RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie
******
UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I
******
CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES TECHNOLOGIES ET GÉOSCIENCES
****
UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE PHYSIQUE ETAPPLICATIONS
****
B.P 812 Yaoundé
E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland
****
UNIVERSITY OF YAOUNDE I
****
OSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES
****
DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR PHYSICS AND APPLICATIONS
****
P.O Box 812 Yaoundé
E-mail: crfd_stg@uy1.uninet.cm

LABORATOIRE DE PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE

LABORATORY OF PHYSICS OF EARTH'S ENVIRONMENT

CONTRIBUTION DE LA GEOPHYSIQUE A L'ETUDE DE CERTAINS MATERIAUX LOCAUX DESTINES A LA REALISATION DES OUVRAGES D'ART AU CAMEROUN

Mémoire de Thèse présenté en vue de l'obtention du Diplôme de Doctorat/PhD of Science en Physique
Option : Géophysique et Géo exploration
Par :

TCHATO Sandra Céleste

Master of Sciences

Matricule : 15U2009

BIBLIOTHEQUE UNIVERSITAIRE UY1

Sous la direction de :

NJANDJOCK NOUCK Philippe
Professeur / Université de Yaoundé I

MANGUELLE-DICOUM Eliézer
Professeur Emérite / Université de Yaoundé I

Année 2024

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie
****
UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I
****
FACULTÉ DES SCIENCES
****
DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE
B.P.: 812 Yaoundé, Tel/Fax: 222 234 496

REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland
****
UNIVERSITY OF YAOUNDÉ I
****
FACULTY OF SCIENCE
****
DEPARTMENT OF PHYSICS
P.O. Box: 812 Yaoundé, Tel/Fax: 222 234 496

ATTESTATION DE CORRECTION DE LA THÈSE DE DOCTORAT/Ph.D

Nous, Professeur **DJUIDJE KENMOE Germaine** et Professeur **NOUAYOU Robert**, respectivement Examinateur et Président du jury de la thèse de Doctorat/Ph.D de Madame **TCHATO Sandra Céleste**, matricule **15U2009**, préparée sous la co-direction du Professeur **NJANDJOCK NOUCK Philippe** et du Profeseur **MANGUELLE-DICOUM Eliézer** intitulée : «***Contribution de la géophysique à l'étude de certains matériaux locaux destinés à la réalisation des ouvrages d'art au Cameroun***», soutenue le **Mardi 17 Septembre 2024**, attestons que toutes les corrections demandées par le jury de soutenance ont été effectuées.

En foi de quoi, la présente attestation lui est délivrée pour servir et valoir ce que de droit.

Fait à Yaoundé le 25 SEPT 2024

Examinateur	**Président du jury**	**Chef de Département de Physique**
Pr DJUIDJE KENMOE Germaine	**Pr NOUAYOU Robert**	**Pr NDJAKA Jean-Marie Bienvenu**

UNIVERSITE DE YAOUNDE I FACULTE DES SCIENCES Le Chef de Département DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

RÉPUBLIQUE DU CAMEROUN
Paix-Travail-Patrie
******
UNIVERSITÉ DE YAOUNDÉ I
******
CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES TECHNOLOGIES ET GÉOSCIENCES
****
UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION DOCTORALE PHYSIQUE ETAPPLICATIONS
****
B.P 812 Yaoundé
E-mail : crfd_stg@uy1.uninet.cm

REPUBLIC OF CAMEROON
Peace-Work-Fatherland
****
UNIVERSITY OF YAOUNDE I
****
OSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE, TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES
****
DOCTORATE RESEARCH UNIT FOR PHYSICS AND APPLICATIONS
****
P.O Box 812 Yaoundé
E-mail: crfd_stg@uy1.uninet.cm

LABORATOIRE DE PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT

TERRESTRE

LABORATORY OF PHYSICS OF EARTH'S ENVIRONMENT

CONTRIBUTION DE LA GEOPHYSIQUE A L'ETUDE DE CERTAINS MATERIAUX LOCAUX DESTINES A LA REALISATION DES OUVRAGES D'ART AU CAMEROUN

Mémoire de Thèse présenté en vue de l'obtention du
Diplôme de Doctorat/PhD of Science en Physique
Option : Géophysique et Géo exploration
Par :

TCHATO Sandra Céleste

Master of Sciences

Matricule : 15U2009

Sous la direction de :

NJANDJOCK NOUCK Philippe — **Professeur / Université de Yaoundé I**

MANGUELLE-DICOUM Eliézer — **Professeur Emérite / Université de Yaoundé I**

Année 2024

DEDICACE

Dédicace à :

Ma feu grand-mère NJIKE Marie Claire

REMERCIEMENTS

Parvenue au terme de cette thèse, qu'il me soit permis de remercier avant tout, le Tout-Puissant qui par la vie et la santé qu'Il m'a données, m'a permis de mener à bien cette thèse jusqu'à son achèvement.

J'exprime ma profonde gratitude à mon Directeur de thèse, Professeur Philippe NJANDJOCK NOUCK pour son indéfectible accompagnement durant cette aventure. Son expérience, son érudition, ont fortement contribué à la réussite de cette thèse.

J'adresse également mes sincères remerciements au Professeur Emérite, Sa Majesté Eliézer MANGUELLE-DICOUM qui a bien voulu codiriger cette thèse.

Un vibrant merci à mes camarades Docteur Blaise Pascal GOUNOU POKAM, Docteur Ibrahim MBOUOMBOUO NGAPOUTH, Docteur Ariane GWETH Marthe MBOND, Docteur Yvonne POUFONE KOFFI, André Michel POUTH NKOMA, qui se sont toujours montrés obligeants et disponibles quand il fallait faire des campagnes de terrain relativement à cette thèse.

Un grand merci au Docteur Euloge Felix KAYO POKAM pour son soutien.

Je remercie le Docteur Zachari ARETOUYAP pour son accompagnement.

Mes remerciements vont également à l'endroit des Professeurs Germaine DJUIDJE KENMOE, Jorelle Larissa MELI'I, Robert NOUAYOU, Janvier DOMRA KANA, qui ont bien voulu faire partie du jury de cette thèse.

J'aimerais remercier également le Recteur de l'Université de Yaoundé I, pour m'avoir donné l'opportunité de faire cette thèse, à travers la signature de la liste de sélection en thèse portant mon nom.

Que messieurs le Doyen de la Faculté des Sciences et les Vice-Doyens, trouvent ici l'expression de ma profonde gratitude pour leur encadrement et leur facilitation administrative.

Je remercie le Chef du Département de Physique pour le climat propice de travail qu'il assure au sein du Département.

Je tiens à remercier enfin :

Mon adorable fille Ursule Chloé NJIKE BIWOLE pour son amour.

Ma tendre mère, KAMGA NYA Eveline pour son soutien, ses encouragements et ses conseils. Qu'elle trouve ici l'expression de ma gratitude sans fin.

Mon père, Professeur NKWABONG Elie pour ses conseils et son soutien.

Mon grand-frère bien aimé, NYA DJAFFA Henri-Joël pour son soutien incessant. Grandement merci.

Mes sœurs bien aimées, Laura Danielle NJIKE et Barbara Nicole NJIKE pour leur soutien.

Mes adorables neveux, Evan Noé WANDJI YONDJEU et Claire Léa WANDJI NJIKE pour la bonne atmosphère qu'ils ont toujours distillée.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE i

REMERCIEMENTS ii

TABLE DES MATIERES iv

LISTE DE FIGURES viii

LISTE DES TABLEAUX xi

SYMBOLE ET ABREVIATIONS xii

RESUME xvii

ABSTRACT xviii

INTRODUCTION GENERALE 1

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES OUVRAGES D'ART, LES MATERIAUX LOCAUX ET LA GEOPHYSIQUE 5

Introduction 6

1.1 Définitions 6

1.1.1 Géophysique 6

1.1.2 Matériaux locaux 6

1.1.3 Ouvrages d'art 7

1.1.3.1 Ouvrages d'art liés à des voies de communication 7

1.1.3.2 Ouvrages d'art destinés à la protection contre l'action de la terre ou de l'eau 8

1.1.3.3 Ouvrages d'art destinés à la retenue des eaux 8

1.2 Microstructure du béton 15

1.3 Cas de l'utilisation des matériaux locaux dans la construction des chaussées 16

1.4 Présentation de la zone d'étude 17

1.4.1 Localisation géographique 17

1.4.2 Contexte géologique 18

1.4.3 Réseau routier 21
1.4.4 Relief et sols 25
1.4.4.1 Relief 25
1.4.4.2 Sols 25
1.5 Généralités sur les modes d'acquisition des données par la méthode électromagnétique 28
1.5.1 Méthodes électromagnétiques in situ 29
1.5.1.1 Méthode tellurique 29
1.5.1.2 Méthode magnétotellurique 29
1.5.2 Méthodes électromagnétiques aéroportées *(EMA)* 30
1.5.3 Méthode électromagnétique satellitaire 32
1.6 Travaux antérieurs dans la zone d'étude 33
1.6.1 Travaux gravimétriques 33
1.6.2 Travaux magnétiques et aéromagnétiques 34
1.6.3 Travaux électromagnétiques satellitaires 36
Conclusion 37
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES 38
Introduction 39
2.1 Géomatique et matériel utilisé 39
2.1.1 Données spectrales Landsat 8 OLI/TIRS 39
2.1.2. Données spectrales SRTM 40
2.1.3 Télédétection 42
2.1.3.1 Eléments constituant les systèmes de télédétection 43
2.1.3.2 Principe de la télédétection 43
2.1.3.3 Ondes électromagnétiques 45
2.1.3.4 Spectre électromagnétique 47
2.1.3.5 Rayonnement et énergie 49

