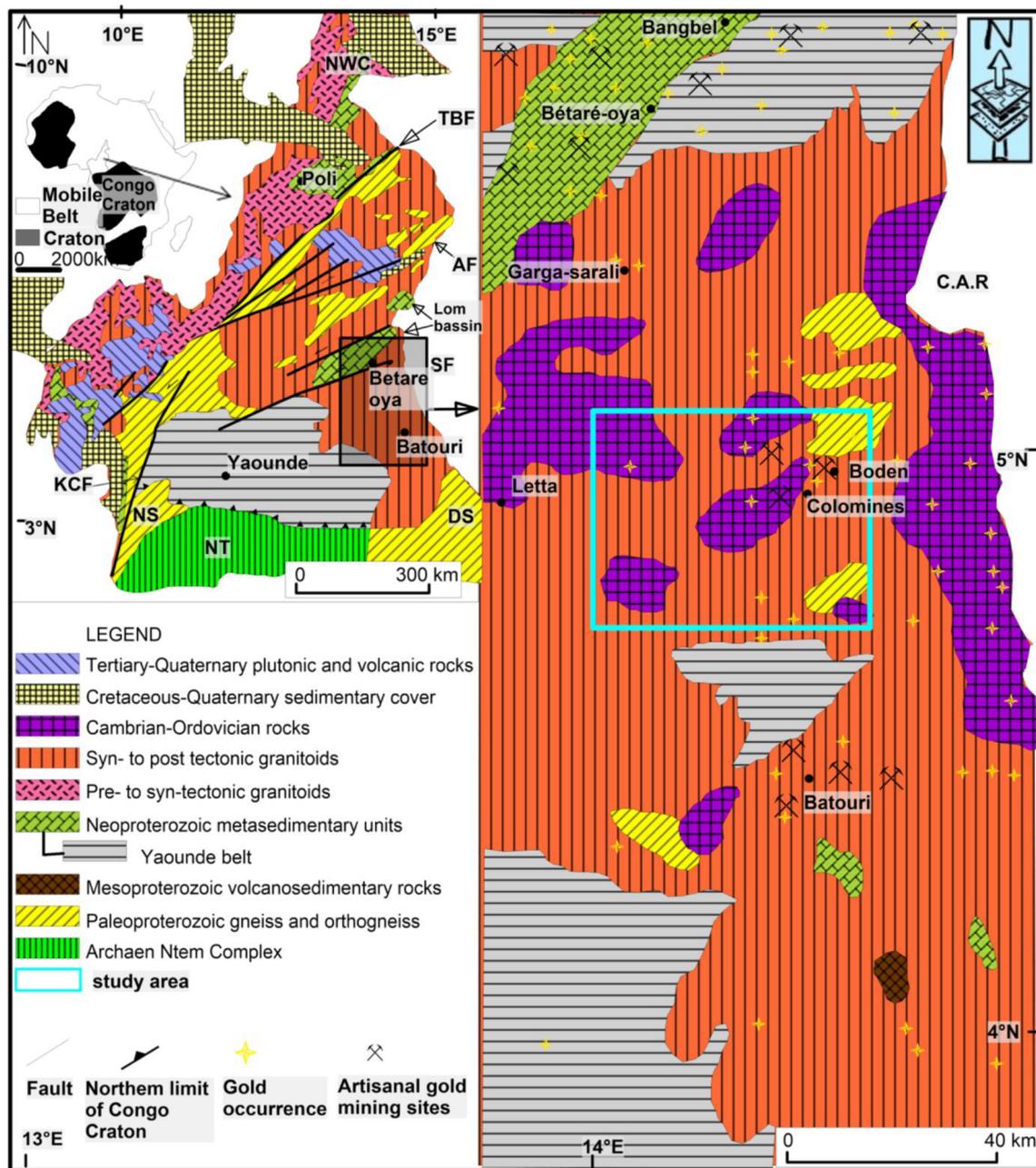


Fig. 1. Geology of southeastern Cameroon. (a) Geological map of Cameroon (modified after Toteu et al., 2001). The Central African Shear Zone is defined by a system of NE-trending faults including the Tchollire-Banyo Fault (TBF), the Adamawa Fault (AF), the Sanaga Fault (SF), and the Kribi-Campo Fault (KCF). The inset map of the African continent shows the location of Cameroon relative to the distribution of cratons and mobile belts. (b) Regional geological map of southeastern Cameroon showing artisanal gold mining sites and other reported gold indications (modified after Milési et al., 2004).

### 3. Data and samples

Various types of geospatial data were selected for this study: (i) Landsat-8 images, (ii) ASTER images, (iii) the Batouri East 1:500,000 scale geologic map (Gazel and Gerard, 1954), and (iv) a 1:200,000 topographic map spanning the study area. Fieldwork was carried out in the Ngoura-Colomines, Boden, Madoubal, and Guiwa-Yangamo localities of eastern Cameroon in order to refine the local geological map and to collect a systematic suite of representative rock samples for laboratory analysis. The field survey method was designed around the difficulty of searching for basement outcrops in an area of thick soil cover. After a systematic grid survey for rock outcrops, each identified outcrop was photographed from various angles with scale, orientation and GPS location metadata. Structural measurements then documented

the orientation, extent, and character of structural features and mineralized veins. Finally, the samples were characterized *in situ* before being carefully extracted and labeled. Because the geology of Ngoura-Colomines is largely unknown, sampling was not limited to areas of known gold occurrence, but rather covered the whole Ngoura-Colomines area. Most of the samples were obtained from the surface of the outcrops. Overall, 53 rock samples were collected for petrographic studies and prepared as polished thin sections. Mineral identification used both transmitted and reflected light microscopy at the laboratory of Petrology and Structural Geology of the University of Yaoundé I. Four representative samples of the alteration zones and one fresh sample were selected for further study and powdered in a tungsten carbide shatterbox.

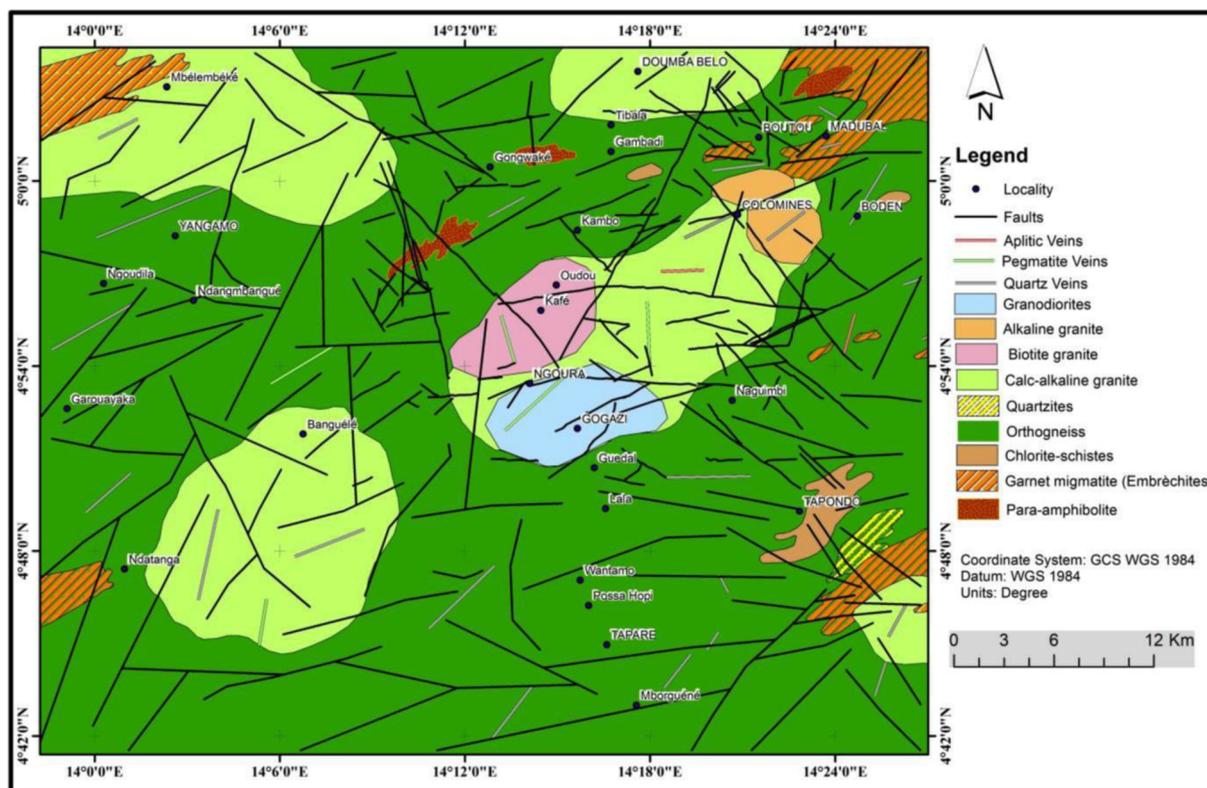


Fig. 2. Geologic map of the Ngoura-Colomines area, updated based on combined field-based and remote sensing methods (modified from Gazel and Gerard, 1954; Takodjou et al., 2018).

### 3.1. Landsat-8 remote sensing data

Landsat-8 images combined information from the OLI and TIRS sensors. The OLI collects spectral data in nine bands: band 1-blue (0.43–0.45 μm), band 2-blue (0.45–0.51 μm), band 3-green (0.53–0.59 μm), band 4-red (0.64–0.67 μm), band 5-near infrared (0.85–0.88 μm), band 6-shortwave infrared (1.57–1.65 μm), band 7-shortwave infrared (2.11–2.29 μm), band 8-panchromatic (0.50–0.68 μm), and band 9-cirrus (1.36–1.38 μm). The OLI bands have 30 m spatial resolution (except for band 8, with 15 m resolution). The TIRS collects two thermal bands, bands 10 (10.60–11.19 μm) and 11 (11.50–12.51 μm), with 100 m spatial resolution. Landsat-8 data are acquired in 185 km swaths and segmented into 185 × 180 km scenes appropriate for regional geological mapping (Irons et al., 2012; Roy et al., 2014). Table 1 shows the characteristics of the Landsat-8 satellite. Landsat-8 data have a high signal-to-noise ratio and 12-bit quantization of the data that permit measurements of subtle variability in surface reflectance (Irons et al., 2012).

### 3.2. ASTER remote sensing data

The ASTER sensor consists of three separate subsystems: visible and near infrared (VNIR) with has three bands (0.52 to 0.86 μm; 15 m spatial resolution), shortwave infrared (SWIR) with six bands (1.6 to 2.43 μm; 30 m spatial resolution), and thermal infrared (TIR) with 5 bands (8.125 to 11.65 μm; 90 m spatial resolution). ASTER has 60 km swath width and is segmented into 60x60 km<sup>2</sup> scenes, useful for geological mapping at district scale (Abrams, 2000; Yamaguchi et al., 2001; Abrams et al., 2004). The characteristics of ASTER data are shown in Table 2.

## 4. Methods

### 4.1. Pre-processing of the data

A Landsat-8 level 1 T (terrain corrected) image covering the study area

Table 1

Technical characteristics of the Landsat-8 satellite.

Sensors	Subsystem	Band Number	Spectral Range (μm)	Ground Resolution (m)	Swath Width (km)
OLI	VNIR	1	0.433–0.453	30	185
		2	0.450–0.515		
		3	0.530–0.590		
		4	0.640–0.670		
		5	0.850–0.880		
	SWIR	6	1.570–1.650		
		7	2.100–2.290		
		Pan	0.500–0.680	15	
		9	1.360–1.380		
TIRS	TIR	10	10.60–11.19	100	
		11	11.50–12.51		

Abbreviations: Operational Land Imager (OLI), Thermal Infrared Sensor (TIRS), visible near-infrared (VNIR), short-wave infrared (SWIR), thermal-infrared (TIR) (Irons et al., 2012; Roy et al., 2014)

was obtained through the U.S. Geological Survey Earth Resources Observation and Science Center (EROS) (<http://earthexplorer.usgs.gov>). The image was acquired on 30 March 2017. The scene cloud cover was 6.25%. Likewise, an ASTER level 1 T (Precision Terrain Corrected Registered At-Sensor Radiance) scene (AST\_L1T\_00303052007093157) covering the study area was acquired from EROS (<http://glovis.usgs.gov/>). It is a cloud-free day-time scene, acquired on 5 March 2007. The ASTER Level 1 T data contains calibrated at-sensor radiance, which corresponds to the ASTER Level 1B, that has been geometrically corrected and rotated to a north up UTM projection ([https://lpdaac.usgs.gov/data-set\\_discovery/aster/aster\\_products\\_table/ast\\_11t](https://lpdaac.usgs.gov/data-set_discovery/aster/aster_products_table/ast_11t)). Both images were georeferenced to UTM zone 33 North map projection using the WGS84 datum (Irons et al., 2012; Roy et al., 2014). Atmospheric correction was applied to the Landsat-8 data using Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube (FLAASH) algorithm (Cooley et al., 2002) with Mid-Latitude

**Table 2**  
Technical characteristics of ASTER data.

Subsystem	Band	Spectral range(μm)	Radiometric resolution	Absolute accuracy	Resolution	Dynamic range
VNIR	1	0.52–0.60	NE Δρ ≤ 0.5%	≤ 4%	15 m	8 bits
	2	0.63–0.69				
	3N	0.78–0.86				
	3B	0.78–0.86				
SWIR	4	1.600–1.700	NE Δρ ≤ 0.5%	≤ 4%	30 m	8 bits
	5	2.145–2.185	NE Δρ ≤ 1.3%			
	6	2.185–2.225	NE Δρ ≤ 1.3%			
	7	2.235–2.285	NE Δρ ≤ 1.3%			
	8	2.295–2.365	NE Δρ ≤ 1.0%			
	9	2.360–2.430	NE Δρ ≤ 1.3%			
TIR	10	8.125–8.475	NE ΔT ≤ 0.3 k	≤ 3 K(200–240 K)	90 m	12 bits
	11	8.475–8.825		≤ 2 K(240–270 K)		
	12	8.925–9.275)		≤ 1 K(270–340 K)		
	13	10.25–10.95		≤ 2 K(340–370 K)		
	14	10.95–11.65				

Band number 3 N refers to the nadir pointing view, whereas 3B designates the backward pointing view. (Fujisada, 1995; Yamaguchi et al., 1999).

Summer atmospheric and Tropospheric aerosol models (Research Systems, Inc, 2008). During the atmospheric correction, raw radiance data from the imaging spectrometer is re-scaled to reflectance units. The deep-blue band (band 1), panchromatic band (band 8) and cirrus cloud band (band 9) of Landsat-8 were not used in this study. Crosstalk correction was performed on the ASTER data (Iwasaki and Tonooka, 2005). The remote sensing datasets were processed using the ENVI (Environment for Visualizing Images) version 5.2 and ArcGIS version 10.3 software packages.

#### 4.2. Image analysis

In general, multispectral remote sensing data contain a high degree of inter-correlation due to natural spectral correlation, topographic slope, and aspect and overlap of spectral sensitivities between adjacent spectral bands. Therefore, specialized image processing approaches are essential for extracting significant information and spectral signatures of hydro-thermal alteration assemblages within a highly vegetated background. To accomplish this objective, Principal Component Analysis (PCA), Independent Component Analysis (ICA), and specialized band ratio techniques were applied to the Landsat-8 data at the pixel level and Linear Spectral Unmixing (LSU) algorithm ASTER data at the sub-pixel level. Successively, the most informative thematic layers of the alteration zones were fused using fuzzy logic modeling to generate mineral prospectivity maps of the study area at regional and district scales.

##### 4.2.1. PCA and ICA analysis

PCA is a multivariate statistical technique that selects uncorrelated linear combinations (Eigenvector loadings) of variables in such a way that each component successively extracts a linear combination with a smaller variance (Singh and Harrison, 1985; Jolliffe, 2002; Jensen, 2005; Cheng et al., 2006; Gupta, 2017; Schowengerdt, 2007). Disposing of the first few,

highly-correlated but low-information content principal components typically leaves a small residue of the original variance that contains the significant information content of spectral signatures of desired minerals or mineral groups (Gupta et al., 2013). A PC image (that is, a map of the intensity of a particular principal component) with moderate to high eigenvector loading for indicative bands of a mineral with opposite signs often enhances that mineral (Loughlin, 1991). Positive loading in the reflection band of a mineral yields bright enhanced pixels related to that mineral, whereas negative loading in a reflection band leads to dark enhanced pixels related to the mineral (Crosta and Moore, 1989). Consequently, eigenvector loadings in each PCA will identify in which PC images a specific alteration mineral will yield bright or dark pixels (Gupta et al., 2013). The eigenvectors and eigenvalues were computed for eight OLI + TIRS bands of Landsat-8 (Table 3).