2.1.3.6 Mesure du rayonnement 52

2.1.3.7 Quelques applications de la télédétection..... 55

2.1.4 Méthodes 56

2.1.4.1 Prétraitement..... 56

2.1.4.2 Traitement……58

2.2 Travaux de terrain et matériel utilisé..... 64

2.2.1 Boussole 64

2.2.2 Décamètre 65

2.2.3 Récepteur GPS 66

Conclusion 67

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION..... 68

Introduction..... 69

3.1 Résultats 69

3.1.1 Production des cartes géoréférencées de la route nationale N3, des accidents tectoniques, ainsi que des formations géologiques et pédologiques y rencontrées…...69

3.1.2 Production de la carte du réseau routier..... 73

3.1.3 Production de la carte des linéaments obtenue dans la zone d'étude 75

3.1.4 Production de la carte de localisation des matériaux locaux 82

3.2. Validation des résultats et discussion..... 90

3.2.1 Validation de la carte routière..... 90

3.2.2 Corrélation de la carte de linéaments avec la carte géologique..... 90

3.2.3 Corrélation de la carte de linéaments avec certains travaux géophysiques antérieurs. 93

3.2.4 Corrélation de la carte de linéaments avec la carte altimétrique 94

3.2.5 Corrélation de la carte de linéaments avec la carte de pentes..... 95

3.2.6 Corrélation de la carte de pente avec le réseau routier 96

3.2.7 Corrélation des linéaments avec le réseau routier..... 96

Conclusion 106

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES 107

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES 107

LISTE DE FIGURES

Figure 1.1 Route (investir au Cameroun, 2018)……..9

Figure 1.2 Autoroute (Saimondy actualités, 2018)…..…….... 9

Figure 1.3 Pont (EcoMatin, 2018)……..... 10

Figure 1.4 Viaduc (Agenda Culturel du Cameroun, 2021)……....10

Figure 1.5 Tunnel (EcoMatin, 2019)…….....11

Figure 1.6 Mur de soutènement (Structurae, 2020)……11

Figure 1.7 Jetée (Allala, 2005)…….....12

Figure 1.8 Barrage (La Tribune Afrique, 2020)……12

Figure 1.9 Images de quelques catastrophes naturelles sur les routes. (a) Cisaillement longitudinal d'une route, (b) Effondrement longitudinal d'une route (123 BF, 2021)……...13

Figure 1.9 Images de quelques catastrophes naturelles sur les routes. (c) Cisaillement transversal d'une route (Colmaroute, 2014), (d) effondrement transversal d'une route (Courrier des Journalistes, 2018)…….....14

Figure 1.9 Images de quelques catastrophes naturelles sur les routes. (e) Eboulement sur une route (Journal de Millau, 2017)……15

Figure 1.10. Structure d'une chaussée (Ordener, 2023)…….…….17

Figure 1.11 Carte géologique de la zone d'étude modifiée de Kankeu et al., 2018, montrant les principaux domaines lithotectoniques…….20

Figure 1.12 Carte du réseau routier (Mbouombouo et al, 2022)…….....22

Figure 1.13 Carte du réseau routier (OpenStreetMap)…….....23

Figure 1.14 Carte du réseau routier (Google Map)…….24

Figure 1.15 Carte pédologique (modifiee de Muller et Gavaud, 1979)…….....27

Figure 1.16 Quelques systèmes électromagnétiques embarqués sur avion (Levaniemi et al., 2009)……31

Figure 1.17 Quelques systèmes électromagnétiques embarqués sur hélicoptère (Fountain et al., 2005)…….32

Figure 2.1 Principe de fonctionnement général des systèmes de télédétection (El Houcine, 2020).……. 44

Figure 2.2 Onde électromagnétique simple (monochromatique et plane) (Kergomard, 2017)…….....46

Figure 2.3 Spectre électromagnétique (Kergomard, 2017)…….....48
Figure 2.4 Spectre du visible et longueurs d'onde y associées……. 48
Figure 2.5 Interaction du rayonnement solaire avec la surface…….....50
Figure 2.6 Signature spectrale de quelques objets…….51
Figure 2.7 Angle solide élémentaire en coordonnées sphériques……..52
Figure 2.8 Mosaïque des différentes images SRTM…….....57
Figure 2.9 Mosaïque des différentes images Landsat 8 OLI…….....58
Figure 2.10 Organigramme de la méthodologie utilisée……62
Figure 2.11 Boussole…….65
Figure 2.12 Décamètre……..65
Figure 2.13 Récepteur GPS……...66
Figure 3.1 Carte de (a) la route nationale N3 géoréférencée et des (b) failles, fractures et zones de pente sur la route nationale N3……70
Figure 3.1 Carte des (c) formations géologiques et (d) pédologiques le long de la route nationale N3…….....71
Figure 3.2 Carte du réseau routier…….....……...74
Figure 3.3 Carte des linéaments extraits à partir des images Landsat 8……....76
Figure 3.4 Carte des linéaments extraits à partir des images SRTM…….77
Figure 3.5 (a) Carte de linéaments…….... 78
Figure 3.5 (b) Rosace directionnelle des linéaments en fonction de la longueur.....79
Figure 3.5 (c) Rosace directionnelle des linéaments en fonction de la fréquence…....79
Figure 3.6 Carte de densité des linéaments……81
Figure 3.7 Carte de pentes…….....83
Figure 3.8 Carte des courbes de niveau…….....84
Figure 3.9 Carte altimétrique…….....87

Figure 3.10 Carte des formations géologiques ……..……...88
Figure 3.11 Carte des formations pédologiques……....89
Figure 3.12 Carte de linéaments superposés aux failles géologiques……..…..91
Figure 3.13 (a) Zone de faille et fracture interceptant le réseau routier……....97
Figure 3.13 (b) Diagramme de rose en fonction de la fréquence, **(c)** diagramme de rose en fonction de la longueur.....98

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2.1 Caractéristiques du capteur OLI……....40

Tableau 2.2 Information sur les scènes Landsat 8 OLI/TIRS acquises …….....41

Tableau 2.3 Matrices de convolution 7×7 des filtres directionnels de Sobel ……...60

Tableau 2.4 Valeurs des paramètres appliqués pour l'extraction des linéaments….....63

Tableau 3.1 Coordonnées des différentes failles, fractures et pentes le long de la route nationale N3……..……72

Tableau 3.2 Statistiques de base des linéaments extraits……...80

Tableau 3.3 Equivalence entre les linéaments obtenus et les failles géologiques…….92

Tableau 3.4 Statistiques de base des zones de faille et fracture interceptant le réseau routier……98

Tableau 3.5 Types d'accident pouvant survenir sur les routes étudiées, ainsi que les formations géologiques et pédologiques environnantes……..99

SYMBOLE ET ABREVIATIONS

d :dérivée

d^2 : dérivée seconde

sin : sinus

$\int$: intégral

$\iint$: double intégral

$\sum$ **:** somme

d^4 : dérivée quatrième

cos : cosinus

DY : domaine de Yaoundé

DAY : domaine d'Adamaoua-Yadé

DOC : domaine de l'Ouest Cameroun

ZCTB : zone de cisaillement de Tcholliré-Banyo

ZCCC : zone de cisaillement centre camerounais

ZCKC : zone de cisaillement de Kribi-Campo

ZCM : zone de cisaillement de Meiganga

ZCS : zone de cisaillement de la Sanaga

ZCSC : zone de cisaillement sud camerounais

FF : faille de Foumban

ZCBO : zone de cisaillement de Betaré-Oya

LVC : ligne volcanique du Cameroun

ZF : zone de faille

ZP : zone de pente

IRGM : institut de recherche géologique et minière

SRTM : shuttle radar topographic mission

MNT : modèle numérique de terrain

GPS : global positioning system

GTHR: gradient threshold

LTHR: length threshold

FTHR: line fitting error threshold

ATHR: angular difference threshold

DTHR: linking distance threshold

EGM: earth gravity model

AMT : audio-magnétotellurique

EMA : méthodes électromagnétiques aéroportées

ACP : analyse en composante principale

OLI: operational Land Imager

TIRS: thermal Infrared Sensor

PIR: proche infra-rouge

IRM : infra-rouge Moyen

NASA : national aeronautics and space administration

AEM : airbone electromagnetics

TEM : transient electromagnetic

FEM : frequency electromagnetic

N-S: nord-sud

E-W : est−ouest

NE-SO : nord-est − sud-ouest

NO-SE : nord-ouest − sud-est

N0° : nord 0°

N45° : nord 45°

N90° : nord 90°

N135° : nord 135°

E : éclairement ($W.m^{-2}$)

ρ(λ): réflectance

M : émittance ($W.m^{-2}$)

L : luminance ($W.m^{-2}.sr^{-1}.\ \mu m^{-1}$)

Φ : flux énergétique

sr : stéradian

µm : micromètre

r : rayon

w : watt

J: joule

s: seconde

Hz: hertz

ν: fréquence (Hz)

T : période (s)

h: constante de Planck (J.s)

$d^2\Omega$: angle solide

d^2S : élément de surface

c : célérité (m. s^{-1})

λ : longueur d'onde (μm)

φ: altitude

θ_s: angle d'éclairement

θ': demi-angle au sommet

ϵ(λ): énergie spectrale

m : mètre

s : seconde

Ω : angle solide

dt: temps

ZPEb : zone de possible éboulement

ZPEf : zone de possible effondrement

ZPCi : zone de possible cisaillement

Trans : transversal

Long : longitudinal

RESUME

L'explosion démographique sans cesse croissante dans le monde en général et au Cameroun en particulier, a pour conséquence entre autres l'augmentation de la demande en infrastructures (routes, autoroutes, ponts, viaducs, etc.) pour le déplacement des personnes et des biens. La construction de ces ouvrages d'art nécessite l'utilisation de grandes quantités de matériaux en général, et de matériaux locaux en particulier, d'où l'importance de les cartographier. Toutefois, ces ouvrages connaissent souvent de nombreuses catastrophes dues à l'activité tectonique dans l'écorce terrestre. Il est donc nécessaire de cartographier non seulement les matériaux locaux mais également d'évaluer les catastrophes pouvant survenir sur le réseau routier en vue d'une utilisation optimale desdits matériaux dans la construction et l'entretien de ces infrastructures. A cet effet, à partir des données in situ, télédétectées, couplées aux systèmes d'informations géométriques et photogrammétriques, la carte du réseau routier a ainsi été établie et un inventaire des différents accidents qu'il peut subir a été fait. 376 failles et fractures interceptant le réseau routier ont ainsi été cartographiées, parmi lesquelles 256 fractures, 117 failles, 3 structures linéaires correspondant à des fractures dans l'une de leur portion et à des failles dans leur prolongement. La carte des matériaux locaux a ensuite été réalisée, renseignant sur la localisation de huit différents types de roches et deux types de sol généralement utilisés dans la construction routière en particulier, et dans la construction des ouvrages d'art en général à savoir, les gneiss, les basaltes, les granites, les quartzites, les schistes, les micaschistes, les gabbros, les grès, les sols latéritiques et les sols argilo-sableux.

Mots clés : Télédétection, photogrammétrie, infrastructure, ouvrage d'art, faille, fracture, matériaux locaux, activité tectonique.

ABSTRACT

The ever-increasing demographic explosion in the world in general, and in Cameroon in particular, has resulted in a growing demand for infrastructure (roads, motorways, bridges, viaducts, etc.) to move people and goods. The construction of these structures requires the use of large quantities of materials in general, and local materials in particular, hence the importance of mapping them. However, these structures often suffer numerous disasters due to tectonic activity in the earth's crust. It is therefore necessary not only to map local materials but also to assess the disasters that can occur on the road network with a view to optimising the use of these materials in the construction and maintenance of these infrastructures. To this end, using in situ and remotely sensed data, coupled with geometric and photogrammetric information systems, a map of the road network was drawn up and an inventory made of the various accidents it may be subject to. 376 faults and fractures intercepting the road network were mapped, including 256 fractures, 117 faults, 3 linear structures corresponding to fractures in one of their portions and faults in their extension. The map of local materials was then produced, providing information on the location of eight different types of rock and two types of soil generally used in road construction in particular, and in the construction of engineering structures in general, namely gneiss, basalt, granite, quartzite, schist, mica schist, gabbro, sandstone, lateritic soil and sandy-clay soil.

Key words: Remote sensing, photogrammetry, infrastructure, engineering structures, faults, fractures, local materials, tectonic activity.

INTRODUCTION GENERALE

Les ouvrages d'art constituant depuis l'antiquité un moyen de communication et d'échange entre les nations, les peuples et les civilisations, sont très utilisés dans le monde entier en général et en Afrique, en particulier. En raison de la nature géographique de la région, où de nombreux pays sont enclavés, les importations et les exportations de marchandises se font principalement par voie terrestre (Porhel et Léon, 2014 ; UNDRR, 2023). En effet, ces ouvrages permettant la fluidité de la circulation des personnes et des biens, l'accroissement des échanges commerciaux nationaux et internationaux, contribuent au désenclavement des zones rurales, à la réduction de la pauvreté, à la croissance économique ainsi qu'à l'amélioration de l'accès aux services sociaux de base et à l'intégration régionale. En raison du manque de connectivité et de facilité de déplacement des biens et des personnes, il est encore coûteux de faire des affaires en Afrique subsaharienne par rapport à d'autres pays en voie de développement et développés (Totouom, 2018). Cela affecte la capacité de la région à développer des chaînes de valeur régionales durables et des industries compétitives, impactant négativement sur le développement économique de nombreux pays africains et particulièrement dans la sous-région Afrique Centrale (Cadot et al., 2016).

Au Cameroun, le gouvernement a adopté la vision de l'émergence à l'horizon 2035 et parmi les secteurs jugés porteurs de croissance, figure en bonne place, l'industrie d'exploitation des ressources minérales (mines et carrières) (Tchapga, 2019). La valorisation de ces ressources minérales nécessite la construction des ouvrages d'art, et cette situation a généré une demande croissante sur les matériaux de construction à l'instar des agrégats de roches (latérites, gneiss, basaltes, grès, etc.) majoritairement. Ces agrégats sont issus des opérations de séparation mécanique (concassage, broyage et classification) réalisées sur des roches massives d'origine naturelle. Ces opérations de traitement leur confèrent une irrégularité de forme, leur permettant ainsi de réduire les vides observés dans le béton par exemple, tout en augmentant la résistance de compression (Vijayraghavan et Wayal, 2013). Il est donc important de cartographier toute structure pouvant constituer un réservoir de matériaux locaux telles que les collines (pouvant être détruites pour en faire des agrégats). Dans ce travail, la géophysique est utilisée pour cartographier ces différents matériaux. Etant donné l'étendue de la zone d'étude et les obstacles naturels qui s'y trouvent (couvert végétal dense, relief

accidenté), pour un résultat efficient et optimal, la technique de la télédétection est testée avec succès sur la Nationale N3, puis sollicitée, vu sa capacité à couvrir de grandes surfaces en un intervalle de temps réduit et sans contact avec les surfaces observées. De ce fait, les images Google Map, OpenStreetMap, Landsat 8 OLI et SRTM sont utilisées en combinaison avec les données de terrain pour atteindre les objectifs de l'étude. Etant donné que cartographier les matériaux locaux pouvant servir à la construction et à la réhabilitation des ouvrages d'art tels que les routes, pour qu'ils portent bien leur nom, requiert d'abord la connaissance de ces routes et des accidents auxquels ces dernières peuvent être sujettes, pour solliciter ces matériaux, cette étude a pour objectifs de :

- Elaborer un algorithme permettant un géoréférencement du réseau routier, une cartographie des accidents tectoniques et des matériaux locaux pouvant servir à leur construction et réaménagement dans un contexte équatorial et côtier caractérisé par un niveau élevé de nuages ;
- Evaluer et valider cet organigramme sur la Nationale N3 notamment entre les villes de Douala-Yaoundé ;
- Produire une carte géoréférencée mise à jour du réseau routier national ;
- Examiner les différents accidents tectoniques pouvant survenir sur ledit réseau routier ;
- Etudier par les techniques de la géomatique et de la cartographie in situ et télédétectée les réservoirs de matériaux voisins de ces ouvrages pouvant dans une proximité de 50 km être utilisés pour la construction ou la réhabilitation de ce réseau.

La présente étude s'articule autour de trois chapitres :

Dans le premier chapitre, seront abordés tour à tour, la définition des mots clés de ce travail ainsi que de leurs déclinaisons, les différentes catastrophes que subissent généralement les ouvrages d'art, les types de matériau généralement utilisés pour leur construction ou réhabilitation, la description de la zone d'étude, les exemples d'illustration sur les différentes méthodes utilisées pour cartographier un site de matériaux locaux, et l'usage de la géomatique dans la cartographie des failles et des

collines. Le deuxième chapitre, consistera essentiellement en la description des méthodes de travaux de terrain et de géomatique, ainsi que le matériel utilisé. Le troisième chapitre présentera les résultats obtenus au terme de ce travail, leur interprétation et une discussion y afférente.

CHAPITRE 1 : REVUE DE LA LITTERATURE SUR LES OUVRAGES D'ART, LES MATERIAUX LOCAUX ET LA GEOPHYSIQUE

Introduction

De nos jours, les ouvrages d'art en Afrique sont au centre du développement socio-économique. On assiste de plus en plus à de nombreuses constructions d'ouvrages telles que les ponts, les routes, les autoroutes, les tunnels, etc., et cela nécessite l'utilisation de plusieurs matériaux parmi lesquels les agrégats de roches. La géophysique par ses méthodes permettant de les localiser et les cartographier, il sera donc question dans cette section après avoir défini les maître-mots de ce travail et présenté les ouvrages d'art et les différentes catastrophes qu'ils peuvent subir, de présenter les différents travaux qui ont déjà été menés dans la zone d'étude.

1.1 Définitions

1.1.1 Géophysique

La géophysique est la science qui étudie les phénomènes physiques dont l'univers est le siège et dont l'objectif principal est de déduire les propriétés physiques et la constitution de la Terre, à partir des phénomènes physiques qui leur sont associés, comme le champ électromagnétique, le flux de chaleur, la propagation des ondes sismiques, etc. (Wheeler et Cheadle, 2014).