ICA is a statistical and computational technique for array processing and data analysis, aimed at recovering individual signals (or ‘sources’) from observed mixtures of the signals, exploiting only the assumption of mutual independence among the signals (Hyvarinen and Oja, 2000; Hyvärinen, 2013). It seeks signal combinations with the most non-Gaussian probability density functions (Hyvärinen et al., 2010; Shimizu, 2012). These are identified as the “independent components” (ICs) of the observations (Hyvärinen et al., 2001). It is superficially related to PCA and factor analysis but in many cases is more capable of isolating underlying factors or sources in cases with realistic noise and correlation structure in the data (Hyvärinen, 2005; Comon and Jutten, 2010). In this study, ICA was applied subsequent to PCA, using images PC1 to PC8 of Landsat-8. The PCA was used to give weight to the components and remove the correlation before applying ICA for revealing hidden factors. Therefore, this fusion has a great performance to identify the pixels containing the spectral signature of the alteration minerals or mineral groups that are maximally independent of each other (Pour et al., 2019b). Output bands

**Table 3**  
Eigenvector matrix for VNIR + SWIR + TIR bands of Landsat-8.

	Band 2	Band 3	Band 4	Band 5	Band 6	Band 7	Band 10	Band 11
PCA 1	0.08	0.10	0.16	0.12	0.50	0.69	0.15	0.14
PCA 2	0.14	0.18	0.24	-0.37	0.18	0.12	0.10	0.11
PCA 3	-0.35	-0.32	-0.30	0.11	0.49	0.08	-0.47	-0.44
PCA 4	0.33	0.38	0.40	-0.18	0.37	-0.50	-0.29	-0.24
PCA 5	-0.11	-0.21	-0.25	-0.09	0.52	-0.48	0.43	0.41
PCA 6	0.64	0.19	-0.72	-0.03	0.04	0.10	-0.13	0.04
PCA 7	0.08	-0.28	0.16	0.01	-0.01	0.00	-0.64	0.69
PCA 8	0.55	-0.73	0.23	0.03	-0.00	-0.00	0.18	-0.25

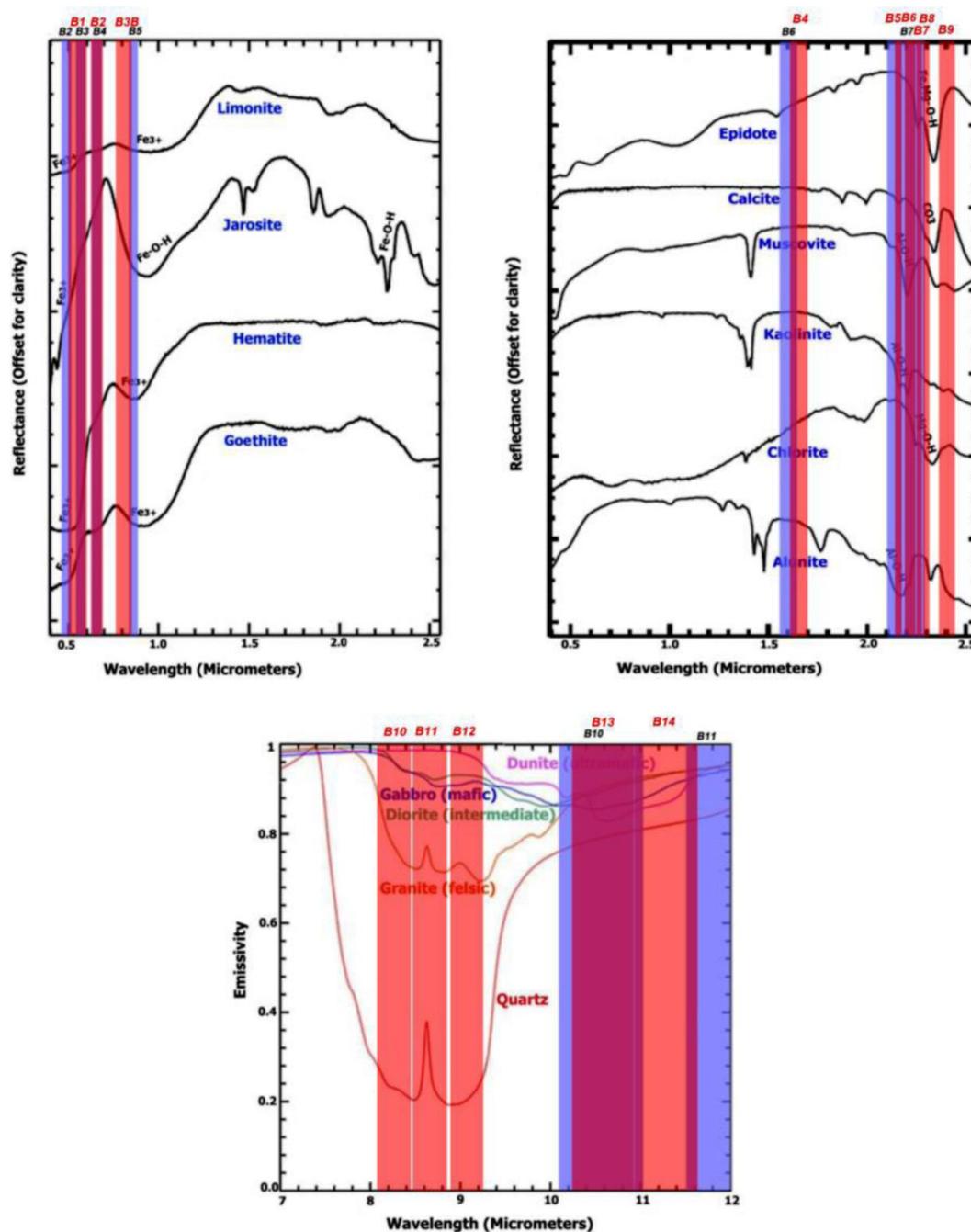


Fig. 3. (A) Laboratory reflectance spectra of iron oxide/hydroxide minerals (Clark et al., 1993) and the position of Landsat-8 bands 2–5 and ASTER bands 1–3 in the VNIR region. (B) Laboratory reflectance spectra of Al-OH and (Fe,Mg)-OH mineral groups (Clark et al., 1993) and the position of Landsat-8 bands 6–7 and ASTER bands 4–9 in the SWIR region. (C) Laboratory emissivity spectra of quartz, granite, diorite, gabbro and dunite (Ninomiya et al., 2005) and the position of Landsat-8 bands 10–11 and ASTER bands 10–14 in the TIR region.

were sorted by 2-dimensional (2-D) coherence, which measures the average of two auto-correlation coefficients, one with line offsets (y-direction) and the other with sample offsets (x-direction) (Research Systems, Inc, 2008). Components generated by IC rotation were analyzed based on statistical factors, 2-D scatter plots, and visually examination of output images.

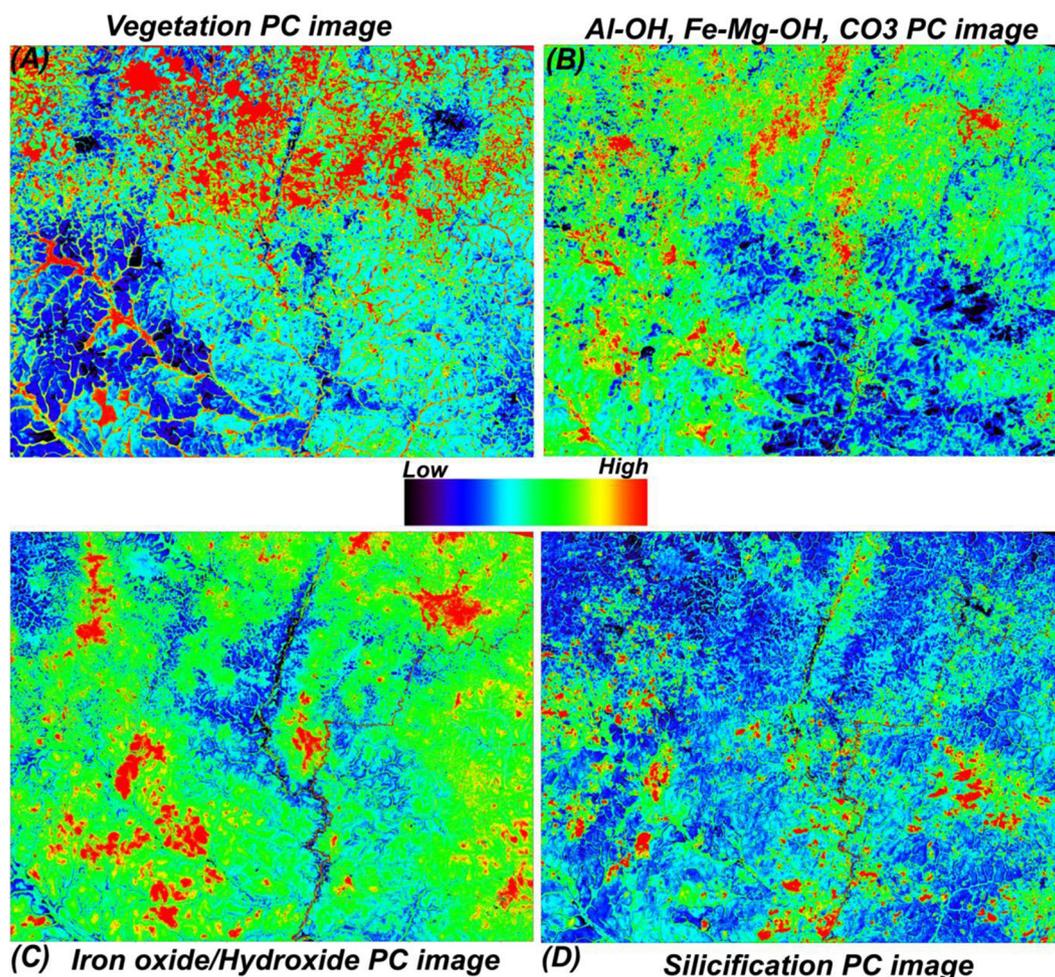
#### 4.2.2. Band ratios and combinations

Mathematical combinations of bands such as ratios and products are often useful for qualitative discrimination of lithological units and detection of alteration minerals (Inzana et al., 2003; Di Tommaso and Rubinstein, 2007; Rockwell and Hofstra, 2008; Mars and Rowan, 2011).

Spectral-band ratios or indices are known for their ability to eliminate, or at least to minimize, illumination differences due to topography (shading of the surface caused by solar illumination angle and slope orientation) (Colby, 1991), a major source of spurious information in raw images of rugged terrain. Moreover, Red-Green-Blue (RGB) color composite images can be readily prepared by combining three spectral-band ratios in a single image map, which facilitates interpretation of multichannel image data and brings out features that may be masked in single-channel images (Pohl and Van Genderen, 1998). Several band ratio and combination-based mineralogical indices were developed from consideration of the wavelength sensitivities of the Landsat-8 spectral bands and the spectral features of the target alteration minerals in this study (Pour et al., 2018c).

**Table 4**  
Fuzzification parameters for the input layers used in this analysis.

Fuzzy Operator	Membership Type	Detection	Input Layer	Data Origin
AND	Linear	Iron oxide/hydroxide minerals	PCA6	Landsat-8 Dataset
		Silicification	PCA7	
		Iron oxide/hydroxide minerals	ICA3	
		OH-minerals and Carbonates	ICA5	
		Silicification	ICA2	
Gamma ( $\gamma = 0.6$ )	Linear	Iron oxide/hydroxide minerals	BR: 4/2	ASTER Dataset
		OH-minerals and Carbonates	BR: 6/(7*7)	
		Silicification	BR: TRLI	
Gamma ( $\gamma = 0.6$ )	Linear	Hematite/Jarosite	n-D class #7, n-D class #8, n-D class #4	ASTER Dataset
		Muscovite/ Kaolinite	n-D class #3, n-D class #6, n-D class #2	
		Chlorite/Epidote	n-D class #1, n-D class #4	



**Fig. 4.** PC images derived from PCA of Landsat-8 data covering the study area. A pseudo-color ramp was applied to each image: (A) vegetation as red pixels in the PC1 image; (B) Al–OH, (Fe–Mg)–OH, and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> mineral groups as red pixels in the PC5 image; (C) iron oxide/hydroxide minerals as red pixels in the PC6 image; (D) silicification (high quartz content) as red pixels in the PC7 image.

Limonite, goethite, jarosite, and hematite (Iron oxide/hydroxide minerals) tend to have diagnostic absorption features in the VNIR region (0.4 to 1.1 μm) due to charge transfer and crystal-field processes (Fig. 3A) (Hunt, 1977; Hunt and Ashley, 1979; Morris et al., 1985; Sherman and Waite, 1985). Charge transfer absorbs in the range 0.48–0.72 μm, whereas crystal-field absorption occurs in the range 0.63–0.72 μm for ferrous iron and 0.85–1.0 μm for ferric iron (Morris et al., 1985; Sherman and Waite, 1985; Murphy and Monteiro, 2013; Noda and Yamaguchi, 2017). Landsat-8 bands 2, 3, 4, and 5 and ASTER bands 1, 2 and 3 are in the relevant range for these absorptions (Fig. 3A). Abrams et al. (1983) used the 3/1

band ratio of the older Landsat Thematic Mapper (TM) for mapping iron oxide minerals in the Helvetia-Rosemont copper mining district, southern Arizona, USA. Landsat-8 bands 2 (0.45–0.51 μm) and 4 (0.64–0.67 μm) are equivalent with Landsat TM bands 1 and 3, respectively. Hence, a spectral-band ratio of 4/2 is expected to detect iron-rich minerals in Landsat-8 data. Two more complex definitions of the Fe-minerals Index (Fe-MI), Landsat-8 (band 6 / band 5) × (band 4 / band 3) introduced by Pour et al. (2018c) were also tested and compared with the simpler Landsat-8 4/2 band ratio result in this study.

SWIR bands of Landsat-8 could be used for identification of

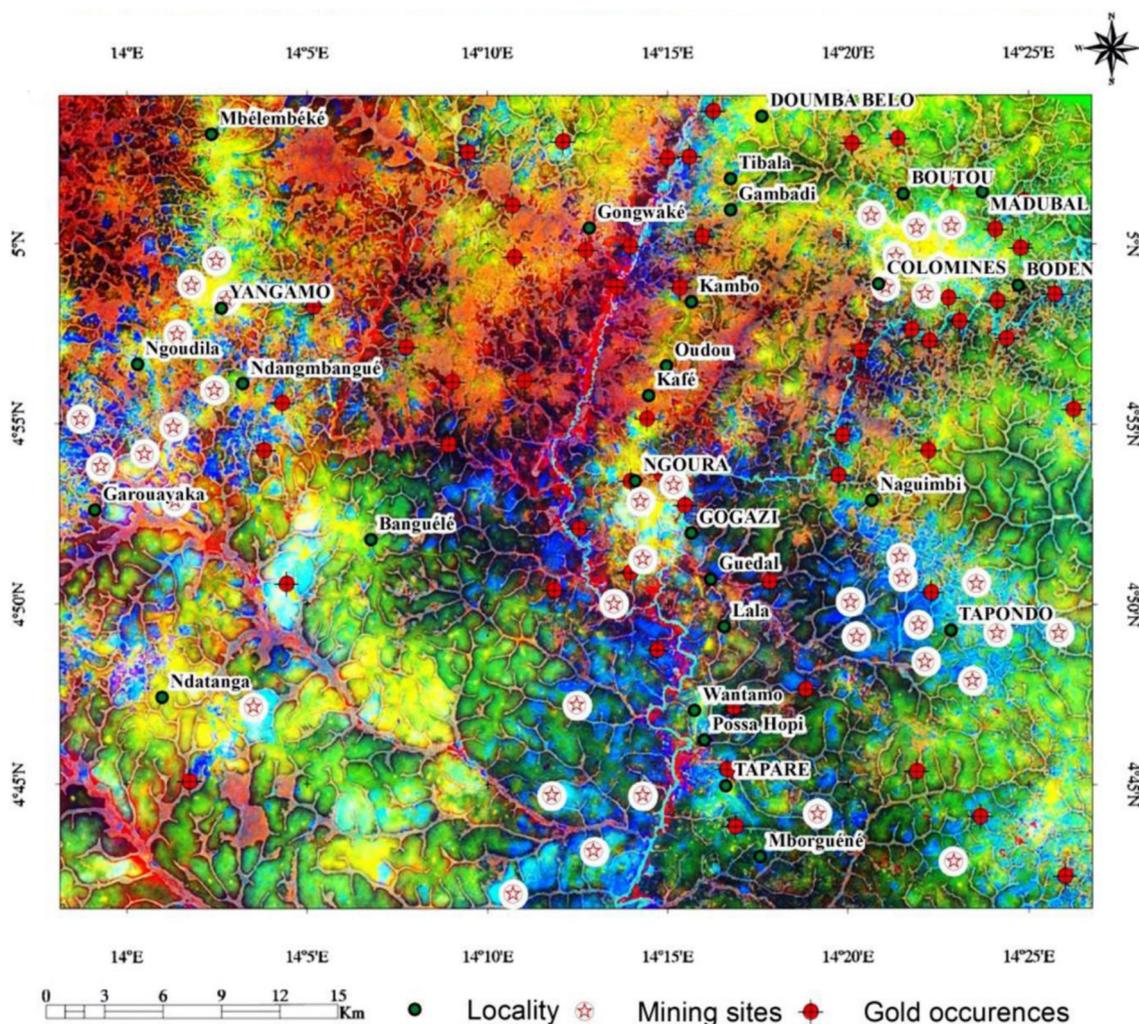


Fig. 5. RGB color composite of the PC5, PC6, and PC7 images from the Landsat-8 PCA. (A) RGB classification map overlay, showing a clear view of the alteration zones. (B) RGB classification map with overlay of map coordinates and known mining sites and gold occurrences.

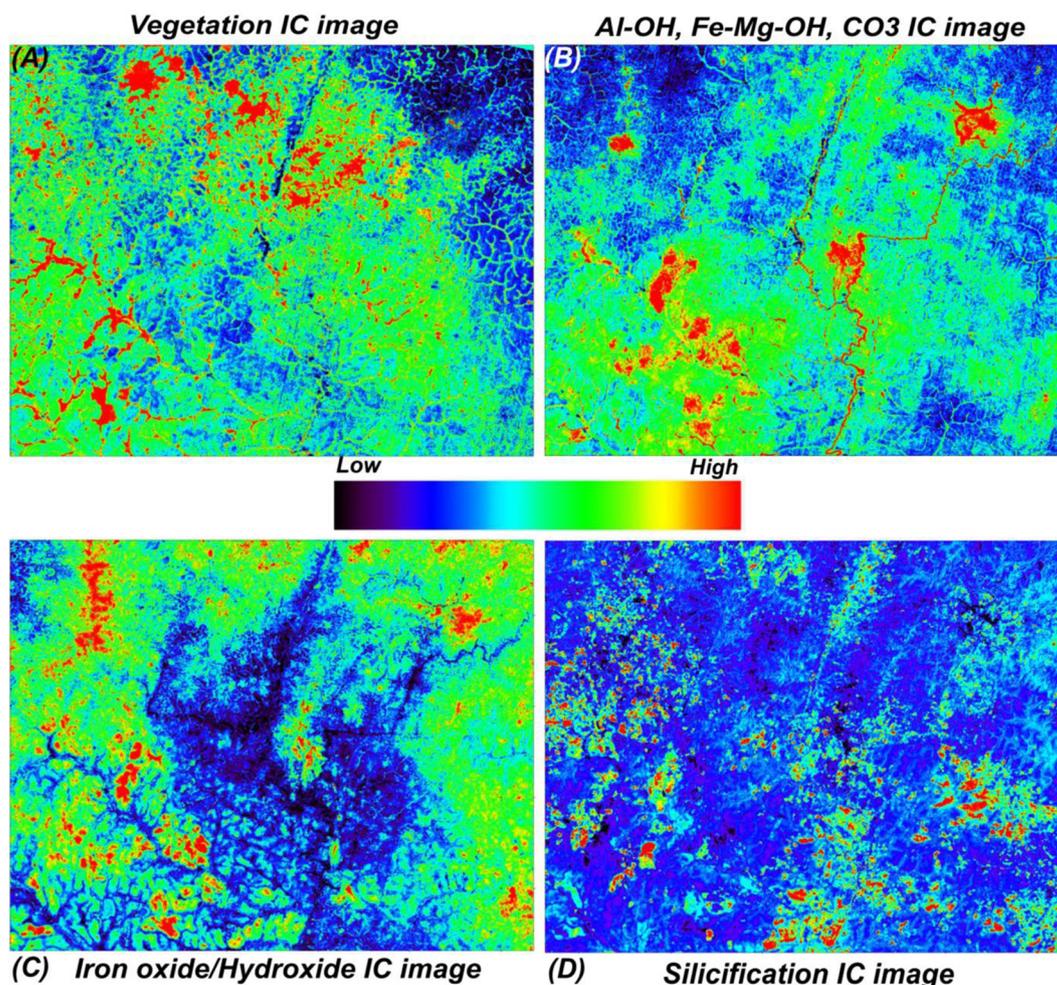
Hydroxyl-bearing (Al-OH and (Fe,Mg)-OH) and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups. Clay and carbonate minerals contain spectral absorption features at 2.1–2.4  $\mu\text{m}$  and reflectance features at 1.55–1.75  $\mu\text{m}$  (Hunt, 1977; Hunt and Ashley, 1979; Huntington, 1996), coinciding with bands 7 (2.11–2.29  $\mu\text{m}$ ) and 6 (1.57–1.65  $\mu\text{m}$ ) of Landsat-8, respectively (Fig. 3B). Hence, the detection of clay and carbonate minerals should be enhanced using the complementary features of these minerals in these two bands, suggesting the use of the 6/7 band ratio. We compare this result to the Al-OH-bearing alteration minerals Index (Al-OH-MI), band 6 / (band 7  $\times$  band 7), suggested Pour et al. (2018c).