1.1.2 Matériaux locaux

Les matériaux locaux sont des ressources qui peuvent être facilement trouvées en grande quantité dans un endroit ou une zone particulière à un moment donné. Il pourrait également s'agir de matériaux pouvant être utilisés pour fabriquer un élément fini (Adekunle et Odeyale, 2008). Ces matériaux locaux sont le résultat de la transformation ou de l'assemblage d'une ou plusieurs ressources naturelles extraites à proximité du

chantier de construction (Dejeant et al., 2021). Ils peuvent être classés en deux grandes catégories :

- Les matériaux biosourcés d'origine animale ou végétale : la matière les constituant est obtenue à partir de la biomasse ;
- Les matériaux géosourcés d'origine minérale : la matière qui les constitue est obtenue à partir des couches géologiques ou pédologiques de la croûte de l'écorce terrestre.

Dans ce travail l'intérêt sera porté uniquement sur les matériaux géosourcés.

1.1.3 Ouvrages d'art

Un ouvrage d'art est une construction de génie civil de grande importance, liée à l'établissement ou à l'exploitation d'une ligne de communication ou de transport terrestre, fluviale ou maritime (pont, viaduc, tunnel), mais également un dispositif de protection contre l'action de la terre ou de l'eau (mur de soutènement, digue), ou d'une adduction d'eau (dalot, buse) et enfin un dispositif de transition entre plusieurs modes de transports (quais) par le franchissement d'un obstacle naturel ou artificiel (Savard et Laflamme, 2004 ; Nettis et al., 2023). L'obstacle peut être une chaîne de montagne, un nouveau cours d'eau, une région industrielle. De tels ouvrages sont qualifiés d'art parce-que leur construction et leur réalisation font intervenir des connaissances où l'expérience joue un rôle aussi important que la théorie. Cet ensemble de connaissances constitue d'ailleurs ce qu'on appelle l'art de l'ingénieur (Savard et Laflamme, 2004).

On distingue plusieurs familles d'ouvrages d'art :

1.1.3.1 Ouvrages d'art liés à des voies de communication

- Les routes : ce sont des voies de communication importantes permettant la circulation de véhicules entre deux points géographiques donnés (figure 1.1).

- Les autoroutes : il s'agit des voies de communication routière à chaussées séparées, réservées à la circulation à vitesse élevée des véhicules motorisés (figure 1.2).
- Les ponts : ce sont des constructions permettant de franchir un obstacle (cours d'eau, voie de communication, etc.) (figure 1.3).
- Les viaducs : il s'agit des ouvrages routiers ou ferroviaires de faible largeur par rapport à la longueur de l'ouvrage franchissant une vallée ou un bras de mer (figure 1.4).
- Les tunnels : ils sont des ouvrages souterrains permettant le franchissement de tout obstacle similaire à ceux franchis par les ponts (figure 1.5).

1.1.3.2 Ouvrages d'art destinés à la protection contre l'action de la terre ou de l'eau

- Les murs de soutènement : ce sont des ouvrages assurant la stabilité de la voie de communication portée (figure 1.6).
- Les jetées : elles sont des constructions s'avançant dans la mer, un lac, un fleuve et dont le but principal est de servir à l'embarquement et au débarquement des cargaisons ou des passagers (figure 1.7).

1.1.3.3 Ouvrages d'art destinés à la retenue des eaux

On peut citer ici les barrages, qui sont des grands ouvrages de génie civil construits dans un cours d'eau et destinés à réguler le débit de celui-ci et/ ou à stocker l'eau pour différents usages tels que la production d'énergie hydroélectrique, la pisciculture, etc. (figure 1.8).

Figure 1.1 Route nationale N3 (Investir au Cameroun, 2018).

Figure 1.2 Autoroute Yaoundé-Douala (Saimondy actualités, 2018).

Figure 1.3 Pont sur le Wouri (EcoMatin, 2018).

Figure 1.4 Viaduc de Bakwa-Supé (Agenda Culturel du Cameroun, 2021).

Figure 1.5 Tunnel Nlongkak (EcoMatin, 2019).

Figure 1.6 Mur de soutènement (Structurae, 2020).

Figure 1.7 Jetée (Allala, 2005).

Figure 1.8 Barrage (La Tribune Afrique, 2020).

Ces ouvrages d'art, notamment ceux routiers, sont souvent enclins à plusieurs types d'accidents d'ordre tectonique tels que les cisaillements et les effondrements (figure 1.9), et leur réhabilitation ou leur reconstruction nécessite généralement l'utilisation de

plusieurs intrants parmi lesquels le béton, qui est un matériau de construction omniprésent dans les ouvrages de génie civil en raison de sa facilité de mise en œuvre et son faible coût économique.

Figure 1.9 Images de quelques catastrophes naturelles sur les routes. (a) Cisaillement longitudinal d'une route, (b) Effondrement longitudinal d'une route (123 BF, 2021).

Figure 1.9 Images de quelques catastrophes naturelles sur les routes. (c) Cisaillement transversal d'une route (Colmaroute, 2014), (d) effondrement transversal d'une route (Courier des journalistes, 2018).

(e)

Figure 1.9 Images de quelques catastrophes naturelles sur les routes. (e) Eboulement sur une route (Journal de Millau, 2017).

1.2 Microstructure du béton

Le béton durci peut être visualisé comme un matériau composite tri-phasique, constitué de la matrice cimentaire, des granulats et de l'auréole de transition.

- La pâte de ciment durcie représente généralement 25 à 40% du volume total du béton et forme la matrice cimentaire du matériau. Elle joue le rôle de liant et confère au matériau béton ses propriétés de rigidité et de résistance (Bazant et Kaplan, 1996). Le ciment est obtenu à partir de la cuisson à haute température (de l'ordre de 1450ºC) du calcaire (80%) et d'argile (20%). Des éléments (tel que le gypse) y sont ensuite ajoutés, dans des proportions très précises afin de lui donner des caractéristiques très spécifiques.

- Les granulats : ils occupent 60 à 80% du volume du béton (Maso et al., 1980) et jouent le rôle de remplissage atténuateur de variations volumiques, et sont sources de résistance mécanique (Bazant et Kaplan, 1996). Ces granulats sont généralement d'origine naturelle, et proviennent essentiellement de roches métamorphiques (gneiss), des roches sédimentaires ou des roches magmatiques (basalte, granite ou gabbro).
- L'auréole de transition est l'interface entre la pâte de ciment et les granulats, et joue le rôle de maillon faible du béton.

1.3 Cas de l'utilisation des matériaux locaux dans la construction des chaussées

Les différentes couches constituant les chaussées sont les suivantes (figure 1.10) :

- La couche de surface, qui est la partie supérieure de la chaussée sur laquelle s'exercent directement les agressions conjuguées du trafic et du climat. Elle est composée d'une couche de roulement et d'une couche de liaison.
- La couche d'assise : constituée de la couche de base et de la couche de fondation, est une couche intermédiaire permettant de répartir les contraintes issues des efforts provoqués par les pneumatiques.
- La couche de forme, qui est la couche de transition entre le sol support et le corps de la chaussée.

Pour la réalisation de ces chaussées, plusieurs matériaux sont utilisés :

- Les argiles et les latérites utilisés pour les remblais afin de supporter la couche de forme ;
- Les éléments rocheux notamment les moellons (schistes, micaschistes) et les graviers (basalte, granite, gabbro, gneiss) pour consolider les remblais à travers la couche de forme ;

- Les graviers, le sable (grès) et les tout-venants (mélange de granulats de toutes dimensions) pour la couche d'assise ;
- Un mélange de sable, de graviers (quartzite), et de bitume pour la couche de surface.

Ces matériaux sont très souvent voulus en grandes quantités et à proximité des ouvrages en construction pour faciliter leur manutention.

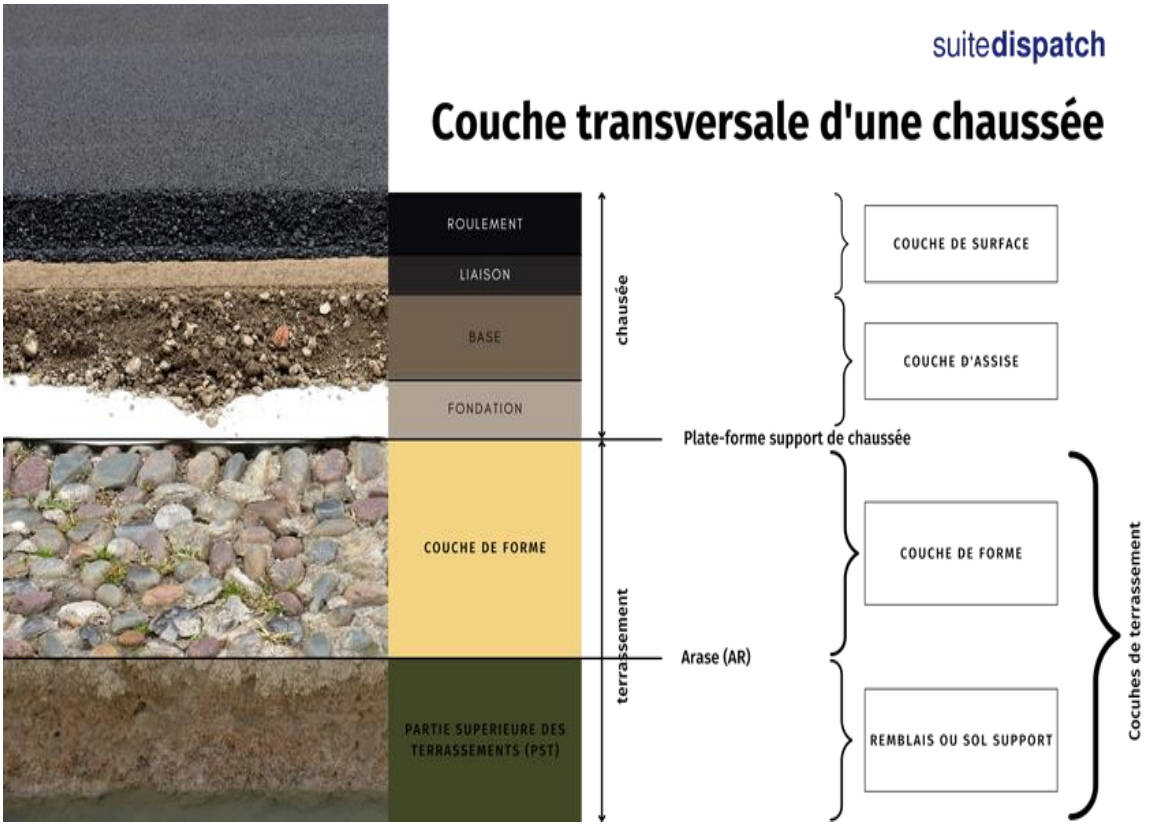


Figure 1.10 Structure d'une chaussée (Ordener, 2023).

1.4 Présentation de la zone d'étude

1.4.1 Localisation géographique

La zone d'étude s'étend géographiquement entre les latitudes 1°38'5"N et 13°4'50,7"N et les longitudes 8°30'50,6"E et 16°12'11,8"E, et a une superficie de 475442 km^2.

1.4.2 Contexte géologique

Le complexe du socle précambrien du Cameroun qui a enregistré l'évolution de la croûte de l'ère du Mésoarchéen à celle du Néoprotérozoïque (Toteu et al., 1994, Tchameni et al., 2006) comprend deux unités lithostructurales majeures, à savoir la ceinture de plis panafricaine et le craton du Congo (Complexe du Ntem). Au Cameroun, la ceinture de plis panafricaine est subdivisée en trois domaines, notamment le domaine sud, le domaine central et le domaine nord (Toteu et al., 2004) (figure 1.11).

- Le domaine sud (domaine de Yaoundé) est une immense unité de nappe allochtone bordée au Sud par le craton du Congo, à l'Ouest par la faille de Kribi-Campo et se prolongeant vers l'Est en République Centrafricaine dans les séries de Bolé et Gbaya (Pin et Poidevin, 1987). Il comprend des unités de roches métamorphiques et ignées à haute teneur, des schistes à teneur faible à moyenne d'origine sédimentaire et des métasédiments néoprotérozoïques métamorphosés sous un métamorphisme à haute pression (Nzenti et al., 1988).
- Le domaine central (domaine d'Adamaoua-Yadé), qui est bordé par la faille de la Sanaga au Sud et la faille de Tcholliré-Banyo au Nord, comprend la faille d'Adamaoua et d'autres failles anastomosées, constituant le système de la zone de cisaillement centre camerounais d'orientation N70E (Njanko et al., 2006). Ce domaine est constitué de gneiss à haute teneur de l'Archéen au Paléoprotérozoïque envahis par de larges roches plutoniques syntectoniques du Néoprotérozoïque d'affinités calco-alcalines à haute teneur en potassium (K), avec des âges de mise en place autour de 600 Ma (Nzenti et al., 1994, Nzolang et al., 2003, Njiosseu et al., 2005).
- Le domaine nord (domaine de l'ouest Cameroun) situé à l'ouest de la faille de Tchollire-Banyo et qui s'étend le long de la frontière occidentale du Cameroun est constitué de : complexe métamorphique de haut grade, comprenant des roches d'origine volcano-sédimentaire et sédimentaire en raison de la présence d'orthogneiss à contenu dioritique prédominant ; de roches métasédimentaires provenant des ceintures schisteuses néoprotérozoïques ; et de granitoïdes

panafricains à prédominance calco-alcaline, déposés entre 660 et 580 Ma (Toteu et al., 1987) . Les roches volcaniques s'y trouvant présentent des affinités tholéitiques et alcalines. Ce domaine a connu au moins deux épisodes liés au plutonisme panafricain dont le plus ancien, daté entre 640 et 620 Ma, correspond à des granitoïdes calco-alcalins pré- à syntectoniques et le plus jeune (580 Ma) correspond à des granitoïdes tardi-tectoniques (Penaye et al., 1989, Toteu et al., 2001). Trois principaux événements tectoniques successifs ont été identifiés au Cameroun par Ngako et al., 2008 : l'épaississement de la croûte (630–620 Ma) ; les mouvements de distorsion latérale gauche (613-585 Ma), marqués par les zones de cisaillement de la partie nord du Cameroun ainsi que la zone de cisaillement de la Sanaga ; les mouvements de distorsion latérale droit (585-540 Ma), marqués par les zones de cisaillement dextres du nord du Cameroun et la zone de cisaillement centre camerounais.

Le Complexe du Ntem représentant la partie Nord du craton du Congo est subdivisé en trois unités, l'unité du Ntem, l'unité du Nyong et l'unité de l'Ayna.

- L'unité du Ntem est principalement constituée de complexes intrusifs plus récents, des séries rubanées et des ceintures de roches vertes. Les complexes intrusifs comprennent les suites tonalitique, trondjemite et granodiorite constituant la suite TTG (Tonalite-Trondjemite-Granodiorite) (Shang et al., 2004), et la suite charnokitique-magmatique (Pouclet et al., 2007). Les séries rubanées sont constituées de gneiss granitiques, de gneiss charnokitiques, d'enderbergites et de leptynites (Takam et al., 2009). Les formations de fer rubanées (BIF), les métagraywackes, les pyroxénites, les paragneiss à sillimanite et les amphibolites à grenat constituent les ceintures de roche vertes (Tchameni et al., 2010).
- L'unité du Nyong est une unité de gneiss à haute teneur, dominée par des gneiss à biotite-hornblende apparaissant localement sous forme de gneiss gris composé de TTG, les charnockites, les grenat-amphibole-pyroxénites et les formations de fer rubanées (BIF).

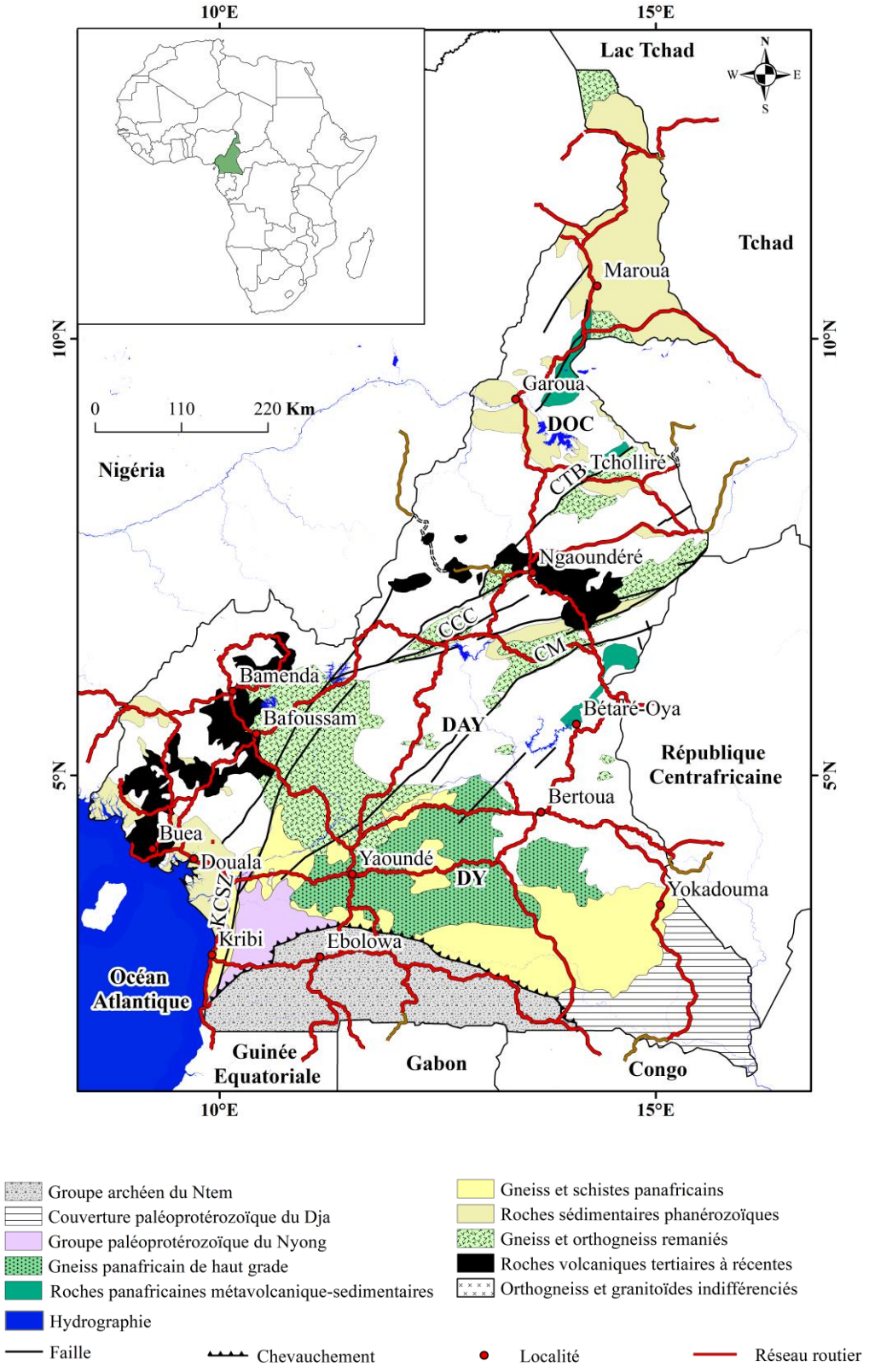


Figure 1.11 Carte géologique de la zone d'étude modifiée de Kankeu et al., 2018, montrant les principaux domaines lithotectoniques.