ASTER SWIR bands may have sufficient spectral resolution to distinguish among the spectral signatures of advanced argillic, sericitic, and propylitic alteration zones (Ninomiya, 2003; Mars and Rowan, 2011). Advanced argillic alteration forms kaolinite and alunite, with an Al-OH absorption feature at 2.17  $\mu\text{m}$  in ASTER band 5. Sericite (muscovite) has an intense Al-OH absorption feature centered at 2.20  $\mu\text{m}$ , coinciding with ASTER band 6. The propylitic zone forms epidote, chlorite and calcite, exhibiting Mg-OH absorption features at 2.35  $\mu\text{m}$  in ASTER band 8 (Fig. 2B, see Table 2). The Landsat TM 4/5 band ratio (0.83/1.65  $\mu\text{m}$ ) has been used for identification of unaltered rocks and common silicate minerals in the Silver Bell district, Arizona, USA (Abrams et al., 1983). The corresponding Landsat-8 bands are 5 (0.85–0.88  $\mu\text{m}$ ) and 6 (1.57–1.65  $\mu\text{m}$ ) suggesting that the Landsat-8 5/6 ratio should emphasize unaltered rocks and common silicate minerals. Likewise, the Landsat-8 based Radiance Lithology Index (TRLI), (band 10 + band 11)  $\times$  (band

11), of Pour et al. (2018c) is designed to bring out silicate minerals (Fig. 3C). Below we will choose combinations of these selected band ratios to generate enhanced RGB color combination images of Landsat-8 and ASTER data. These images reveal distinct zones of the study area interpreted as unaltered lithological units and as hydrothermal alteration zones of various kinds.

#### 4.2.3. Linear spectral Unmixing (LSU) algorithm

The LSU is a sub-pixel sampling algorithm, the reflectance at each pixel of the image is assumed to be a linear combination of the reflectance of each material (or end-member) present within the pixel (Boardman, 1989; Adams et al., 1993). The LSU is used to determine the relative abundance of end-members within a pixel based on the end-members' spectral characteristics. In this algorithm, it is assumed that the observed pixel reflectance can be modeled as a linear mixture of individual component reflectance multiplied by their relative proportions (Adams et al., 1995). In this analysis, the Automated Spectral Hourglass (ASH) technique was employed to extract reference spectra directly from the ASTER VNIR + SWIR bands for producing fraction images of end-members using the LSU. The ASH technique uses the spectrally over-determined data for finding the most spectrally pure pixels (end-members) to map their locations and estimates their sub-pixel abundances (Kruse and Perry, 2007). It includes several steps, namely: (i) the Minimum Noise Fraction (MNF); (ii) the Pixel Purity Index (PPI); and (iii) automatic end-member prediction from the n-Dimensional Visualizer (Boardman and Kruse, 2011). The continuum-



**Fig. 6.** IC images derived from ICA transformation of Landsat-8 data covering the study area. A pseudo-color ramp was applied each image: (A) vegetation as red pixels in the IC6 image; (B) Al–OH, (Fe,Mg)–OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups as red pixels in the IC5 image; (C) iron oxide/hydroxide minerals as red pixels in the IC3 image; (D) silicification (high quartz content) as red pixels in the IC2 image.

removal process was applied to the extracted end-members for isolating their spectral features and putting them on a level playing field so they may be intercompared. Continuum-removal and feature comparison is the key to successful spectral identification (Bishop et al., 2008). Masking procedure was executed to remove the vegetation during the LSU analysis.

#### 4.2.4. Fuzzy logic modeling

Fuzzy logic modeling is based on the fuzzy set theory, which was proposed by Zadeh (1965). It is a form of many-valued logic in which the truth values of variables may be any real number between 0 and 1 both inclusive (Novák et al., 1999). Fuzzy logic modeling has been successfully applied for mineral prospectivity mapping in metallogenic provinces (Carranza, 2008; Zhang et al., 2017; Kim et al., 2019). The application of fuzzy logic modeling for mineral prospectivity mapping normally includes three main feed-forward stages: (i) fuzzification of evidential data; (ii) logical integration of fuzzy evidential maps with the aid of an inference network and appropriate fuzzy set operations; and (iii) defuzzification of fuzzy mineral prospectivity output to aid its interpretation (Carranza, 2008). A set of fuzzy membership values is expressed in a continuous series from 0 to 1. This 0–1 scale, however, does not constitute a probability density function. Function-member values are established for each evidence map that will be integrated. In the fuzzy logic method, a total of sheet maps (fuzzy membership) based on the significance distance of features are weighted (for each pixel or spatial position, a particular weight between 0 and 1 is appointed) (Zimmermann and Zysno, 1980). Five operators that are useful for combining mineral exploration datasets

include the fuzzy AND, fuzzy OR, fuzzy algebraic product, fuzzy algebraic sum and fuzzy gamma (Bonham-Carter, 1994; Nykänen et al., 2008). In this study, the multiclass evidential image-maps were reclassified in 10 classes of equal interval and then were fuzzified using the linear membership function. The fuzzy AND operator was used for mapping the prospective areas at a regional scale using Landsat-8 alteration thematic input layers as well as at a district scale using ASTER thematic input layers. The fuzzy gamma operator was implemented for mapping the prospective areas at a district scale using ASTER alteration thematic input layers. After testing several values for the  $\gamma$  parameter, it was adjusted 0.60 for ensuring a flexible compromise between the fuzzy algebraic sum and the fuzzy algebraic product (Zimmermann and Zysno, 1980). Table 4 shows fuzzification parameters for the input layers used in this analysis.

#### 4.3. Ground truth

##### 4.3.1. X-ray diffraction analysis

The powdered samples were analyzed by powder X-ray diffraction (XRD) with a Philips X'Pert diffractometer located in the Materials Science Laboratory at the California Institute of Technology, Pasadena, California, USA (Caltech). Approximately 1 g of powder was spread on a 3 cm × 1 cm piece of tape on a glass slide, oriented parallel to the elongation of the slits in the X-ray optics. Monochromatic Cu radiation ( $K\alpha = 1.54060 \text{ \AA}$ ) radiation was generated by illuminating a Cu target with 40 mA of current at 45 kV accelerating potential. The goniometer was scanned from  $2\theta = 10$  to  $80^\circ$  with step size of  $0.017^\circ$ . Data collection time was 1 h for each

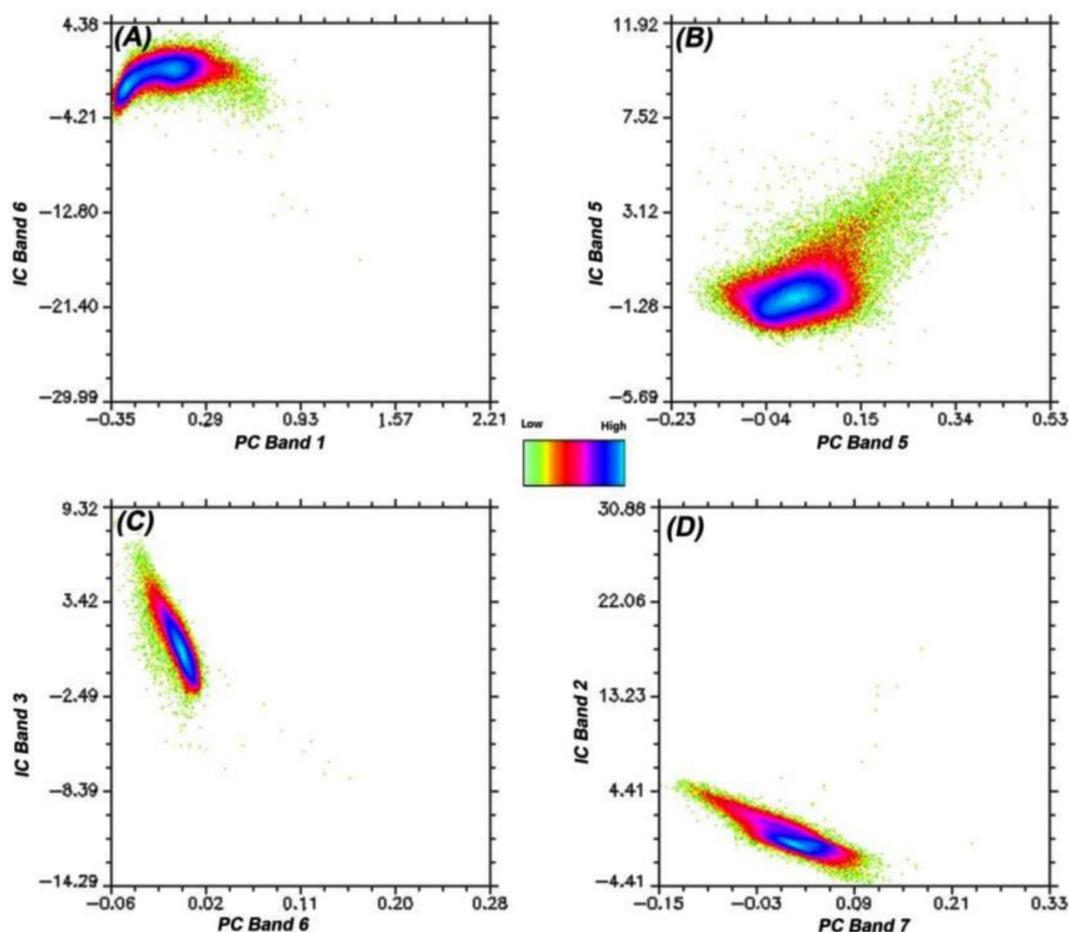


Fig. 7. 2-D scatter plots for IC and PC bands of Landsat-8 used for mapping desired geologic material classes in the study area. (A) IC band 6 and PC band 1 for vegetation; (B) IC band 5 and PC band 5 for Al–OH, (Fe,Mg)–OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups; (C) IC band 3 and PC band 6 for iron oxide/hydroxide minerals; and (D) IC band 2 and PC band 7 for silicification.

sample. Minerals were identified by reference to RRUFF project (<http://rruff.info>) reference patterns. Extremely strong preferential grain orientation of phyllosilicate flakes prohibited quantitative refinement of mineral proportions from peak intensities in these patterns, so interpretation is limited to mineral identification and qualitative assessment of relative proportions. This is sufficient to use the XRD results to check the basic identification of certain alteration minerals in satellite images covering the outcrops from which the representative samples were collected.

#### 4.3.2. Reflectance spectroscopy

The spectra of the powdered representative samples were measured using two instruments in the Planetary Spectroscopy Laboratory at Caltech. Visible to near-infrared reflectance spectra of the powdered samples (350 to 2500 nm wavelengths at 1 nm spectral resolution) were collected with a Malvern Panalytical ASD FieldSpec4 spectroradiometer. Near-to-thermal infrared spectra (2500 to 25000 nm wavelengths, equivalent to 400 to 4000  $\text{cm}^{-1}$ , equally spaced in wavenumber with 0.5  $\text{cm}^{-1}$  spectral resolution) were collected by averaging 250 scans in reflectance geometry in the main chamber of a Nicolet iS50 Fourier-Transform infrared (FT-IR) spectrometer. Absolute reflectance was not measured; the spectra should be interpreted in relative terms only.

## 5. Results

### 5.1. Remote sensing analysis

#### 5.1.1. PCA analysis

The analysis of statistical factors derived from PCA analysis of

Landsat-8 VNIR + SWIR + TIR bands (Table 3) shows that some of the PC images contain specific information that can be interpreted as maps of vegetation; iron oxide/hydroxide minerals; Al–OH, (Fe,Mg)–OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups; and silicification. Landsat-8 bands 1, 8, and 9 were not used in this study; Table 3 shows the eigenvector loadings of bands 2–7, 10, and 11 in each PC (Table 3). PC2 has moderate contributions of band 4 (0.24) and band 5 (-0.37) with opposite signs. Hence, Landsat PC2 enhances vegetation as a dark tone because of negative sign in the reflection band (band 5). The absorption feature of green vegetation from 0.45 to 0.68  $\mu\text{m}$  (Landsat-8 band 4, 0.640–0.670  $\mu\text{m}$ ) coupled with its high reflectance in the near-infrared around Landsat-8 band 5 (0.850–0.880  $\mu\text{m}$ ) (see Table 1). Additionally, the PC2 shows large eigenvalue of all the bands, reflecting that the highly variable amount of green vegetation coverage is the most obvious source of variance across the study area. The so-called PC2 rule image shows vegetation as bright pixels by negating the dark pixels, subsequently. Fig. 4A shows a pseudo-color ramp of the PC2 rule image, in which the tendency of vegetation to follow drainage systems and the concentrations of vegetation in the north-central and southwestern parts of the study area can be seen.

The magnitudes and signs of the eigenvector loadings for PC3 and PC4 (Table 3D) indicate that these PCs do not contain any distinctive strong contributions from the Landsat-8 bands expected to mark particular alteration minerals. It is likely these components are dominated by topographic contrast and other sources of variance in the image that are irrelevant to the discrimination task at hand. The PC5 shows strong contributions of bands 6 (0.52) and 7 (-0.48) with opposite signs (Table 3D). Hydroxyl-bearing clay and sulfate group minerals and

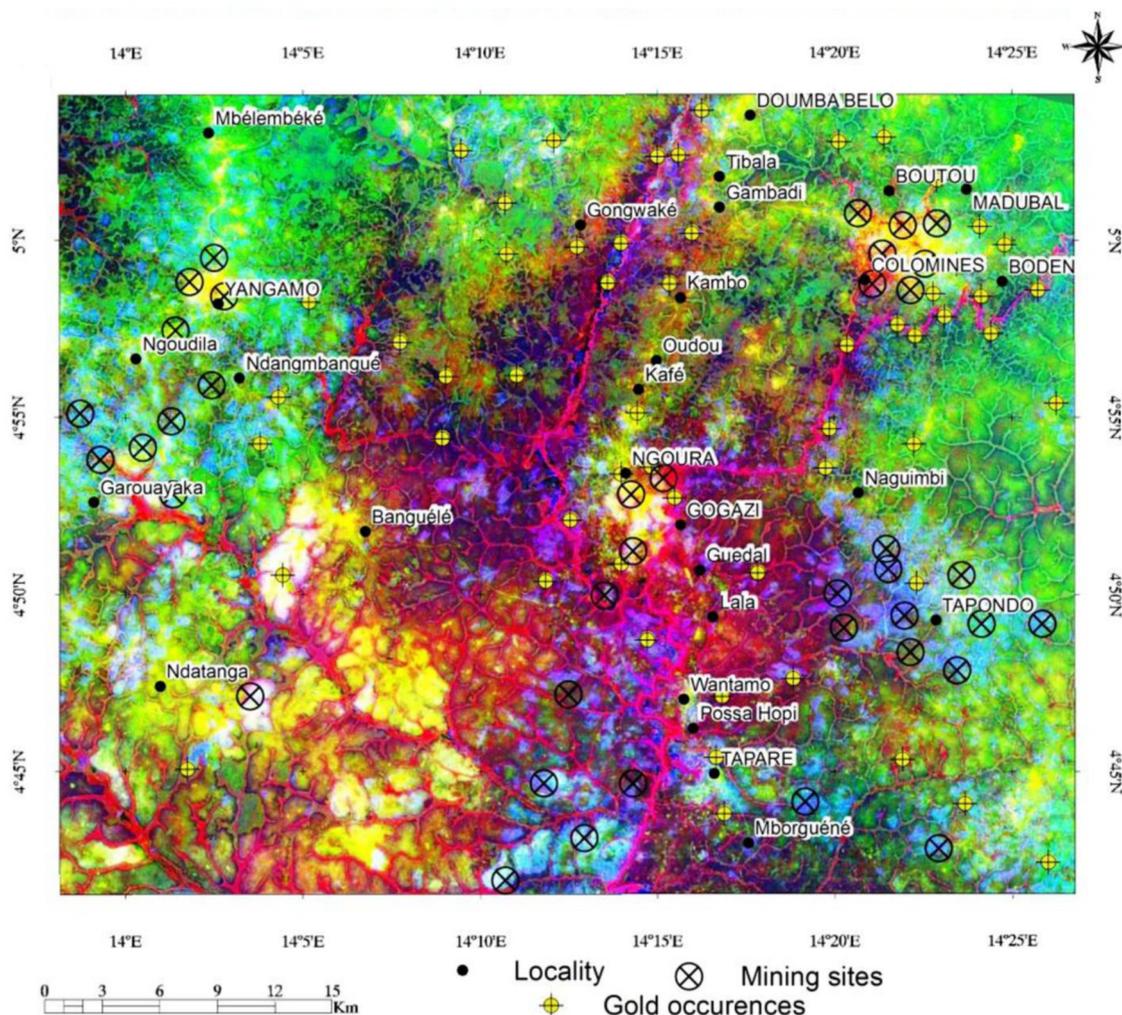


Fig. 8. RGB color composite of the Landsat-8 IC5, IC3 and IC2 images of the study area. (A) RGB classification map without overlay. (B) RGB classification map with overlay of map coordinates, mining sites and known gold occurrences.

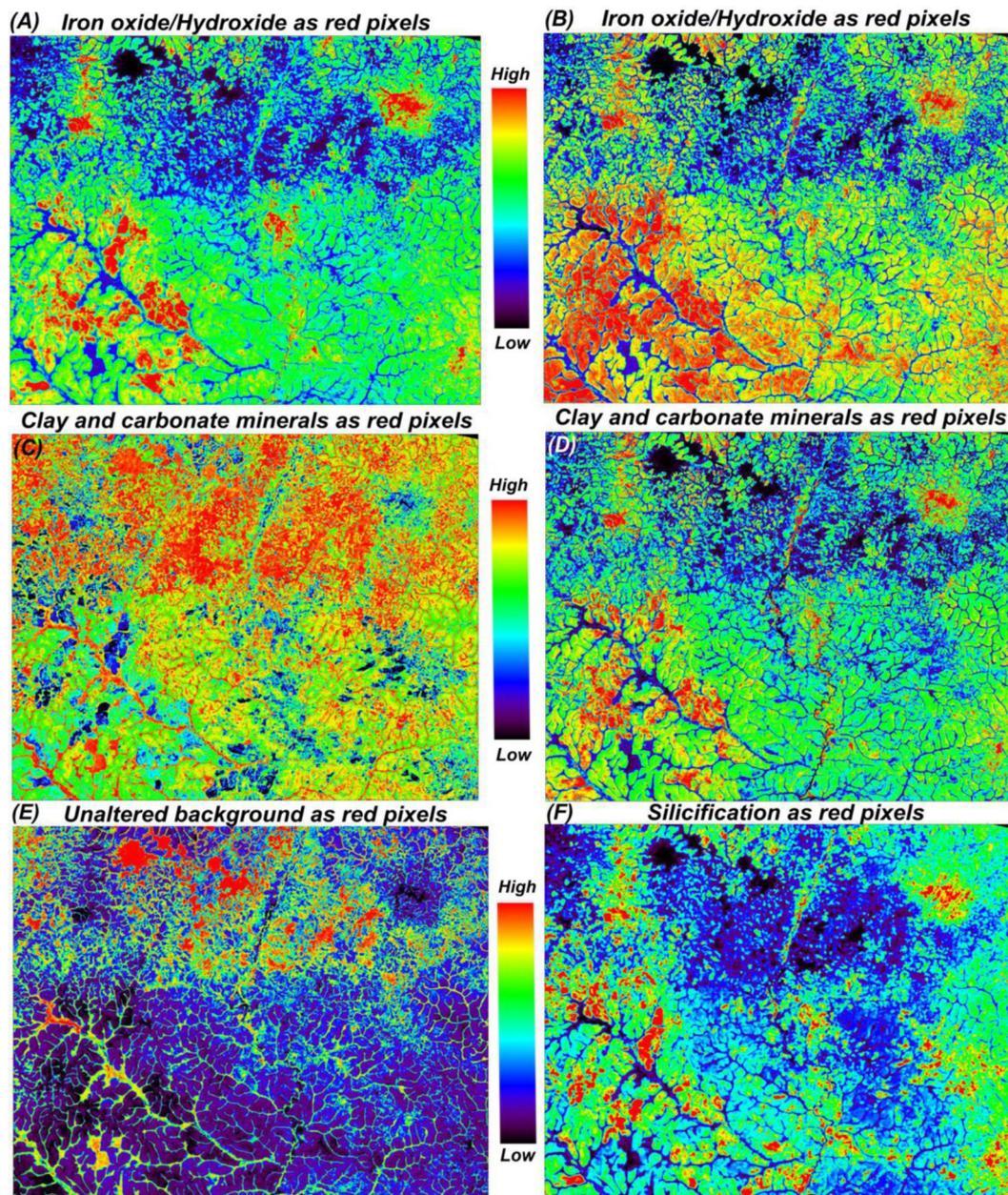
carbonate minerals are all highly reflective in Landsat-8 band 6 (1.57–1.65  $\mu\text{m}$ ) and strongly absorbing in Landsat-8 band 7 (2.11–2.29  $\mu\text{m}$ ) (Pour et al., 2018a,b,c). Therefore, the PC5 image is likely to show the surface distribution of clay and carbonate minerals as bright pixels due to positive sign in the reflection band (band 6). Fig. 4B displays the PC5 image as a pseudo-color ramp image. The zones contain high concentration of clay and carbonate minerals appear in the western, central north and northeastern parts of the scene.

The PC6 eigenvector has significant loading of bands 2 (0.64) and 4 (-0.72) with opposite signs (Table 3D). Iron oxide/hydroxide mineral groups exhibit strong absorption features in Landsat-8 band 2 (0.45–0.51  $\mu\text{m}$ ) and strong reflection in Landsat-8 band 4 (0.64–0.67  $\mu\text{m}$ ) (Pour et al., 2018a, b, c) (see Fig. 3A). As a result, the PC6 enhances iron oxide/hydroxide minerals in dark tones because of negative sign in the reflection band (band 4). Dark pixels in the PC6 image were inverted to bright pixels by multiplication to  $-1$ . Fig. 4C shows pseudo-color ramp image of the PC6. Iron oxide/hydroxides strongly concentrate in some zones in the western, central, northeastern and southeastern of the study area.

PC7 shows a strong contribution of bands 10 (-0.64) and 11 (0.69) with opposite signs. Bands 10 (10.60–11.19  $\mu\text{m}$ ) and 11 (11.50–12.51  $\mu\text{m}$ ) of the Landsat-8 TIRS instrument are capable of measuring spectral emissivity features of silicate minerals in the 10.60 to 12.51  $\mu\text{m}$  region (see Fig. 3C, see Table 1). The emissivity curve of silica-rich minerals shows significant minima at 8–9  $\mu\text{m}$  and higher values at 10–12  $\mu\text{m}$  (Lyon, 1972;

Salisbury and Walter, 1989). Thus, the PC7 image should show rocks with high emissivity (high quartz content) as dark pixels (due to negative sign in band 10) compared to rocks with moderate and low emissivity (low quartz content). Negation of PC7 forms an image in which silicification zones (with high quartz content) stand out as bright pixels; a pseudo-color ramp image of the negative of PC7 is shown as Fig. 4D. Concentration of silicification zones is typically mapped in the western, central south and eastern parts of the study area.

Although pseudo-color ramp images of one PC component at a (Fig. 4A-D) help to emphasize the abundance of target features and alteration minerals, even more information-rich maps can be generated red–greenblue (RGB) color composites of the PC5, PC6 and PC7 rule images. Fig. 5 forms a single color-based classification map of all the mapped groups of alteration minerals in the study area. Al–OH, (Fe, Mg–OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups appear as red, orange and yellow colors; iron oxide/hydroxide minerals are depicted as green, light green and yellow colors; and silicification zones manifest in blue and light blue (Fig. 5). In addition, to test the spatial relation of detected alteration mineral zones with known mining sites and gold occurrences in the study area, the latter are overlain on the RGB classification maps (Fig. 5). Results indicate that most of the exploited mining sites are associated with yellow (admixture of clay/carbonate and iron oxide/hydroxide minerals) and blue (silicification zones) pixels. However, gold occurrences are also distributed in regions of high-saturation green, red and blue pixels and along structural patterns and drainage systems.



**Fig. 9.** Landsat-8 band ratio and combination images of the study area. Pseudo-color ramp color mapping was applied to each image. (A) Band ratio 4/2; (B) band combination  $(6/5) \times (4/3)$ ; (C) band ratio 6/7; (D) band combination  $6/(7 \times 7)$ ; (E) band ratio 5/6; and (F) band combination  $(10 + 11) \times 11$ .

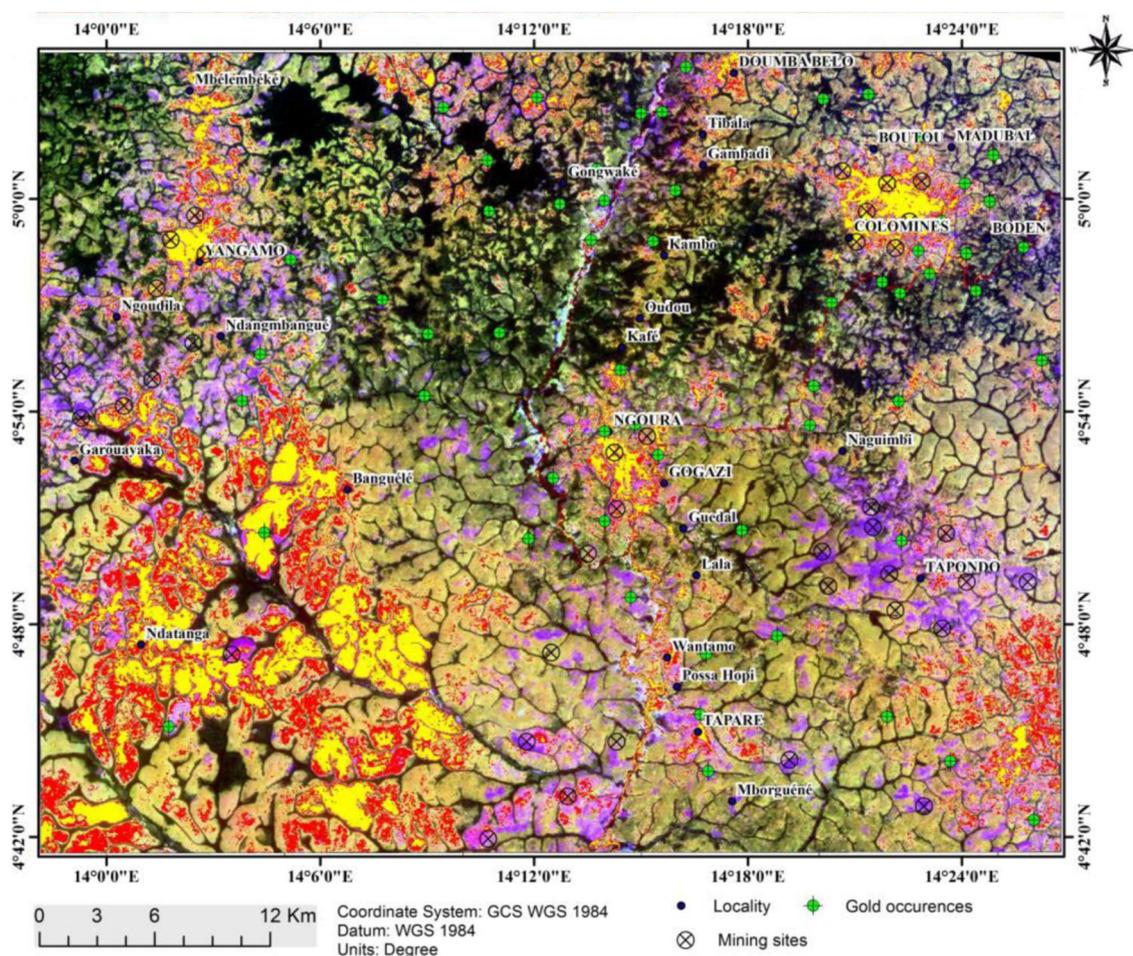
### 5.1.2. ICA analysis

ICA analysis was applied to the eight PC images resulting from the PCA of the Landsat-8 image in order to isolate maximally independent pixels related to alteration minerals. Comparison of the resultant IC images with PC images shows that IC6 isolates vegetation; IC3 isolates iron oxide/hydroxide minerals; IC5 isolates Al–OH, (Fe,Mg)–OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups; and IC2 isolates silicification. Fig. 6 shows pseudo-color ramp images of the IC rules for the Landsat-8 data. The geologic materials of interest appear as high Digital Number (DN) pixels in the IC images and they are visually stronger than PCs images (see Fig. 4). However, the distribution of high DN pixels for Al–OH, (Fe,Mg)–OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups is appeared much more concentrated in some zones in the IC5 image (compare Fig. 6B and Fig. 4B). Subsequently, we can quantify the relationship between ICA and PCA image data and try to identify spectral classes that correspond to distinct ground cover (pixel) classes using 2-D scatter plots.

Fig. 7 displays 2-D scatter plots for IC6 vs. PC1, IC5 vs. PC5, IC3 vs.

PC6, and IC2 vs. PC7. The 2-D scatter plot of IC band 6 vs. PC band 1 shows a good linear correlation and strong anisotropy in the center of the cloud, which contributes most to the variance (Pour et al., 2018a), (Fig. 7A). Both spectral classes in this plot have similar short-tailed shapes. We conclude that IC6 and PC1 are spectrally dependent on each other and both indicate a distinct geologic materials class (vegetation). Therefore, both the IC6 (Fig. 6A) and Landsat-8 PC1 images (Fig. 4A) map and discriminate vegetation cover in the study area, with the IC6 image map showing the clearest contrast. These maps allow us to discriminate highly vegetated areas from alteration zones and subsequently, despite the high abundance of the vegetation materials class, to focus on mineralogical alteration mapping for gold mineralization exploration in the study area.

The 2-D scatter plot for IC band 5 vs. Landsat-8 PC band 5 (Fig. 7B) shows a linear correlation between two spectral classes with long-tailed shapes. Both images map a common geologic spectral class. Comparison of the IC5 and PC5 images (see Fig. 6B and 4B) shows that the contrast



**Fig. 10.** RGB color combination image of the study area using Landsat-8 band ratios and combinations: red =  $4/2$ ; green =  $6/(7 \times 7)$ , the Al-OH-MI; blue =  $(10 + 11 \times)11$ , the TRLI. In this image, Al-OH, (Fe,Mg)-OH and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups appear red; iron oxide/hydroxide mineral groups appear yellow and and silicification appears violet.

and spatial distribution of pixels with high estimated abundance of Al-OH, (Fe,Mg)-OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups are stronger and more sharply defined in the IC5 image. Thus, the IC5 image appears most suitable for mapping these alteration phases. The 2-D scatter plot for IC band 3 vs. Landsat-8 PC band 6 show a linear correlation between two spectral classes with short-tailed shapes, confirming the visual impression of similarity between the IC3 (Fig. 6C) and PC6 (Fig. 4C) images. Both images effectively highlight the geologic spectral classes of iron oxide/hydroxide minerals. ICA in this case does not add a great deal of clarity because the PCA discrimination was already sufficient. The 2-D scatter plot for IC band 2 vs. Landsat-8 PC band 7 also indicates linear correlation between two spectral classes with short-tailed shapes. The desired geologic materials class (silicification) is identified by both spectral classes, but comparison of the PC7 (Fig. 4D) and IC2 (Fig. 6D) shows that the high DN pixels marking silicification are more sharply defined in the IC2 image.

Having established that the Landsat-8 IC5, IC3, and IC2 images each identify a key alteration mineral assemblage, we combine these in an RGB color composite to form a color-based classification map (Fig. 8). Zones with high surface abundance of Al-OH, (Fe,Mg)-OH, and  $\text{CO}_3^{2-}$  mineral groups appear in red and magenta colors and mostly outline the structural patterns and drainage systems. Green pixels show the surface distribution of iron oxide/hydroxide minerals, broadly distributed across the study area because bright red lateritic soil is the main element of the landscape. Blue and cyan pixels manifest silicification in the study area. Several yellow zones are observable in the northeastern, northwestern, central and southwestern part of the study area, which are the combination of the

clay/carbonate and iron/hydroxide mineral groups. Comparing the alteration mapping to the known locations of mining sites and gold occurrences (Fig. 8), it is clear that most of the mining sites are located in yellow and cyan zones and that gold occurrences are typically reported adjacent to these alteration zones. The southwestern part of the study area contains yellow pixels indicating zones enriched in Al-OH, (Fe,Mg)-OH,  $\text{CO}_3^{2-}$  and iron/hydroxide alteration, which may represent an as-yet untapped prospective zone of gold mineralization.

### 5.1.3. Band ratio and combination analysis

Key spectral-band ratios and combinations were selected to bring out key minerals as high DN bright pixels in scenes of the study area (Inzana et al., 2003). Fig. 9 shows the Landsat-8 images derived from the band ratios discussed in section 4.2.2 above. Pseudo-color ramps are used in each case to visualize the high DN value pixels for the selected band ratios. Fig. 9A shows Landsat-8  $4/2$  band ratio image, which is designed to bring out iron oxide/hydroxide mineral groups as high DN pixels. These are mostly concentrated in mining sites and surrounding areas. By contrast, the Fe-MI of Pour et al. (2018c), i.e. Landsat-8 bands  $(6/5) \times (4/3)$  (Fig. 9B) displays bright pixels in most of the study area except the northern part. The difference between these two indices arise because the Fe-MI is sensitive to both  $\text{Fe}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{3+}$  charge transfer and crystal-field absorption features near 0.9–1.2  $\mu\text{m}$  and 0.45–0.9  $\mu\text{m}$ , (Morris et al., 1985; Sherman and Waite, 1985). Thus, the regionally prevalent ferricretes (iron crust or duricrust) appear bright in the Fe-MI image. The  $4/2$  band ratio, by contrast, is more specifically sensitive to  $\text{Fe}^{3+}$  in iron oxide/hydroxide minerals, which

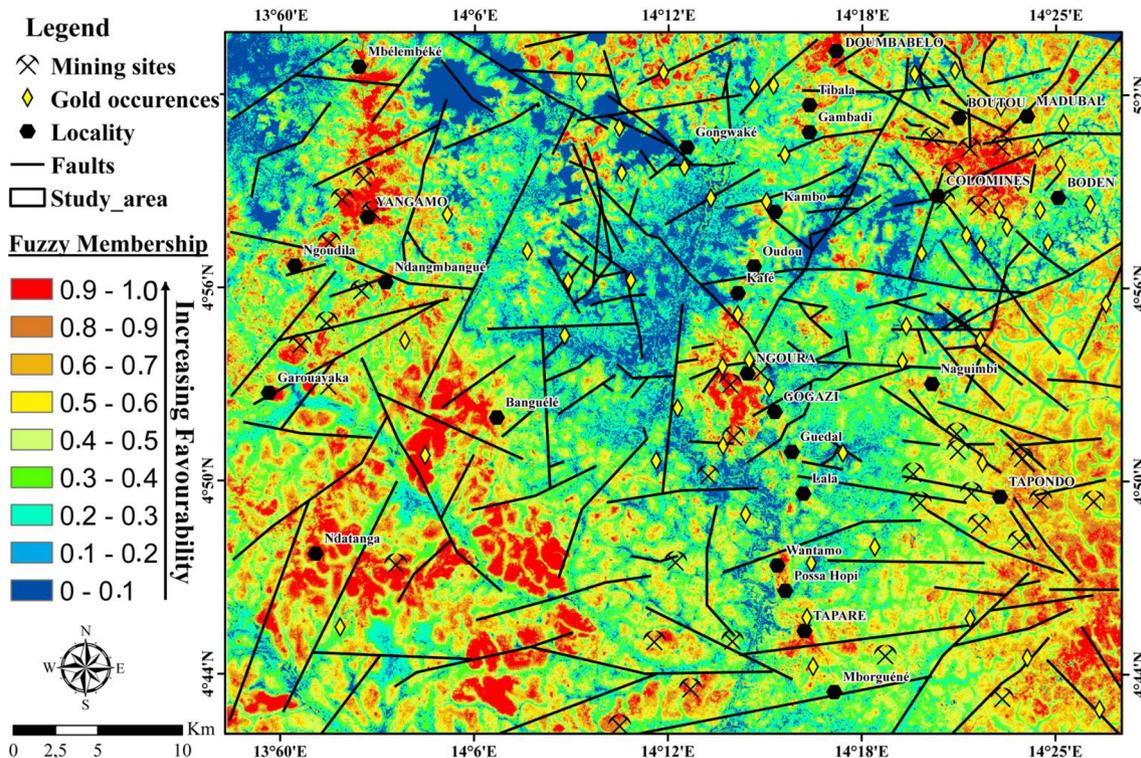


Fig. 11. Prospectivity map of the study area at regional scale derived from Landsat-8 selected alteration thematic layers.

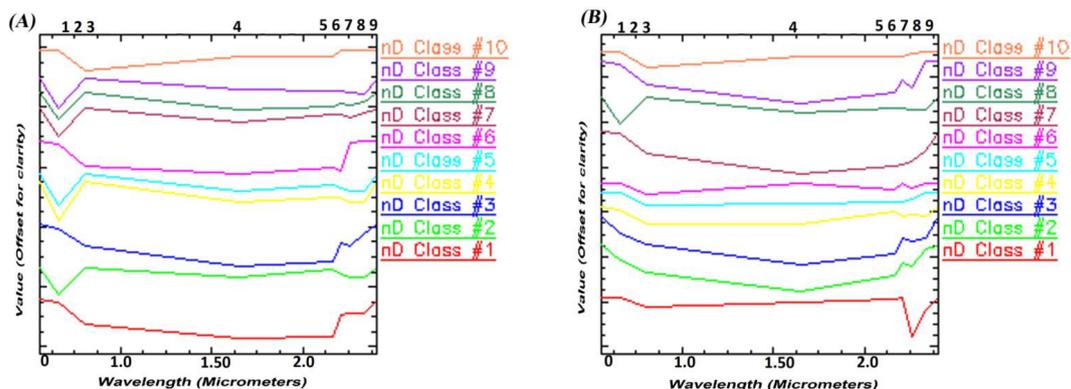


Fig. 12. End-member (mean) spectra extracted from ASTER VINR + SWIR bands using the n-Dimensional analysis technique for the selected subsets of the study area. (A) southwestern zone; (B) southeastern zone. ASTER band center positions are shown for the selected zones.

are concentrated in the alteration zones associated with gold mineralization.

The Landsat 6/7 band ratio, chosen for mapping Al-OH, (Fe,Mg)-OH, and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> mineral groups, produces an image (Fig. 9C) that apparently indicates clay and carbonate mineral groups in most of the study area, including the highly vegetated northern part. In fact, this band ratio overlaps the 2.20 μm the lignin-cellulose spectral band (Galvão et al., 2005) and so vegetation cover interferes with the clay and carbonate mineral detection. Overlapping absorption bands in the widespread lateritic soil may also masquerade as clay and carbonate mineral groups. Better discrimination of clay and carbonate mineral groups from both these sources of subtropical interference can be achieved by increasing the contribution of the absorption in band 7. Indeed, the Al-OH-MI of Pour et al. (2018c), bands 6/(7 × 7), exhibits bright pixels specifically concentrated in and around mining sites, achieving separation of alteration mineralogy from laterite and vegetation cover (Fig. 9D).