- Les roches magmatiques qu'on y retrouve (granodiorites, métadiorites augen, syénites) sont représentées par un groupe d'orientation SW-NE de petites intrusions (Lerouge et al., 2006).
- Formée de roches cristallophylliennes, des ceintures de roches vertes et des granitoïdes intrusifs (Gazel et Guiraudie, 1965), l'unité d'Ayna comporte des foliations d'orientation N120-N140E à laquelle se superposent des plis et des blastomylomites antépanafricains, et recouverts par la nappe panafricaine de Yaoundé (Vicat et al., 1998).

Le complexe du Ntem a connu deux périodes majeures de déformation. La première période de déformation est marquée par des emplacements diapiriques successifs de la TTG et des charnockites mésoarchéennes, caractérisées par des étirements et des plis isoclinaux, une linéation verticale et une foliation (Shang et al., 2004). La seconde est caractérisée par l'apparition de zones de cisaillement sénestre d'orientation N-S à NE-SW, la fusion partielle des roches de la ceinture de roches vertes et de la suite TTG, suivies de la formation de granite (Shang et al., 2007).

1.4.3 Réseau routier

La zone d'étude est dotée d'un réseau routier (figures 1.12, 1.13, 1.14) de 121873 km dont environ 10000 km est bitumé. Le réseau routier est subdivisé en plusieurs classes. On distingue :

- Les routes nationales, qui relient essentiellement les chefs-lieux de région à la capitale Yaoundé et le Cameroun au pays voisins, constituent l'ossature du réseau routier ;
- Les routes régionales, qui relient à l'intérieur d'une région, les chefs-lieux de département, à la capitale régionale ;
- Les routes départementales qui relient à l'intérieur d'un département, les arrondissements aux chefs-lieux de département ;

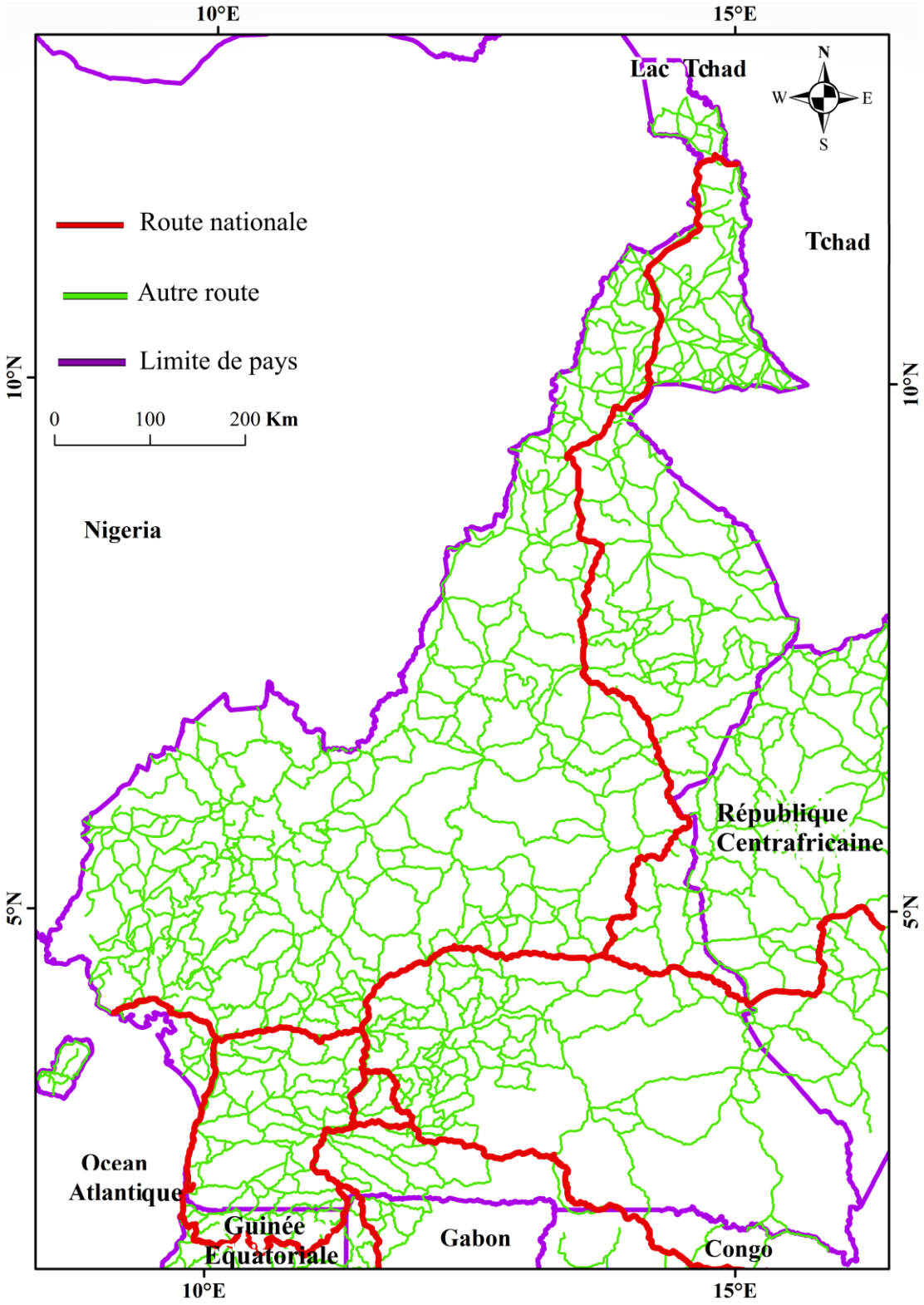


Figure 1.12 Carte du réseau routier (Mbouombouo et al., 2022).

- Les routes rurales desservant les campagnes, les plantations, les zones industrielles locales etc., permettent de relier les zones de production aux marchés locaux ou au centre de commercialisation.

Le reste du réseau non classé est à la charge des collectivités territoriales décentralisées.

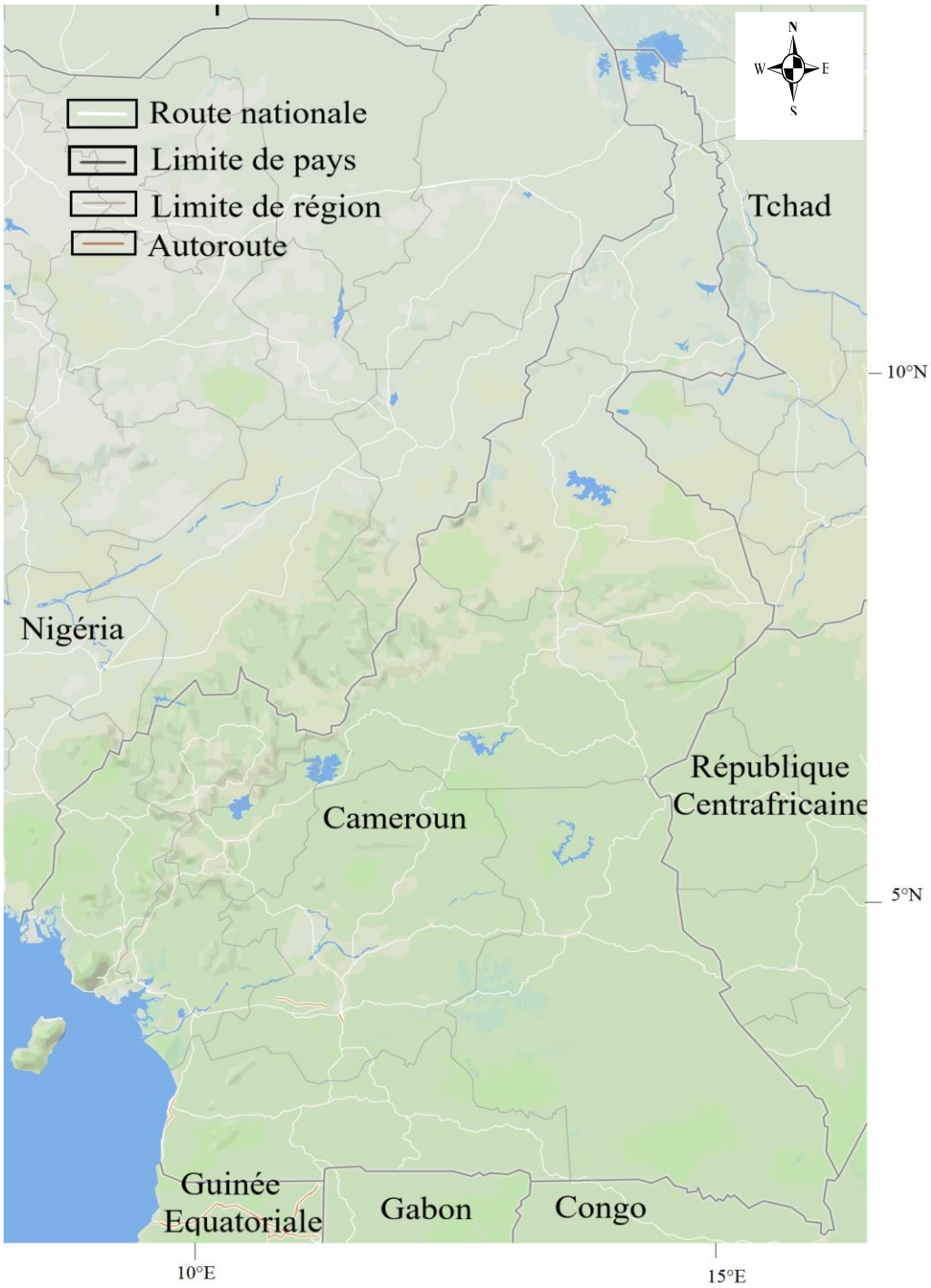


Figure 1.13 Carte du réseau routier (OpenStreetMap, 2023).