For mapping unaltered rocks and common silicate minerals, the 5/6 band ratio was used. The image of this band (Fig. 9E) shows a

concentration of bright pixels mainly in the northern part of the study area, away from all the hydrothermal alteration zones detected by other images. Silicified zones in the study area were targeted with the band combination (10 + 11) × 11 (TRLI). High DN pixels in Fig. 9F mark zones with high quartz content and are spatially associated with known mining sites. The information on alteration assemblages from the various selected combinations of Landsat-8 bands were assembled into a RGB combination image, with red showing the 4/2 band ratio, green the Al-OH-MI 6/(7 × 7), and blue the TRLI (10 + 11) × 11 (Fig. 10). In this image, zones with high contents of iron oxide/hydroxide minerals appear yellow; Al-OH, (Fe,Mg)-OH, and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> minerals appear red; and silicified zones are violet (Fig. 10). Upon superposing the locations of known mining sites and gold occurrences (Fig. 10), it is clear that the identified hydrothermal alteration zones are closely concordant with gold mineralization in the study area. Furthermore, the prominent yellow and violet zones in the southwestern part of the study area are identified as unexploited high-potential zones for detailed mapping using ASTER data.

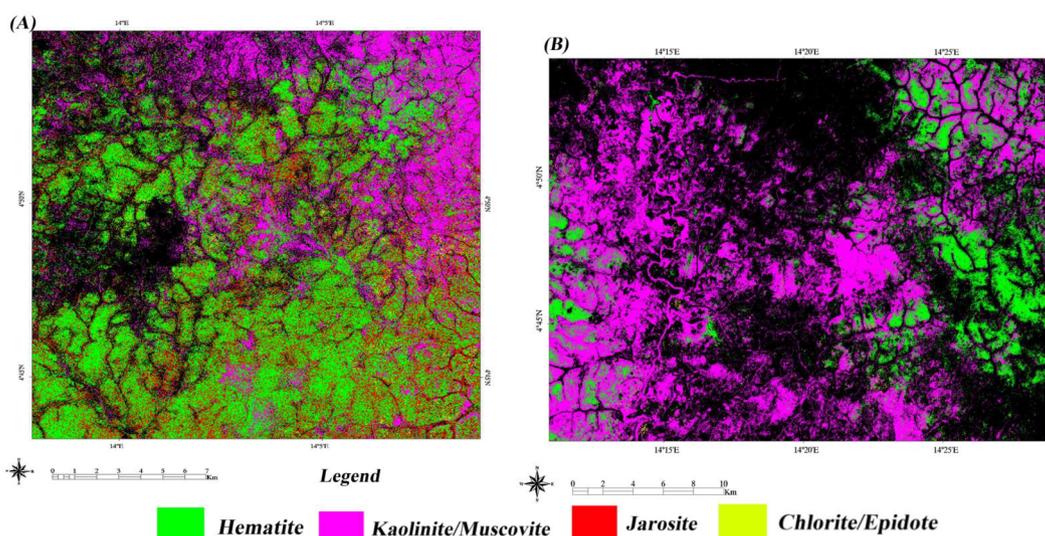


Fig. 13. LSU classification mineral maps derived from fraction images of the extracted end-members. (A) southwestern zone; (B) southeastern zone. Spectrally dominant mineral groups (concentration more than 10%) are depicted as colored pixels.

#### 5.1.4. Landsat-8 prospectivity map at regional scale

The fuzzy-logic model was used to produce mineral prospectivity maps of the favorable areas for gold mineralizations in the study region by means of most informative alteration thematic layers derived from PCA, ICA and band ratio techniques (Table 4). The PC6, PC7, IC3, IC5, IC2, band ratio of 4/2, 6/(7\*7) and TRLI thematic layers of Landsat-8 were selected to be integrated by application of the fuzzy AND operator for generating mineral prospectivity map at a regional scale.

Fig. 11 shows the regional mineral prospectivity map of the study area. Evaluating the fuzzy membership indicates that the high favorability index is found in the western, southeastern and northeastern parts of the study area. Most of the mines and ore indications are located in the high value zones of the favorability index. Results demonstrate the highest value (0.9 to 1.0) of the favorability index is associated with mining sites. The alteration zones associated with fault intersections are the most favorable/prospective areas for gold mineralizations at the regional scale.

#### 5.1.5. Linear spectral Unmixing (LSU) analysis

The LSU algorithm was used for sub-pixel level mapping of alteration mineral assemblages in the high potential zones located in southwestern and southeastern parts of the study area. A set of unique pixels (corresponding to a pure end-member) was defined using the n-Dimensional analysis technique for two selected subsets. Fig. 12 (A and B) shows end-member (mean) spectra extracted for the selected subsets. Subsequently, end-member spectra extracted for the selected subset from the apparent reflectance data were used to act as end-members for LSU sub-pixel spectral mapping. Comparison with selected end-member reflectance spectra of minerals from the USGS spectral library indicates a subset of the extracted end-members can be considered for LSU classification.

Fig. 12 (A) shows extracted end-member spectra for the subset zone of southwestern part. Some obvious distinctions between spectral signatures for a variety of minerals are recognizable. The n-D class #2, n-D class #4, n-D class #5, n-D class #7, n-D class #8 and n-D class #9 typically represent iron oxide/hydroxide absorption characteristics. Goethite, hematite and jarosite show strong  $\text{Fe}^{3+}$  and Fe-OH absorption features at 0.48  $\mu\text{m}$ , 0.83–0.97  $\mu\text{m}$  and 2.27  $\mu\text{m}$ , coinciding with bands 1, 3 and 7 of ASTER, respectively (Hunt and Ashley, 1979). Hence, the n-D class #2, n-D class #4 and n-D class #5 can be attributed to jarosite (strong 2.27  $\mu\text{m}$ ; Fe-OH absorption) and the n-D class #7, n-D class #8 and n-D class #9 could be considered for goethite and hematite (0.48  $\mu\text{m}$  and 0.83–0.97  $\mu\text{m}$ ;  $\text{Fe}^{3+}$  absorption) (Fig. 12 A). The n-D class #1 may

represents chlorite/epidote due to major Mg,Fe-OH absorption near 2.30  $\mu\text{m}$  and minor  $\text{Fe}^{3+}$  absorption features at 0.85  $\mu\text{m}$  (Bishop et al., 2008; Mars and Rowan, 2010), which correspond with bands 3 and 8 of ASTER (Fig. 12 A). The n-D class #3 and n-D class #6 exhibit a distinct Al-OH absorption feature at 2.17  $\mu\text{m}$  and 2.2  $\mu\text{m}$  attributable to kaolinite and muscovite, coinciding with bands 5 and 6 of ASTER (Hunt, 1977; Mars and Rowan, 2011). The n-D class #10 can be considered as unaltered/unknown minerals because it does not show any distinctive absorption features related to hydrothermal alteration minerals.

Analysis of the extracted end-member spectra for the subset zone of southeastern part (Fig. 12 B) indicates several distinguishable spectral signatures for the alteration minerals. Hematite, jarosite, kaolinite, muscovite, and chlorite/epidote are recognizable (Fig. 12 B). The n-D class #1 shows muscovite spectral characteristics and the n-D class #2, n-D class #3 and n-D class #9 demonstrate kaolinite distinctive absorption features. The n-D class #4 represents chlorite/epidote due to iron absorption features in bands 2, 3 and Mg, Fe-OH absorption in bands 7 and 8 of ASTER. The n-D class #5, n-D class #7 and n-D class #10 lack any distinct spectral features related to the alteration minerals can be considered as an unaltered/unknown mineral group. The n-D class #6 and n-D class #8 represent jarosite and hematite spectral features, respectively (Fig. 12 B).

Fraction images of end-members resulted from LSU analysis for the southwestern and southeastern parts of the study area, appear as a series of greyscale rule images, one for each extracted end-member. High digital Number (DN) value (bright pixels) in the rule image represents the sub-pixel abundance of the target mineral in each pixel and map its location. Considering the resultant fraction images and extracted end-member spectra for the southwestern part, it is evident that goethite, hematite, jarosite, muscovite and kaolinite are dominant minerals and chlorite/epidote is in minor abundance. In the southeastern of the study area, muscovite, kaolinite, hematite and jarosite show high surface abundance, whereas chlorite/epidote exhibit moderate to less spectral contribution and spatial distribution. Fig. 13 (A and B) shows the LSU classification mineral maps for the southwestern and southeastern parts of the study area. Results indicate that the hematite/jarosite and muscovite/kaolinite are spectrally governed the zone, while chlorite has less contribution in total mixed spectral characteristics in the southwestern part (Fig. 13 A). Muscovite/kaolinite show high surface abundance, whereas hematite/jarosite and chlorite/epidote groups exhibit moderate to less spectral contribution and spatial distribution in southeastern zone (Fig. 13 B).

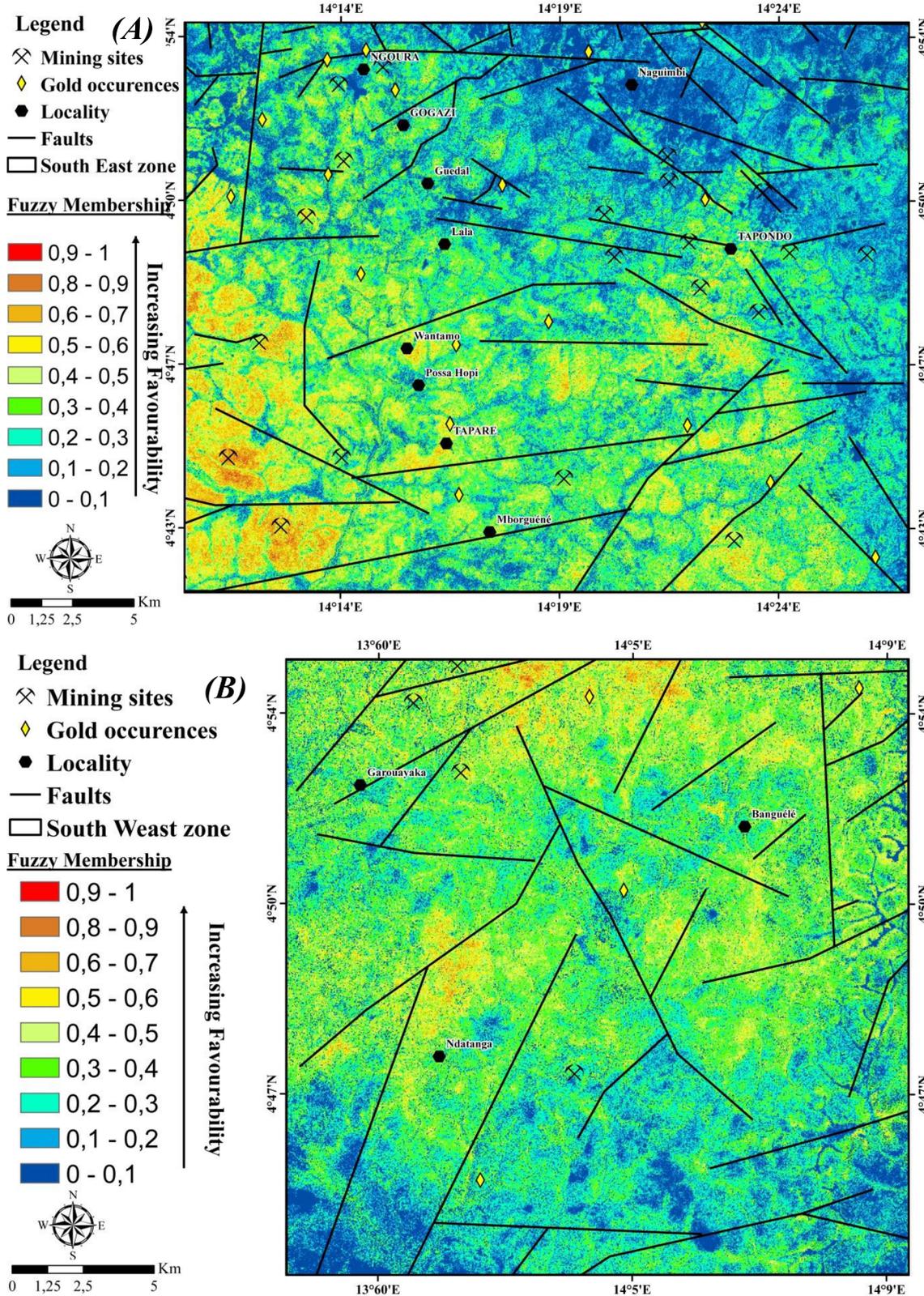


Fig. 14. Prospectivity maps of the selected subsets derived from ASTER selected alteration thematic layers at district scale. (A) the southwestern zone; (B) south-eastern zone.

5.1.6. ASTER prospectivity map at district scale

The most informative alteration thematic layers of ASTER derived from the LSU technique such as n-D class #1, n-D class #2, n-D class #3, n-D class #4, n-D class #6, n-D class #7, n-D class #8 were integrated using the fuzzy gamma operator ( $\gamma = 0.6$ ) to generate

prospectivity map at a district scale (Table 4). Considering the fuzzy membership for the ASTER prospectivity map (Fig. 14 A and B) shows that the highest value (0.9 to 1.0) of the favorability index and can be considered the most favorable/prospective zones for gold mineralizations in the study area at the district scale. The documented gold



**Fig. 15.** Field view and hand specimen with altered and unaltered surfaces of different outcrop explored in the study area. Dome-shaped biotite granite and granodiorite outcrops in the (A) Ndembara and (B) Ngoura areas; mylonite, K-feldspar granite and calc-alkaline granite with quartz mineralized veins from the (C) Madoubal, (D) Yangamo and (E) Colomines areas, respectively; (F) Tapondo and (G) Kpangara biotite granites; and (H) Colomines mining site.

mineralizations are located in the high favorability index zones in the prospectivity maps (Fig. 14 A and B).

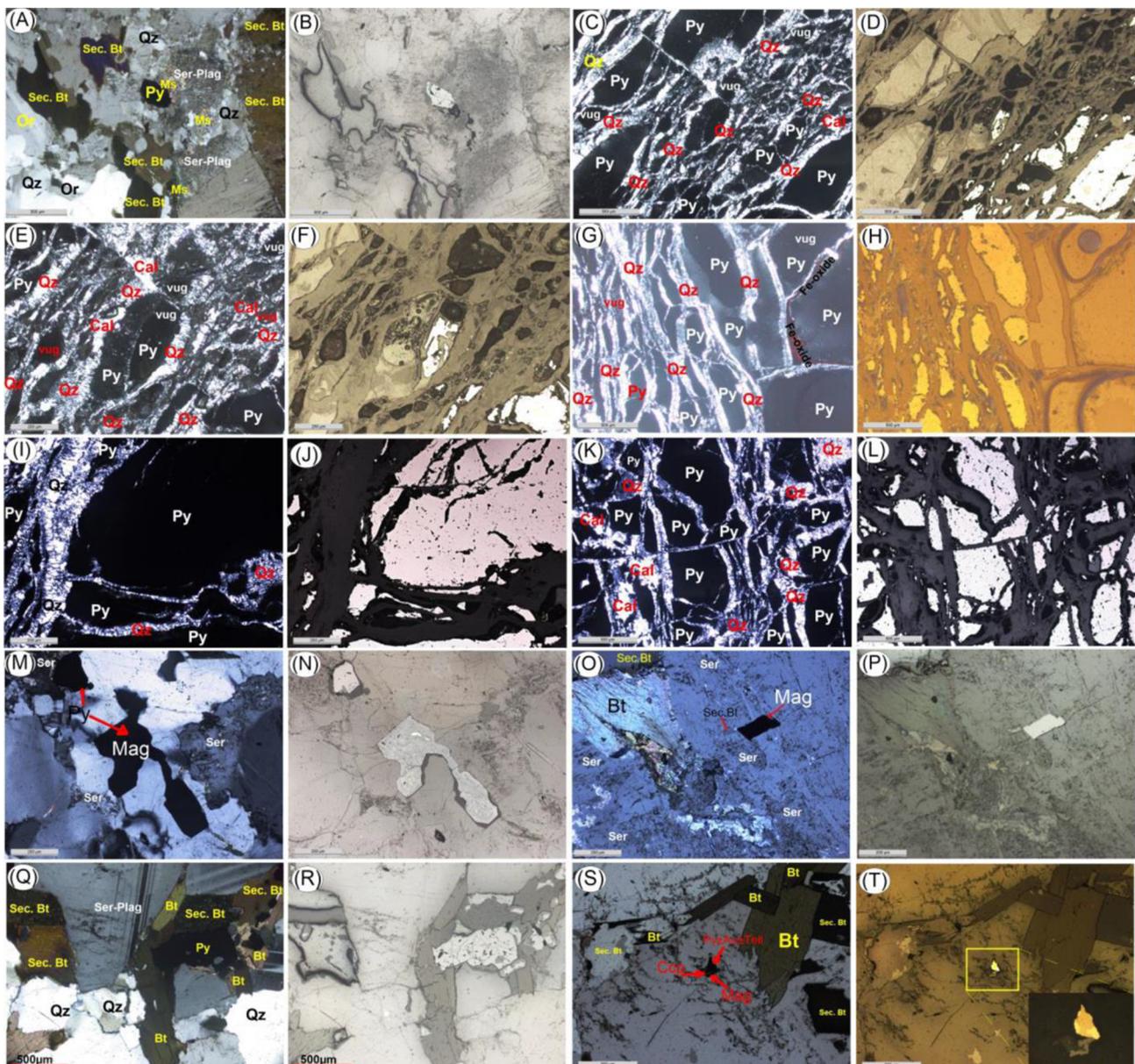
### 5.2. Field survey and petrography

Fieldwork revealed several outcrops in the study area, seven of which were chosen as representative. These seven outcrops were documented in the field and 53 rock samples were collected for petrographic study. Based on visual classification in the field, seven main rock types were identified: (1) biotite granite, (2) K-feldspar granite, (3) calc-alkaline granite with K-feldspar megacrysts, (4) granodiorite with (in some cases) mineralized quartz veins, (5) gneiss, (6) amphibolite, and (7) mylonite. Biotite granite, K-feldspar granite and calc-alkaline granite with K-feldspar megacrysts are the main rock types found in the Ndembara, Kpangara-Kadei, Madoubal, Boden and Yangamo areas. Granodiorites were observed at Ngoura. Mylonitic granite with

mineralized quartz veins occurs mainly at Madoubal and Boden villages. The metamorphic basement is represented by gneiss and amphibolite enclaves within the granitoids (see Fig. 2).

At Ndembara, a dome-shaped outcrop of biotite granite shows pink, light gray and dark facies with enclaves of gneiss and amphibolite (Fig. 15A). At Ngoura, a 100 m scale dome-shaped outcrop of a uniform light gray granodiorite to granite is intruded into metamorphic basement of interbedded gneiss and amphibolite (Fig. 15B). At Madoubal and Boden, mylonitic granites are crosscut by aplitic dykes, mineralized quartz veins, and younger granite injections (Fig. 15C-E). They appear mostly on hill tops, outcropping as pavements or boulders. The mylonitic granites display granular structure and are composed of quartz ribbons and almond-shaped K-feldspar phenocrysts wrapped in a matrix of mafic minerals (Fig. 15C). K-feldspar granite and calc-alkaline granite with K-feldspar megacrysts are also found in the Madoubal and Yangamo areas, outcropping as boulders and pavements over an area of





**Fig. 17.** Microscopic appearance of (A–B) granodiorite from Ngoura, (C–L) mineralized quartz veins  $\pm$  calcite partially infilling dilatant zones along faults, (M–P) biotite granite from Ngoura, and (Q–T) biotite granite from Yangamo. Granodiorite displays a granular textures with biotite flakes hosting opaque minerals. Alteration is evident in the partial replacement of primary biotite by secondary opaque minerals. Some plagioclase crystals display distinctive double-twinning (Panel Q). Sulfides are present in all studied thin section. Sericitized plagioclase is present in places (Panels A, M, O, Q). Note the association of chalcopyrite  $\pm$  gold  $\pm$  tellurides (Panel T).

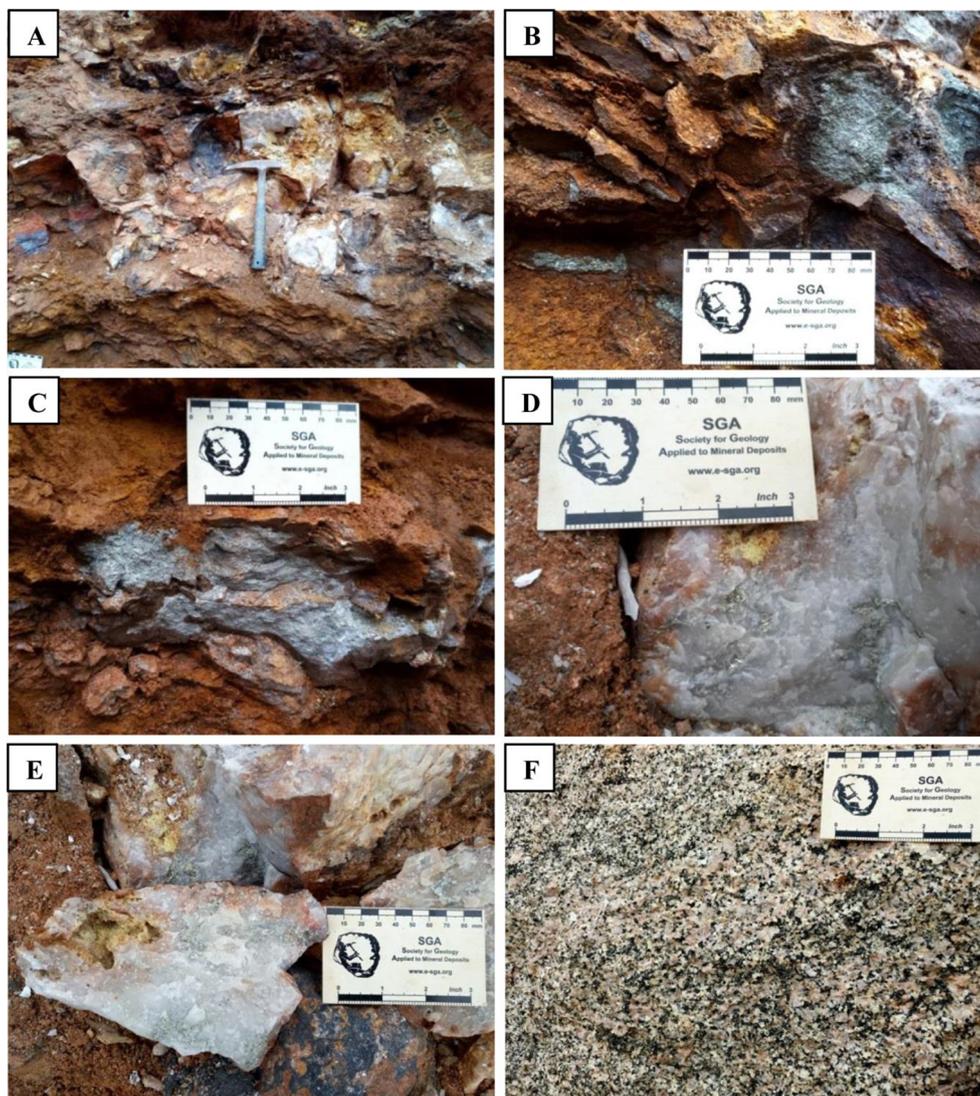
Yangamo, Madoubal and Bodem are substantially more altered (Fig. 16). Sericitized plagioclase (ser-plag), and secondary biotite (Sec.bt) are the main alteration minerals. Sulfides, primary biotite flakes and quartz are also observed. Opaque minerals seem to originate from biotite, though less amounts occur as inclusions in plagioclase. Plagioclase is subhedral with somewhat curved grain boundaries; it is typically surrounded by small quartz grains and K-feldspar crystals (Fig. 16E). Biotite is the most abundant ferromagnesian mineral. Euhedral primary crystals are pseudomorphed by aggregates of secondary biotite and opaque minerals. Quartz forms large subhedral large crystals associated with K-feldspar or small inclusions in other minerals.

### 5.3. Gold mineralization and associated hydrothermal alteration

#### 5.3.1. Style of mineralization

In the Ngoura-Colomines area, gold occurs both in intrusion-related

mineralization zones and in quartz-dominant vein systems with 4–6 vol % sulphides and 5–13 vol% carbonate minerals. Vein systems may also contain albite, white mica and chlorite. Structural study in the sub-surface shows that the vein systems are continuous over a vertical extent of 1–2 km with little change in mineralogy or gold grade. However, there are strong small-scale lateral variations in wall rock alteration with distance from the ore zones. Alteration haloes may extend laterally from gold mineralization only for a few centimeters or as much as 2 km. In general, there is a positive correlation between the size of the deposit and the lateral extent of alteration. The minerals diagnostic of gold mineralization are quartz, sericite and subordinate amounts of pyrite. There is a strong structural control of mineralization, which occurs along both brittle faults and ductile shear zones. The dominant NNE-SSW to E-W structural fabric of the region is expressed at multiple scales, from the regional ductile to brittle shear zones traversing the study area (Fig. 2) down to outcrops-scale fractures and mineralized



**Fig. 18.** Sites of gold artisanal mining showing (A) hydrothermally altered fault and gold-bearing quartz vein, (B) iron sulfides (pyrite, chalcopyrite and pyrrhotite) disseminated in the wall-rock, (C) a layer of massive sulfides (pyrite and chalcopyrite) and (D) mineralized quartz veins around the Boden and Madoubal area. Also shown are (E) a large porous vug in a hand sample photo and (F) a field view of potassic alteration.

quartz veins (Fig. 18a). Micro-fractures in the wallrock are genetically linked to the main veins and host thin quartz  $\pm$  carbonate veinlets.

### 5.3.2. General description of alteration

Hydrothermal alteration at Ngoura-Colomines is visible on a variety of scales from thin section to outcrop to satellite views. Alteration types include potassic, phyllic, quartz-rich phyllic, and argillic varieties. Potassic alteration in the study area is only expressed in the Yangamo-Ndatanga, Taparé-Tapondo, and Ngoura-Colomines villages and consists of secondary biotite, K-feldspar, plagioclase, and porphyry-textured quartz (Fig. 17). Phyllic alteration is more broadly distributed and mainly involves formation of sericite and quartz with a variable amount of opaque minerals (Fig. 17). The mineralized quartz veins in the Ngoura-Colomines area are formed of a mixture of quartz, hematite-limonite and clay minerals (Fig. 18). Three lateral alteration zones are distinguished around the auriferous quartz veins, namely: (a) a distal, argillic alteration zone rich in kaolinite and iron oxides; (b) an intermediate, potassic-phyllic-iron oxide-muscovite-pyrite alteration zone, which transitions gradually into (c) a proximal quartz  $\pm$  carbonate  $\pm$  iron oxide  $\pm$  pyrite zone directly adjacent to the quartz vein (Figs. 18 and 19). This well-organized typical zoned alteration patterns leads to specific pathfinder minerals that systematically mark distance from possibly auriferous veins in the Ngoura-

Colomines goldfield (see Fig. 19).

**5.3.2.1. Distal alteration zone.** The outer alteration zone is covered with clay associated with kaolinization and ferruginous overprinting by near-surface chemical weathering processes and is distantly, if at all, related to the mineralization process. These zones are typically at least 100 m from the auriferous quartz veins and can be easily distinguished by a characteristic yellowish grey color (Figs. 19 and 20).

**5.3.2.2. Intermediate alteration zone.** In this transitional zone, potassic alteration is very well developed. Most of the minerals in this zone including sericitized plagioclase, secondary biotite, fine-grained K-feldspar, sericite and huge amounts of quartz are secondary minerals reflecting various types of alteration. Silicification is represented by partially euhedral to subhedral quartz, minor veinlets, and cryptocrystalline silica stocks. Sericitization is associated with complete alteration of primary igneous feldspar minerals to sericite and less commonly to muscovite. Disseminated pyrite grains were observed in the sericite matrix (Figs. 16–20).

**5.3.2.3. Proximal alteration zone.** This zone is mainly made up of sulfides such as broken pyrite and chalcopyrite cemented by silica in

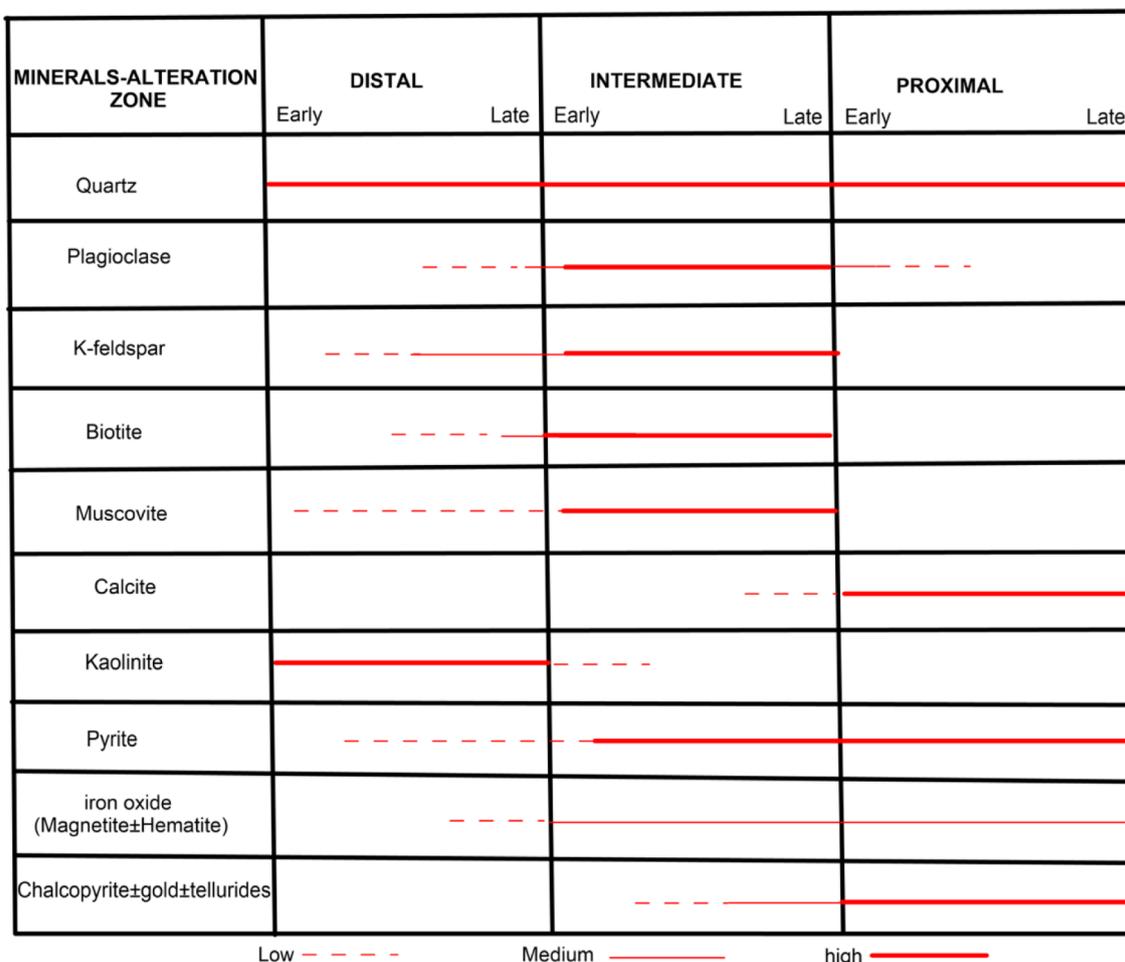


Fig. 19. Schematic diagram showing the alteration paragenesis in the the Ngoura-Colomines goldfield.

mineralized quartz ± calcite veins as well highly porous networks of silica and Fe-oxide fibers with infill texture (see Fig. 16C-L and Fig. 18A-F). Preserved wall rock between the veins consists largely of quartz, white mica and pyrite. Large porous vugs were observed both in outcrop and in hand sample. The relationship between the mineralized quartz vein and the alteration suggests that the fluids responsible for alteration passed through the channel now occupied by partially euhedral infill of quartz and calcite. Hence, porosity infilling was key mechanism of bulk silicification. Pyrite is abundant in the proximal zone and decreases with distance from the central veins (Figs. 19 and 20). Sulfides occur in association with hematite (see Fig. 18B).

5.4. Results of XRD analysis and spectrometry

A selected set of altered samples and one fresh granite from the study area were powdered for further mineralogical study. Although strong orientation effects prevent quantitative refinement of mineral proportions, mineral detections can be confirmed in the powder XRD patterns and visual inspection of the relative heights of the strongest peaks yields a qualitative sense of mineral proportions (Fig. 21). The unaltered granite (sample MAD01) displays, as expected, XRD peaks associated with the primary minerals quartz, albite, and orthoclase. Muscovite/sericite and goethite were not detected. On the other hand, each of four samples (COLO1-COLO4) from the non-mineralized alteration halo around a gold-bearing quartz vein displays characteristic peaks of index phases for their alteration types. None of them show strong peaks for feldspars. Goethite is present in each of the altered samples but is best developed in COLO1, from the distal zone. Sericite is

present in each of the altered samples and is particularly abundant in COLO3 from the intermediate zone. All of them contain clear quartz peaks; COLO4 from the proximal zone in particular shows much stronger quartz peaks than the unaltered granite. In summary, the XRD patterns broadly confirm the results of field and petrographic observations of the mineralogy.

The same selection of one fresh and four altered rock powders were studied by reflectance spectroscopy in the laboratory. As discussed above in the context of remote sensing retrievals of mineralogy, the VNIR + SWIR range (350 to 2500 nm) is sensitive to the presence of alteration minerals having absorption features of Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>, OH/H<sub>2</sub>O, Al-OH, (Fe,Mg)-OH, and CO<sub>3</sub><sup>2-</sup> (Fig. 22A). Absorption features near 500 nm and 1000 nm are related to electronic transitions in iron (Fe<sup>3+</sup>/Fe<sup>2+</sup>) (Hunt, 1977; Hunt and Ashley, 1979) and these features are specifically detected in each of the altered rock samples (COLO1-COLO4). This confirms the presence of hematite and goethite as major alteration phases. The unaltered rock (MADO1) sample does not show any absorption feature at 1000 nm (Fe<sup>2+</sup> absorption) and has only a weak absorption feature near 500 nm.

The OH and H<sub>2</sub>O vibrational bands near 1400 nm and 1900 nm are also easily recognizable for altered rock samples but much weaker in the fresh rock sample, indicating that hydration accompanies alteration in this suite. The Al-OH bending mode produces a major absorption feature at around 2200 nm associated with a secondary feature between 2160 and 2180 nm, which are related to stretching vibration of the inner and outer hydroxyl groups (Bishop et al., 2008). Strong absorption features near 2160, 2180 and 2200 nm are recorded for each of the altered rock samples (COLO1-COLO4) and are notably weaker in the

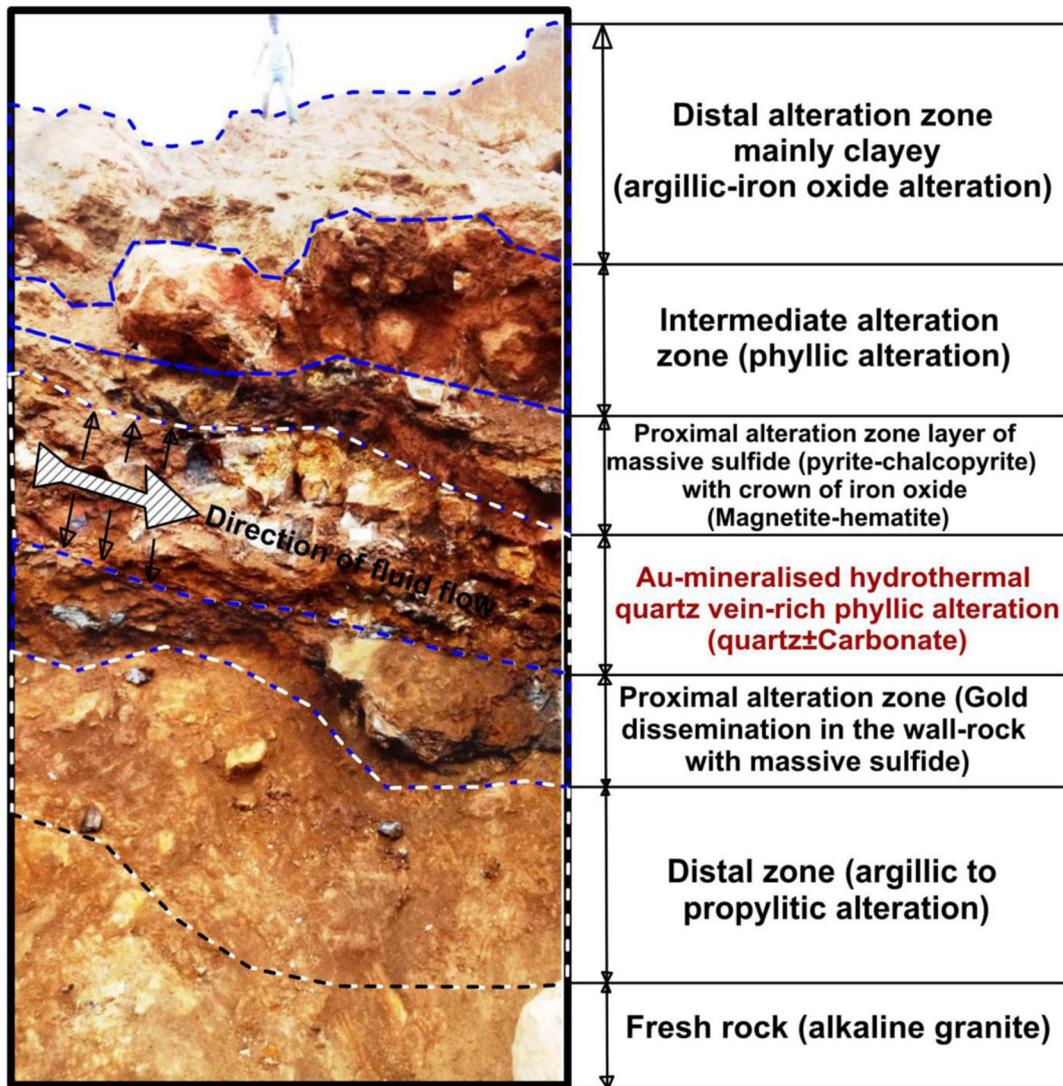


Fig. 20. Alteration profile with an associated sketch from the Colomines area.

fresh sample. An additional weak absorption at  $2250\text{ cm}^{-1}$  in MAD01 is probably sensing the presence of fresh biotite. Many dioctahedral phyllosilicates display these spectral characteristics, including muscovite, montmorillonite, and illite; the present analysis does not clearly distinguish which combination of these is present in each of the altered rocks. The absorption feature near  $2350\text{ nm}$  in the samples is due to a combination of the fundamental OH-stretching mode with the Mg-OH bending mode. Chlorite, epidote, biotite, and illite show distinctive absorption features at around  $2350\text{ nm}$  (Bishop et al., 2008).

Reflectance spectroscopy in the TIR range ( $2500$  to  $25000\text{ nm}$ ) is sensitive to the emissivity variations derived from Si-O-Si stretching vibrations (Ninomiya et al., 2005). Fig. 22B shows the TIR spectroscopy for the altered (COLO1-COLO4) and unaltered rock (MAD01) samples. The average Si-O-Si peak near  $7500\text{ nm}$  displays notably higher emissivity in the silicified sample COLO4 than in the other altered samples, confirming higher  $\text{SiO}_2$  content in the innermost alteration zone.