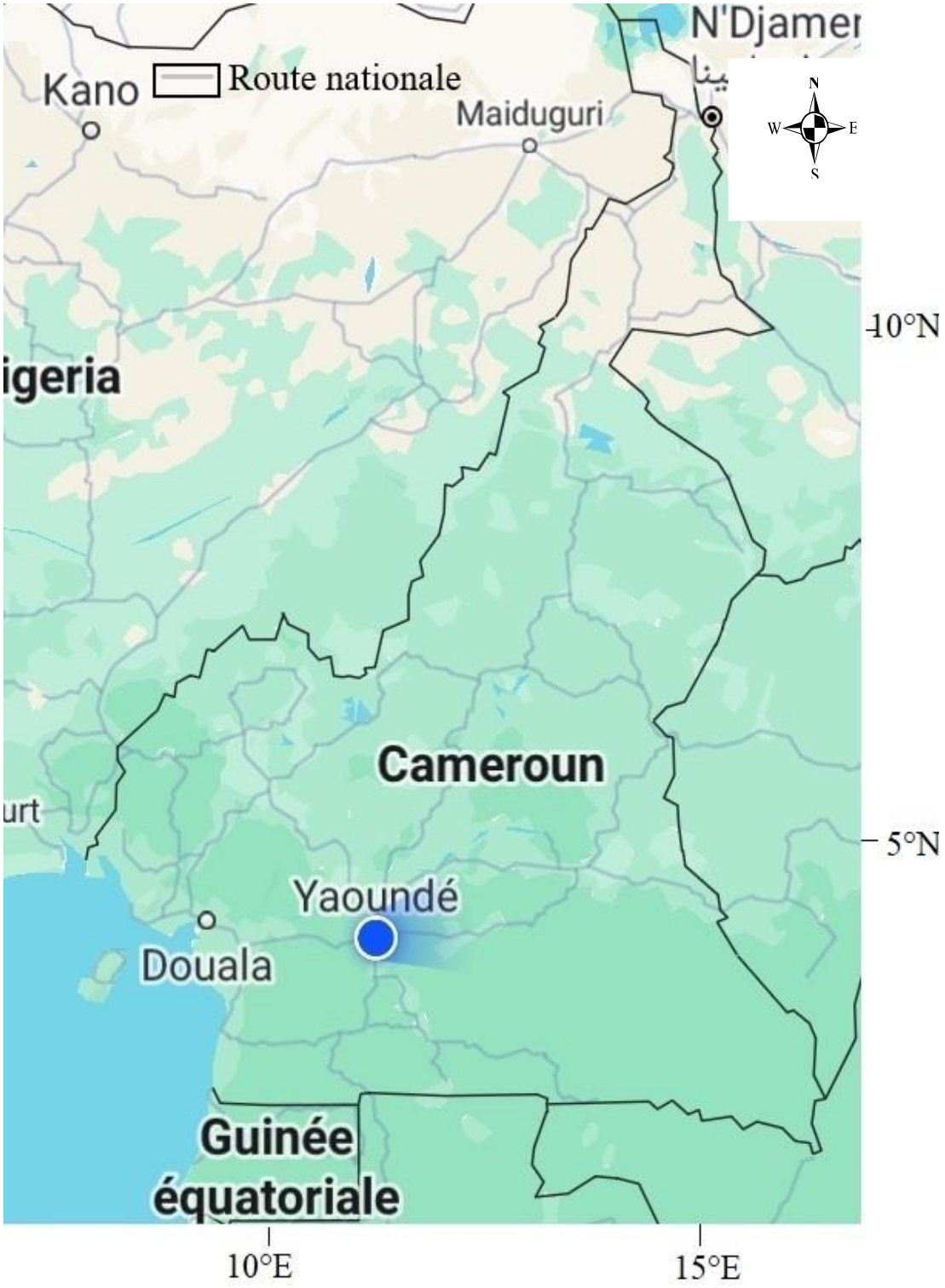


Figure 1.14 Carte du réseau routier (Google Map, 2023).

1.4.4 Relief et sols

1.4.4.1 Relief

Au Cameroun, le relief est subdivisé en trois grands ensembles notamment les plaines, les plateaux et les montagnes, inégalement répartis sur l'ensemble du territoire.

Le plateau de l'Adamaoua constitue un arc montagneux séparant le nord, du sud du Cameroun où il s'élève jusqu'à 2650 m et se prolongeant au sud-ouest par les hautes montagnes d'origine volcanique avec les principaux sommets, le mont Cameroun (4070 m), le mont Oku (3011 m), le mont Manengouba (2396 m) et le mont Bamboutos (2740 m).

Les hautes terres de l'Ouest sont formées de plateaux dont l'altitude moyenne varie entre 1200 et 1800 m, et d'une chaîne montagneuse prenant naissance sur la côte Atlantique (Nachoui, 2021). Dans la région soudanienne des monts du Cameroun, les plus hauts sommets sont le Tchabal Mbabo (2640 m), le Hosséré Vokré (2049 m), le Tchabal Nganha (1923 m) et le Tchabal Ngangdaba (1960 m).

Dans les monts Mandara représentant la partie nord des montagnes camerounaises, l'altitude varie de 300 à 1442 m (Nachoui, 2021).

Les basses terres se rencontrent au Sud-ouest, et sont des plaines côtières s'étalant entre l'Océan Atlantique et le plateau Sud Camerounais. Elles sont composées de la cuvette de Mamfé. Les plaines du nord et de l'ouest, le long de la frontière avec le Nigeria, comprennent la plaine du Logone, du Diamaré autour de Maroua, la cuvette de la Bénoué et les plaines de la Bénoué.

1.4.4.2 Sols

Au Cameroun, huit grandes catégories de sol sont représentées en fonction des facteurs topographiques, de la roche mère et des milieux bioclimatiques où ils se forment (figure 1.15) (Muller et Gavaud, 1979).

On distingue ainsi :

- Les sols minéraux bruts : ils contiennent des traces de matière organique et quelques centimètres de débris de roche désagrégée. On les retrouve sur des reliefs montagneux. Ils sont associés à des sols peu évolués, plus altérés, plus riche en matière organique, avec début de formation d'argile.
- Les sols peu évolués : ils se développent sur des matériaux d'apport récent.
- Les vertisols : ce sont des sols argileux, foncés, affectés de mouvements internes de retrait et gonflement saisonniers. Très cohérents et denses, ils ont de médiocres propriétés physiques, mais de bonnes qualités chimiques. Les vertisols topomorphes sont formés en zones planes et déprimées (cuvette du lac Tchad), les vertisols lithomorphes à partir de matériaux basiques.
- Les andosols et les sols bruns eutrophes : ce sont des sols jeunes, à profil homogène, développés sur les formations volcaniques basiques et généralement associés à des sols minéraux bruts et peu évolués. Les andosols légers, riches en eau, doivent leurs propriétés à la présence de minéraux non cristallisés liés à des quantités importantes de matière organique. Ils sont très favorables à la culture, mais sujets à l'érosion. Les sols bruns eutrophes, intermédiaires entre sols peu évolués et ferralitiques, ont un humus abondant, bien lié à la matière minérale ; structurés, meubles, poreux, riches en eau et en éléments nutritifs, ils sont très fertiles.
- Les sols fersiallitiques et ferrugineux ont une couleur très accusée (rouge, ocre et rouillé). Ils sont abondants au sud du 9^{e} parallèle.
- Les sols lessivés, planosoliques et solonetziques : ils présentent des caractéristiques physico-chimiques défavorables. Les premiers ont des horizons supérieurs sableux épais qui dans les planosols, surmontent des argiles compactes épaisses et peu perméables. Les sols solonetziques, massifs et très compacts, contiennent du sodium toxique pour les plantes.