## 6. Discussion

Comparatively few investigations have attempted to use multi-spectral satellite imagery for gold exploration in tropical and sub-tropical regions because permanent cloud cover and heavy vegetation cover may obstruct the spectral responses of alteration minerals (Carranza and Hale, 2002; Deller, 2006; Galvão et al 2005; Vicente and

Filho, 2011; Pour et al., 2013, 2014; Pour and Hashim, 2015b). Furthermore, ubiquitous lateritic soil cover and tropical weathering can hinder the observation of hydrothermal alteration zones by remote sensing (Butt and Zeegers, 1992; Osei and Singh, 1999). Specifically, ferricretes (hematite and goethite), kaolinite and residual quartz resemble the minerals that are diagnostic of the hydrothermal alteration zones targeted by mineral exploration and so broad areas of ordinary tropical soil cover may serve to camouflage valuable prospects (Galvão et al., 2005; Deller, 2006). Hence, there is a need for a study that applies signal enhancement and statistical methods sufficient to account for the various factors confounding remote mapping of hydrothermal alteration minerals in tropical and sub-tropical environments.

In this research, the gold-producing Ngoura-Colomines area in the inter-tropical eastern region of Cameroon was selected as a test locality for remote mapping of hydrothermal alteration zones using Landsat-8 and ASTER satellite data. The common occurrence of quartz, sericite, chlorite, and rutile in wall-rocks and quartz veins associated with dissemination of pyrite, pyrrhotite, and arsenopyrite suggests a genetic relationship between hydrothermal alteration and gold mineralization (Zoheir et al., 2017). Indeed, field and petrographic study prove that the gold-bearing quartz veins at Ngoura-Colomines, Yangamo and Tapondo are associated with hydrothermal alteration zones rich in pyrite, sericite, iron oxides and silica. Comparison of the remote sensing results with the geologic map of the study area, the spatial distribution of

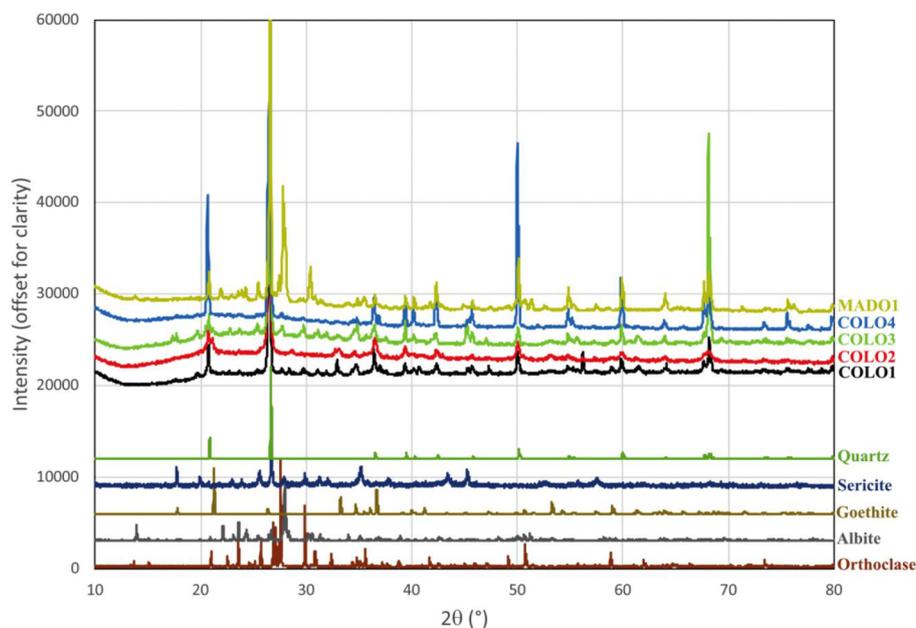


Fig. 21. Powder X-ray diffraction patterns of representative samples of altered rocks (COLO1-COLO4) and unaltered rock (MADO1), compared to reference spectra of key minerals. See text for acquisition conditions.

mining sites and gold occurrences, and laboratory analysis of samples collected during field survey indicates that the processed satellite maps successfully delineate alteration zones with definite, close spatial relations with several known gold localities (see Figs. 2, 5, 10 and 12). In addition, new gold exploration prospects in the area were found, including the Ngoura-Colomines prospects in the central and northeastern part of the study area (Takodjou Wambo et al., 2018), the newly discovered Yangamo-Ndatanga prospects in the northeastern and southwestern part of the study area, and the Taparé-Tapondo prospects in the southeastern part of the study area.

The alteration image-maps derived from Landsat-8 and ASTER data show that gold occurrences are generally distributed along structural patterns and drainage systems. The relation of primary gold mineralization in the study area to features associated with NE-SW trending shear zones has already been established (Vishiti, 2009; Asaah et al., 2015; Takodjou Wambo et al., 2018). Furthermore, the work of Takodjou Wambo et al. (2016 and 2018) has revealed that the hydrographic network in the study area is structurally guided by the same fault systems and shear zones that, localized the gold mineralization. Therefore it is logical to expect that, over time, the erosion induced by the flow of water will selectively expose areas of mineralization. Morphoscopy study of the gold grains by Takodjou Wambo et al. (2018) emphasized that alluvial gold within the study area has proximal (0–50 m) to sub-proximal (50–300 m) sources. Thus, effective mapping of supergene hydrothermal alteration zones to locate areas where exposed quartz veins are being dismembered at the surface supports a closely guided strategy for identification of new prospects for both primary gold exploration and its downstream alluvial extension.

Because a number of different indicators of alteration zones, based on several complementary approaches, were introduced in this work, it is useful to integrate the most informative thematic layers. Accordingly, regional and district scale prospectivity maps were generated for the study area using Landsat-8 and ASTER data, which are applicable for gold prospecting in the study area.

## 7. Conclusion

This research demonstrates the application of Landsat-8 and ASTER remote sensing data for mapping hydrothermal alteration zones aimed at mineral exploration in tropical and sub-tropical regions. Several

hydrothermal alteration zones of iron oxide/hydroxide minerals, clay minerals, and silicification were identified using Landsat-8 and ASTER remote sensing data in the Ngoura-Colomines region, Eastern Cameroon. They showed spatial consistency with known mining areas and gold occurrences. Some prospective zones were delineated in the study area, including the Ngoura-Colomines prospects with the newly discovered Yangamo-Ndatanga and Taparé-Tapondo prospects totally new targets for exploration. The alteration zones associated with fault intersections are the most favorable/prospective areas for gold mineralizations. The image processing methodology used for Landsat-8 and ASTER hyperspectral images allows the user to separate and then minimize several confounding factors, such as vegetation and lateritization, that hamper remote sensing detection of hydrothermal alteration zones in tropical and sub-tropical environments. Satellite-based mineral prospectivity maps were produced for the study area. The remote sensing approach used in this research may be specifically applicable to other sub-tropical regions for identifying high potential zones of gold mineralization using Landsat-8 and ASTER remote sensing data.

## Declaration of Competing Interest

The authors declare that they have no known competing financial interests or personal relationships that could have appeared to influence the work reported in this paper.

## Acknowledgments

The data presented here form a part of the senior author's Ph.D. thesis supervised by S. Ganno and J.P. Nzenti at the University of Yaounde I, Cameroon. We are thankful to Institute of Oceanography and Environment (INOS), Universiti Malaysia Terengganu (UMT) for providing facilities during preparation of the revision of the manuscript. Prof. Bethany Ehlmann and Rebecca Greenberger kindly collected the laboratory reflectance spectra. Prof. David Lentz is thanked for his input on the project, and earlier reviews. We also gratefully acknowledge anonymous reviewers for their critical and constructive comments of the manuscript.

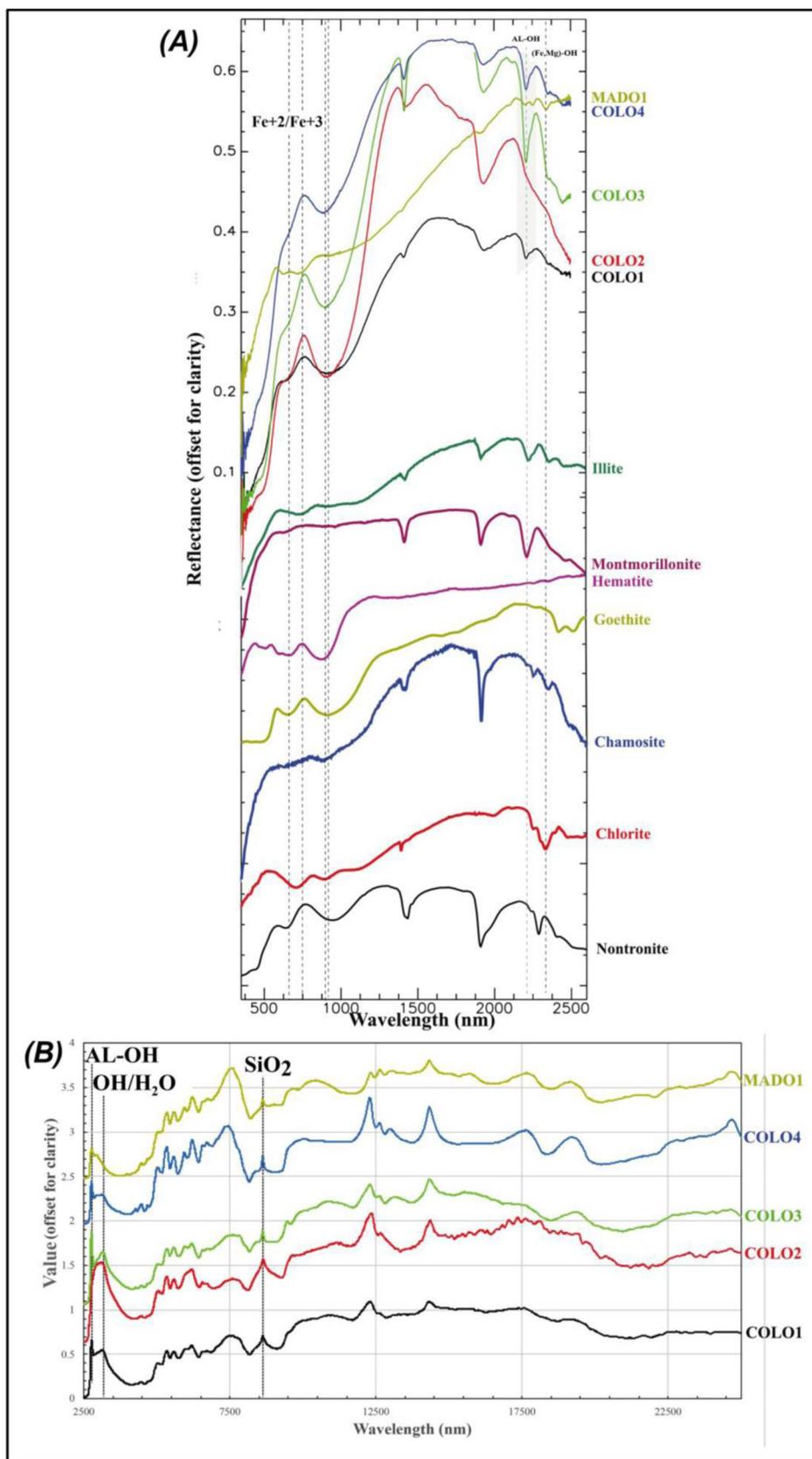


Fig. 22. Laboratory reflectance spectra of altered and unaltered rocks. (A) Visible to near-infrared reflectance spectra (350 to 2500 nm). (B) Near to thermal infrared spectra (2500 to 25000 nm). The main absorption feature spectra attributed to Fe<sup>2+</sup>/Fe<sup>3+</sup>, OH/H<sub>2</sub>O, Al-O-H, Fe-Mg-O-H and Si-O-Si are shown by dashed lines.

## References

- Abdelnasser, A., Kumral, M., Zoheir, B., Karaman, M., 2018. REE geochemical characteristics and satellite-based mapping of hydrothermal alteration in Atud gold deposit. Egypt. Journal of African Earth Sciences 145, 317–330.
- Abrams, M.J., Brown, D., Lepley, L., Sadowski, R., 1983. Remote sensing of porphyry copper deposits in Southern Arizona. Econ. Geol. 78, 591–604.
- Abrams, M., 2000. The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): Data Products for the High Spatial Resolution Imager on NASA's Terra Platform. Int. J. Remote Sens. 21 (5), 847–859.
- Abrams, M., Hook, S. and Ramachandran, B. (2004). ASTER User Handbook, Version 2. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology. Online: [http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03\\_data/04\\_Documents/aster\\_guide\\_v2.pdf](http://asterweb.jpl.nasa.gov/content/03_data/04_Documents/aster_guide_v2.pdf).
- Abubakar, A.J., Hashim, M., Pour, A.B., 2019. Remote sensing satellite imagery for prospecting geothermal systems in an aseismic geologic setting: Yankari Park, Nigeria. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation 80, 157–172.
- Adams, J.B., Sabol, D.E., Kapos, V., Filho, R.A., Roberts, D.A., Smith, M.O., Gillespie, A.R., 1995. Classification of multispectral images based on fractions of endmembers: Application to land-cover change in the Brazilian Amazon. Remote Sens. Environ. 52, 137–154.
- Adams, J.B., Smith, M.O., Gillespie, A.R. 1993. Imaging spectroscopy: Interpretation based on spectral mixture analysis. In Remote Geochemical Analysis: Elemental and Mineralogical Composition; Pieters, C.M., Englert, P.A.J., Eds.; Cambridge University Press: New York, NY, USA, pp. 145–166.
- Amer, R., El Mezayen, A., Hasanein, M., 2016. ASTER spectral analysis for alteration minerals associated with gold mineralization. Ore Geol. Rev. 75, 239–251.
- Andrews-Deller, M.E., 2006. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and ALI data – examples from Eritrea and Arabia. Int. J. Remote Sens. 27, 2389–2409.
- Asaah, A.V., Zoheir, B., Lehmann, B., Frei, D., Burgess, R., Suh, C.E., 2015. Geochemistry and geochronology of the ~620 Ma gold-associated Batouri granitoids. Cameroon. International Geology Review 57 (11–12), 1485–1509.
- Bedini, E., 2011. Mineral mapping in the Kap Simpson complex, central East Greenland, using HyMap and ASTER remote sensing data. Adv. Space Res. 47, 60–73.
- Bishop, J.L., Lane, M.D., Dyar, M.D., Brwon, A.J., 2008. Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: Smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas. Clay Miner. 43, 35–54.
- Bolouki, S.M., Ramazi, H.R., Maghsoudi, A., Beiranvand Pour, A., Sohrabi, G., 2020. A Remote Sensing-Based Application of Bayesian Networks for Epithermal Gold Potential Mapping in Ahar-Arasbaran Area. NW Iran. Remote Sensing 12, 105.
- Boardman, J.W. 1989. Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition. In Proceedings of the IGARSS'89 12th Canadian Symposium on Remote Sensing, Vancouver, BC, Canada, 10–14 July, Volume 4, pp. 2069–2072.
- Boardman, J.W., Kruse, F.A., 2011. Analysis of imaging spectrometer data using n-dimensional geometry and a mixture-tuned matched filtering approach. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing 49 (11), 4138–4152.
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Geographic information systems for geoscientists-modeling with GIS. Computer methods in the geoscientists 13, 398.
- Butt, C.R.M., Zeegers, H., 1992. Regolith Exploration Geochemistry in Tropical and Subtropical Terrains. Elsevier, Amsterdam and London.
- Carranza, E. J. M. 2008. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS (Vol. 11). Elsevier.
- Carranza, E.J.M., Hale, M., 2002. Mineral mapping with Landsat Thematic Mapper data for hydrothermal alteration mapping in heavily vegetated terrain. Int. J. Remote Sens. 23 (22), 4827–4852.
- Cheng, Q., Jing, L., Panahi, A., 2006. Principal component analysis with optimum order sample correlation coefficient for image enhancement. Int. J. Remote Sens. 27 (16), 3387–3401.
- Clark, R.N., Swayze, G.A., Gallagher, A., King, T.V.V. and Calvin, W.M., 1993. The U.S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 microns: U.S. Geological Survey Open File Report 93-592, 1340 p., <http://speclab.cr.usgs.gov> (August 1999).
- Colby, J.D., 1991. Topographic normalization in rugged terrain. Photogramm. Eng. Remote Sens. 57 (5), 531–537.
- Comon P., Jutten C. 2010 Handbook of blind source separation. New York, NY: Academic Press.
- Coolley, T., Anderson, G.P., Felde, G.W., Hoke, M.L., Ratkowski, A.J., Chetwynd, J.H., Gardner, J.A., Adler-Golden, S.M., Matthew, M.W., Berk, A., Bernstein, L.S., Acharya, P.K., Miller, D., Lewis, P., 2002. FLAASH, a MODTRAN4-based atmospheric correction algorithm, its application and validation. Proceedings of the Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2002, IEEE International, 3, 1414–1418.
- Crosta, A. and Moore, J., 1989. Enhancement of Landsat Thematic Mapper imagery for residual soil mapping in SW Minas Gerais State, Brazil: a prospecting case history in Greenstone belt terrain. In: Proceedings of the 7th ERMIM Thematic Conference: Remote Sensing for Exploration Geology, p. 1173–1187.
- Cudahy, T., Caccetta, M., Thomas, M., et al., 2016. Satellite-derived mineral mapping and monitoring of weathering, deposition and erosion. Sci. Rep. 6, 23702. <https://doi.org/10.1038/srep23702>.
- Deller, M.E.A., 2006. Facies discrimination in laterites using Landsat Thematic Mapper, ASTER and ALI data-example from Eritrea and Arabia. Int. J. Remote Sens. 27 (12), 2389–2409.
- Di Tommaso, I., Rubinstein, N., 2007. Hydrothermal alteration mapping using ASTER data in the Infiernillo porphyry deposit, Argentina. Ore Geol. Rev. 32, 275–290.
- Ducart, D.F., Crosta, A.P., Filio, C.R.S., 2006. Alteration mineralogy at the Cerro La Mina epithermal prospect, Patagonia, Argentina: field mapping, short-wave infrared spectroscopy, and ASTER images. Econ. Geol. 101, 981–996.
- Ducart, D.F., Silva, A.M., Toledo, C.L.B., Assis, L.M.d., 2016. Mapping iron oxides with landsat-8/OLI and EO-1/hyperion imagery from the serra norte iron deposits in the carajas mineral province, Brazil. Braz. J. Genet. 46 (3), 331–349.
- Duuring, P., Hagemann, S.G., Novikova, Y., Cudahy, T., Laukamp, C., 2012. Targeting Iron Ore in Banded Iron Formations Using ASTER Data: Weld Range Greenstone Belt, Yilgarn Craton, Western Australia. Econ. Geol. 107, 585–597.
- Fraser, S.J., 1991. Discrimination and identification of ferric oxides using satellite Thematic Mapper data: a Newman case study. Int. J. Remote Sens. 12, 635–641.
- Fujisada, H., 1995. Design and performance of ASTER instrument. Proceedings of SPEI, International Society of Optical Engineering 2583, 16–25.
- Gabr, S., Ghulam, A., Kusky, T., 2010. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. Ore Geol. Rev. 38 (1), 59–69.
- Gabr, S.S., Hassan, S.M., Sadek, M.F., 2015. Prospecting for new gold-bearing alteration zones at El-Hoteib area, South Eastern Desert, Egypt, using remote sensing data analysis. Ore Geol. Rev. 71, 1–13.
- Galvão, L.S., Almeida-Filho, R., Vitorello, L., 2005. Spectral discrimination of hydrothermally altered materials using ASTER short-wave infrared bands: evaluation in a tropical savannah environment. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinformation 7, 107–114.
- Gazel, J., Gerard, G., 1954. Carte géologique de reconnaissance du Cameroun au 1/500000, feuille de Batouri-Est avec notice explicative. Mémoire Direction des Mines et de la Géologie, Yaoundé, Cameroun, 43 p.
- Guerschman, J. P., Scarth, P.F., McVicar, T.R., Renzullo, L.J., Malthus, Stewart, J.B., Rickards, J.E., Trevithick, R., 2015. Assessing the effects of site heterogeneity and soil properties when unmixing photosynthetic vegetation, non-photosynthetic vegetation and bare soil fractions from Landsat and MODIS data. Remote Sensing of Environment 161, 12–26.
- Gupta, R.P., Tiwari, R.K., Saini, V., Srivastava, N., 2013. A simplified approach for interpreting principal component images. Advances in Remote Sensing 2, 111–119.
- Gupta, R.P. 2017. Remote Sensing Geology, 3rd edn. Springer, Berlin, Germany, pp 180–190, 235–240, and 332–336.
- Hunt, G., 1977. Spectral signatures of particulate minerals in the visible and near infrared. Geophysics 42, 501–513.
- Hunt, G.R., Ashley, P., 1979. Spectra of altered rocks in the visible and near infrared. Econ. Geol. 74, 1613–1629.
- Huntington, J.F., 1996. The role of remote sensing in finding hydrothermal mineral deposits on Earth. Evolution of Hydrothermal Ecosystems on Earth (and Mars?). Wiley, England, p. 214–234.
- Hyvärinen, A., 2013. Independent component analysis: recent advances. Phil Trans R Soc A 371, 20110534. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0534>.
- Hyvärinen, A., Zhang, K., Shimizu, S., Hoyer, P.O., 2010. Estimation of a structural vector autoregression model using non-Gaussianity. J. Mach. Learn. Res. 11, 1709–1731.
- Hyvärinen, A., 2005. A unifying model for blind separation of independent sources. Signal Process. 85, 1419–1427.
- Hyvärinen A., Karhunen J., Oja E., 2001. Independent component analysis. A Wiley-Interscience Publication, John Wiley & Sons, Inc. pp.1–12.
- Hyvärinen, A., Oja, E., 2000. Independent component analysis: algorithms and applications. Neural Networks 13 (4–5), 411–430.
- Inzana, J., Kusky, T., Higgs, G., Tucker, R., 2003. Supervised classifications of Landsat TM band ratio images and Landsat TM band ratio image with radar for geological interpretations of central Madagascar. J. Afr. Earth Sc. 37, 59–72.
- Irons, J.R., Dwyer, J.L., Barsi, J.A., 2012. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. Remote Sens. Environ. 145, 154–172.
- Iwasaki, A., Tonoooka, H., 2005. Validation of a crosstalk correction algorithm for ASTER/SWIR. IEEE Transactions Geoscience and Remote Sensing 43 (12), 2747–2751.
- Jensen, J.R., 2005. Introductory Digital Image Processing: A remote sensing perspective, Third edn. Pearson Prentice Hall, Upper Saddle River NJ 07458. pp. 276–287 and 296–301.
- Jolliffe, I.T., 2002. Principal Component Analysis. Second edn. Springer-Verlag, New York.
- Kankeu, B., Greiling, R.O., Nzenti, J.P., 2009. Pan-African strike-slip tectonics in eastern Cameroon-magnetic fabrics (AMS) and structure in the Lom basin and its neissic basement. Precamb. Res. 174, 258–272.
- Kauffmann, H., 1988. Mineral exploration along the Aqa-Levant structure by use of TM-data: concepts, processing and results. Int. J. Remote Sens. 9, 1639–1658.
- Kim, Y.H., Choe, K.U., Ri, R.K., 2019. Application of fuzzy logic and geometric average: A Cu sulfide deposits potential mapping case study from Kapsan Basin, DPR Korea. Ore Geol. Rev. 107, 239–247.
- Kruse, F.A., Perry, S.L., 2007. Regional mineral mapping by extending hyperspectral signatures using multispectral data. IEEE Trans. Geosci. Remote Sens. 4, 1–14.
- Liu, L., Zhuang, D.F., Zhou, J., Qiu, D.S., 2011. Alteration mineral mapping using masking and Crosta technique for mineral exploration in mid-vegetated areas: a case study in Areluetuobe, Xinjiang (China). Int. J. Remote Sens. 32, 1931–1944.
- Liu, L., Li, Y., Zhou, J., Han, L., Xu, X., 2018. Gold-copper deposits in Wushitala, Southern Tianshan, Northwest China: Application of ASTER data for mineral exploration. Geol. J. 53 (52), 362–371.
- Loughlin, W.P., 1991. Principal components analysis for alteration mapping. Photogramm. Eng. Remote Sens. 57, 1163–1169.
- Lyon, R.J.P., 1972. Infrared spectral emittance in geological mapping: airborne spectrometer data from Pisgah Crater. Science 7, 983–986.
- Mars, J.C., Rowan, L.C., 2011. ASTER spectral analysis and lithologic mapping of the Kancheshin carbonate volcano, Afghanistan. Geosphere 7, 276–289.
- Mars, J.C., Rowan, L.C., 2010. Spectral assessment of new ASTER SWIR surface reflectance data products for spectroscopic mapping of rocks and minerals. Remote Sens. Environ. 114, 2011–2025.
- Morris, R.V., Lauer, H.V., Lawson, C.A., Girson, E.K., Nace, G.A., Stewart, C., 1985.

- Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite ( $\alpha$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), maghemite ( $\beta$ -Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), magnetite (Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>), goethite ( $\alpha$ -FeOOH), and lepidocrocite ( $\beta$ -FeOOH). *J. Geophys. Res.* 90 (B4), 3126–3144.
- Murphy, R.J., Monteiro, S.T., 2013. Mapping the distribution of ferric iron minerals on a vertical mine face using derivative analysis of hyperspectral imagery (430–970 nm). *ISPRS J. Photogramm. Remote Sens.* 75, 29–39.
- Ngatcha, R.B., Okunlola, O.A., Suh, C.E., Ateh, K.I., Hofmann, A., 2019. Petrochemical characterization of Neoproterozoic Colomine granitoids, SE Cameroon: Implications for gold mineralization. *Lithos* 344–345, 175–192.
- Ninomiya, Y., 2003. A stabilized vegetation index and several mineralogical indices defined for ASTER VNIR and SWIR data. *Proc. IEEE 2003 International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS'03) v. 3*, Toulouse, France, 21–25 July 2003, p. 1552–1554.
- Ninomiya, Y., Fu, B., Cudahy, T.J., 2005. Detecting lithology with Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER) multispectral thermal infrared radiance-at-sensor data. *Remote Sens. Environ.* 99 (1–2), 127–139.
- Noda, S., Yamaguchi, Y., 2017. Estimation of surface iron oxide abundance with suppression of grain size and topography effects. *Ore Geol. Rev.* 83, 312–320.
- Noori, L., Pour, B.A., Askari, G., Taghipour, N., Pradhan, B., Lee, C.-W., Honarmand, M., 2019. Comparison of Different Algorithms to Map Hydrothermal Alteration Zones Using ASTER Remote Sensing Data for Polymetallic Vein-Type Ore Exploration: Toroud-Chahshirin Magmatic Belt (TCMB), North Iran. *Remote Sensing* 11, 495.
- Novák, V., Perfilieva, I., Močkoř, J., 1999. *Mathematical principles of fuzzy logic*. Dordrecht: Kluwer Academic. ISBN 978-0-7923-8595-0.
- Nykanen, V., Groves, D.I., Ojala, V.J., Eilu, P., Gardoll, S.J., 2008. Reconnaissance-scale conceptual fuzzy-logic prospectivity modelling for iron oxide copper – gold deposits in the northern Fennoscandian Shield, Finland. *Australian Journal of Earth Sciences* 55 (1), 25–38.
- Osei, B.A., Singh, B., 1999. Electrophoretic mobility of some tropical soil clays: effect of iron oxides and organic matter. *Geoderma* 93, 325–334.
- Pohl, C., Van Genderen, J.L., 1998. Review article: Multisensor image fusion in remote sensing: concepts, methods and applications. *Int. J. Remote Sens.* 19 (5), 823–854.
- Pour, B.A., Hashim, M., van Genderen, J., 2013. Detection of hydrothermal alteration zones in a tropical region using satellite remote sensing data: Bau gold field, Sarawak, Malaysia. *Ore Geol. Rev.* 54, 181–196.
- Pour, B.A., Hashim, M., aMarghany, M., 2014. Exploration of gold mineralization in a tropical region using Earth Observing-1 (EO1) and JERS-1 SAR data: a case study from Bau gold field, Sarawak, Malaysia. *Arabian Journal of Geosciences* 7(6), 2393–2406.
- Pour, B.A., Hashim, M., 2015a. Hydrothermal alteration mapping from Landsat-8 data, Sar Cheshmeh copper mining district, south-eastern Islamic Republic of Iran. *Journal of Taibah University for Science* 9, 155–166.
- Pour, B.A., Hashim, M., 2015b. Integrating PALSAR and ASTER data for mineral deposits exploration in tropical environments: a case study from Central Belt, Peninsular Malaysia. *International Journal of Image and Data Fusion* 6 (2), 170–188.
- Pour, A.B., Hashim, M., Park, Y., Hong, J.K., 2018a. Mapping alteration mineral zones and lithological units in Antarctic regions using spectral bands of ASTER remote sensing data. *Geocarto International* 32 (12), 1281–1306.
- Pour, A.B., Park, Y., Park, T.S., Hong, J.K., Hashim, M., Woo, J., Ayoobi, I., 2018b. Evaluation of ICA and CEM algorithms with Landsat-8/ASTER data for geological mapping in inaccessible regions. *Geocarto International*. <https://doi.org/10.1080/10106049.2018.1434684>.
- Pour, A.B., Park, Y., Park, T.S., Hong, J.K., Hashim, M., Woo, J., Ayoobi, I., 2018c. Regional geology mapping using satellite-based remote sensing approach in Northern Victoria Land, Antarctica. *Polar Sci.* 16, 23–46.
- Pour, A.B., Park, T.S., Park, Y., Hong, J.K., Zoheir, B., Pradhan, B., Ayoobi, I., Hashim, M., 2018d. Application of multi-sensor satellite data for exploration of Zn-Pb sulfide mineralization in the Franklinian Basin, North Greenland. *Remote Sensing* 10, 1186. <https://doi.org/10.3390/rs10081186>.
- Pour, A.B., Hashim, M., Hong, J.K., Park, Y., 2019a. Lithological and alteration mineral mapping in poorly exposed lithologies using Landsat-8 and ASTER satellite data: north-eastern Graham Land, Antarctic Peninsula. *Ore Geol. Rev.* 108, 112–133.
- Pour, A.B., Park, Y., Crispini, L., Läufer, A., Kuk Hong, J., Park, T.-Y.S., Zoheir, B., Pradhan, B., Muslim, A.M., Hossain, M.S., Rahmani, O., 2019b. Mapping Listvenite Occurrences in the Damage Zones of Northern Victoria Land, Antarctica Using ASTER Satellite Remote Sensing Data. *Remote Sensing* 11, 1408. <https://doi.org/10.3390/rs11121408>.
- Pour, A.B., Park, T.-Y., Park, Y., Hong, J.K., Muslim, A.M., Läufer, A., Crispini, L., Pradhan, B., Zoheir, B., Rahmani, O., Hashim, M., Hossain, M.S., 2019c. Landsat-8, Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer, and WorldView-3 Multispectral Satellite Imagery for Prospecting Copper-Gold Mineralization in the Northeastern Inglefield Mobile Belt (IMB), Northwest Greenland. *Remote Sens.* 2019 (11), 2430. <https://doi.org/10.3390/rs11202430>.
- Rajendran, S., Nasir, S., 2017. Characterization of ASTER spectral bands for mapping of alteration zones of volcanogenic massive sulphide deposits. *Ore Geol. Rev.* 88, 317–335.
- Ranjbar, H., Honarmand, M., Moezifar, Z., 2004. Application of the Crosta technique for porphyry copper alteration mapping, using ETM+ data in the southern part of the Iranian volcanic sedimentary belt. *J. Asian Earth Sci.* 24, 237–243.
- Research Systems, Inc. 2008. ENVI Tutorials. Research Systems, Inc., Boulder, CO.
- Rockwell, B.W., Hofstra, A.H., 2008. Identification of quartz and carbonate minerals across northern Nevada using ASTER thermal infrared emissivity data, implications for geologic mapping and mineral resource investigations in well-studied and frontier areas. *Geosphere* 4 (1), 218–246.
- Roy, D.P., Wulder, M.A., Loveland, T.A., Woodcock, C.E., Allen, R.G., Anderson, M.C., 2014. Landsat-8: Science and product vision for terrestrial global change research. *Remote Sens. Environ.* 145, 154–172.
- Salem, S.M., El Sharkawi, M., El-Alfy, Z., Soliman, N.M., Ahmed, S.E., 2016. Exploration of gold occurrences in alteration zones at Dungash district, Southeastern Desert of Egypt using ASTER data and geochemical analyses. *J. Afr. Earth Sc.* 117, 389–400.
- Salisbury, J.W., Walter, L.S., 1989. Thermal infrared (2.5–13.5  $\mu$ m) spectroscopic remote sensing of igneous rock types on particulate planetary surfaces. *Journal of Geophysical Research* 94 B7, 9192–9202.
- Salles, R.R., Filho, C.R.S., Cudahy, T., Vicente, L.E., Monteiro, L.V.S., 2016. Hyperspectral remote sensing applied to uranium exploration: A case study at the Mary Kathleen metamorphic-hydrothermal U-REE deposit, NW, Queensland, Australia. *J. Geochem. Explor.* 179, 36–50.
- Schowengerdt, R.A., 2007. *Remote sensing: models and methods for image processing*, 3rd edn. Academic Press, Elsevier, Burlington, MA, 193–202 and 229–243.
- Sherman, D.M., Waite, T.D., 1985. Electronic spectra of Fe<sup>3+</sup> oxides and oxide hydroxides in the near IR to near UV. *Am. Mineral.* 70, 1262–1269.
- Sheikhrhimi, A., Pour, B.A., Pradhan, B., Zoheir, B., 2019. Mapping hydrothermal alteration zones and lineaments associated with orogenic gold mineralization using ASTER remote sensing data: a case study from the Sanandaj-Sirjan Zone, Iran. *Advances in Space Research* 63, 3315–3332.
- Shimizu, S., 2012. Joint estimation of linear non-Gaussian acyclic models. *Neurocomputing* 81, 104–107.
- Singh, A., Harrison, A., 1985. Standardized principal components. *Int. J. Remote Sens.* 6, 883–896.
- Soba, D., 1989. Thèse de doctorat d'État. La série du Lom: étude géologique et géochronologique d'un bassin volcano-sédimentaire de la chaîne panafricaine à l'Est du Cameroun, vol. 6. Université Pierre et Marie Curie Paris 198, p.
- Suh, C.E., Lehmann, B., Mafany, G.T., 2006. Geology and geochemical aspects of lode gold mineralization at Dimako-Mboscorro SE Cameroon. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis* 6, 295–309.
- Takodjou Wambo, J.D., Ganno, S., Afahnwie, N.A., Nomo, N.E., Mvondo, O.J., Nzenti, J.P., 2016. Use of Landsat 7 ETM+ data for the geological structure interpretation: case study of the Ngoura Colomines area, Eastern Cameroon. *Journal of Geoscience and Geomatics* 4 (3), 61–72.
- Takodjou Wambo, J.D., 2017. *Structural Study and Evaluation of the Gold Potential in Ngoura-colomines (East Region - Cameroon)*. Unpublished Master thesis, University of Bamenda, Cameroon, p. 113.
- Takodjou Wambo, J.D., Ganno, S., Djonthu Lahe, Y.S., Kouankap Nono, G.D., Fossi, D.H., Tchouatcha, M.S., Nzenti, J.P., 2018. Geostatistical and GIS analysis of the spatial variability of alluvial gold content in Ngoura-Colomines area, Eastern Cameroon: Implications for the exploration of primary gold deposit. *J. Afr. Earth Sc.* 142, 138–157.
- Tata, E., Suh, C.E., Vishiti, A., Shemang, E.M., Fon, A.N., Ateh, K.I., Chombong, N. N., 2018. Wallrock alteration categories and their geochemical signatures in gold-bearing Neoproterozoic granitoids, Batouri gold district, southeastern Cameroon. *Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis*, DOI: <https://doi.org/10.1144/geo2016-017>.
- Toteu, S.F., Van Schmus, R.W., Penaye, J., Michard, A., 2001. New U-Pb and Sm-Nd data from North-Central Cameroon and its bearing on the Pre-Pan-African history of Central Africa. *Precamb. Res.* 108, 45–73.
- Van der Meer, F.D., Van der Werff, H.M.A., Van Ruitenbeek, F.J.A., Hecker, C.A., Bakker, W.H., Noomen, M.F., Van der Meijde, M., Carranza, E.J.M., Smeth, J.B., Woldai, T., 2012. Multi-and hyperspectral geologic remote sensing: a review. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 14, 112–128.
- Vicente, L.E., Filho, C.R.S., 2011. Identification of mineral components in tropical soils using reflectance spectroscopy and advanced spaceborne thermal emission and reflection radiometer (ASTER) data. *Remote Sens Environ.* 115 (8), 1824–1836.
- Vishiti, A., 2009. *Primary and eluvial gold in the Batouri North Gold District, south-eastern Cameroon*. Unpublished M.Sc. thesis, University of Buea, Cameroon, 75 p.
- Yamaguchi, Y.I., Fujisada, H., Kudoh, M., Kawakami, T., Tsu, H., Kahle, A.B., Pniel, M., 1999. ASTER instrument characterization and operation scenario. *Advanced Space Research* 23 (8), 1415–1424.
- Yamaguchi, Y.I., Fujisada, H., Kahle, A.B., Tsu, H., Kato, M., Watanabe, H., Sato, I., Kudoh, M., 2001. ASTER instrument performance, operation status, and application to Earth sciences. *IEEE Transactions of Geosciences and Remote Sensing* 1215–1216.
- Zadeh, L.A., 1965. Fuzzy sets. *Inf. Control* 8 (3), 338–353. [https://doi.org/10.1016/s0019-9958\(65\)90241](https://doi.org/10.1016/s0019-9958(65)90241).
- Zhang, N., Zhou, K., Du, X., 2017. Application of fuzzy logic and fuzzy AHP to mineral prospectivity mapping of porphyry and hydrothermal vein copper deposits in the Dananhu-Tousuquan island arc, Xinjiang, NW China. *J. Afr. Earth Sc.* 128, 84–96.
- Zhang, X., Micha, P., Norman, D., 2007. Lithologic and mineral information extraction for gold exploration using ASTER data in the south chocolate mountains (California). *Journal of Photogrammetry Remote Sensing* 62, 271–282.
- Zimmermann, H.J., Zysno, P., 1980. Latent connectives in human decision making. *Fuzzy Sets Syst.* 4 (1), 37–51.
- Zoheir, B., Emam, A., El-Amawy, M., Abu-Alam, T., 2017. Auriferous shear zones in the central Allaqi-Heiani belt: Orogenic gold in post-accretionary structures, SE Egypt. *J. African Earth Sci.* 146, 118–131. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.10.017>.