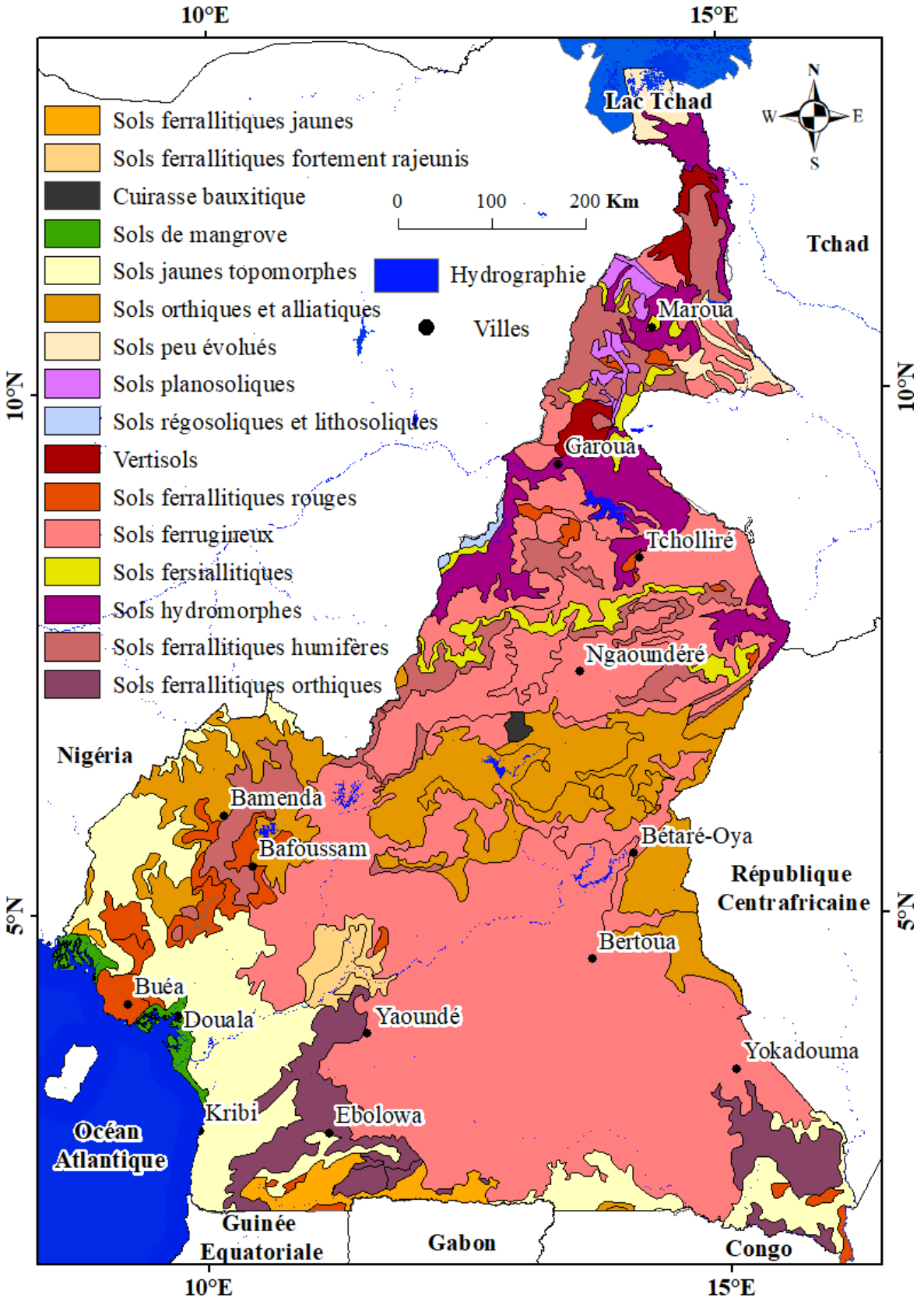


Figure 1.15 Carte pédologique (modifiée de Muller et Gavaud, 1979) :

- Les sols ferralitiques couvrent près des deux tiers du pays au sud du 8^{e} parallèle. Les minéraux des roches sont complètement hydrolysés par les eaux pluviales abondantes et chaudes. Ces sols sont pauvres en éléments nutritifs, acides et fragiles.
- Les sols hydromorphes dont l'évolution est dominée par un excès d'eau. Dans le Nord, ces sols sont vertiques (présence d'argiles gonflantes) dans la plaine du lac Tchad. Dans le Sud, ils sont humiques (à matière organique abondante, évoluée et acide).

1.5 Généralités sur les modes d'acquisition des données par la méthode électromagnétique

En géophysique, on dénombre plusieurs méthodes de prospection dont les méthodes électrique, gravimétrique, sismique et électromagnétique.

Ces méthodes fonctionnent généralement en stimulant le sol, pour en mesurer l'énergie résultante à l'aide d'un équipement géophysique et en déduire la géologie. Un grand avantage de ces méthodes est que certains instruments peuvent être fixés sur de petits avions pour couvrir de vastes zones lors de levés aéroportés régionaux. Cela fournit des informations géologiques plus rares, mais peut mettre en évidence des anomalies métalliques potentielles qui peuvent être suivies par des levés géophysiques au sol plus détaillés. Dans le cas de la présente étude, la méthode utilisée est la méthode électromagnétique.

Le nom électromagnétisme vient de l'étroit lien qui existe entre champ électrique et champ magnétique, en régime variable. Un champ magnétique variable engendre un champ électrique, ce phénomène est connu sous le nom de l'induction électromagnétique de Faraday. Dans un conducteur, un champ électrique crée un courant, qui crée à son tour un champ magnétique, c'est la loi d'Ampère.

Les méthodes électromagnétiques sont extrêmement variées et diffèrent selon le type de source choisi (fixe ou mobile), la mesure de l'orientation du champ résultant ou uniquement les parties en phase et quadrature d'une de ses composantes, et la fréquence adoptée. Elles peuvent toutefois, être classifiées en trois grands ensembles selon leur

mode d'acquisition des données. On en distinguera ainsi les méthodes électromagnétiques in situ, aéroportées et satellitaires.

1.5.1 Méthodes électromagnétiques in situ

Le principe général de ces méthodes consiste en l'utilisation d'un champ électromagnétique incident dans un milieu et la lecture de la réponse renvoyée par le sol.

1.5.1.1 Méthode tellurique

La prospection par la méthode tellurique est basée sur la présence des courants électriques générés dans l'ionosphère, et circulant naturellement dans l'écorce terrestre. Ces courants électriques engendrent un champ magnétique variable. Des ondes de choc électromagnétiques arrivent donc à la surface de la Terre et se réfractent sur le sol. Ce champ électromagnétique primaire induit dans la croûte terrestre un champ magnétique secondaire. Cette méthode repose sur l'utilisation de deux jeux d'électrodes. Le premier jeu d'électrodes est fixe et constitue la station fixe, le deuxième jeu d'électrodes est déplacé sur la surface à explorer et forme la station de mesure amovible. Pour toute nouvelle position de la station mobile, on réalise conjointement une mesure de différence de potentiel aux deux stations (fixe et mobile). Ainsi, la différence entre la différence de potentiel de la station mobile et celle de la station fixe est une mesure de la différence de potentiel induite par les courants électriques telluriques. Les changements de différence de potentiel enregistrée résultent donc des modifications des conductivités du sous-sol.

1.5.1.2 Méthode magnétotellurique

C'est une méthode qui consiste à étudier les propriétés géo-électriques du sous-sol en réalisant conjointement la mesure des variations temporelles du champ magnétique terrestre et celles du champ électrique tellurique. Les mesures peuvent être effectuées de deux façons, la première, par sondage, en maintenant le dispositif de mesure fixe et en faisant varier la fréquence de mesure du champ électromagnétique et

la seconde par profilage, où le dispositif est déplacé en maintenant la fréquence constante. Ces deux techniques permettent d'obtenir des informations sur la résistivité apparente. Selon la profondeur d'investigation, on distingue la radio magnétotellurique pour les faibles profondeurs, l'audio magnétotellurique pour les profondeurs moyennes et l'hélio magnétotellurique pour les grandes profondeurs. La méthode la plus utilisée est l'audio magnétotellurique.

1.5.2 Méthodes électromagnétiques aéroportées *(EMA)*

Les levés EMA du fait de la hauteur de vol au-dessus du sol (30 à 120 mètres) de ces systèmes d'acquisition des données, sont capables de détecter des structures géologiques non visibles en surface. Tous les systèmes électromagnétiques aéroportés partagent un principe de fonctionnement commun (Palacky, 1993). La plupart d'entre eux utilisent des émetteurs (bobines) pour générer des champs dipolaires magnétiques variant dans le temps (champs primaires) afin d'induire des courants de Foucault dans une sous-surface électriquement conductrice. A leur tour, ces courants de Foucault génèrent des champs magnétiques secondaires, qui sont détectés par des récepteurs (bobines). Les rapports des champs secondaires et primaires sont utilisés pour révéler la distribution de conductivité électrique souterraine. La fréquence utilisée dans les levés EMA variant de 100 Hz à 50 Hz, permet une pénétration au sol supérieure à 100 mètres ; les produits d'investigation les plus courants sont les cartes de conductivité apparente. On distingue généralement deux types de levés EMA, les levés EMA par avion et les levés EMA par hélicoptère. Ceux réalisés par hélicoptère sont effectués à une altitude moins élevée que ceux réalisés par avion et ont ainsi une meilleure résolution spatiale. Plusieurs systèmes EMA aussi bien pour des avions que pour les hélicoptères ont été développés. On peut citer pour le cas des avions, les systèmes électromagnétiques transitoires (TEM) dans lesquels la boucle d'émission entoure l'avion et l'appareil récepteur est situé au bout d'un câble à l'arrière de l'avion (tels que GeoTEM, MegaTEM et TEMPEST développés par Fugro Airborne) et les systèmes FEM comportant une bobine émettrice située à l'extrémité d'une des deux ailes et une bobine

réceptrice située à l'extrémité de l'aile opposée (tels que HAWK développé par Geotech ltd et AEM05 développé par le 'Geological Survey of Finland' (Levaniemi et al., 2009). Concernant les cas des hélicoptères, on peut citer les systèmes fréquentiels à l'exemple de DIGHEM ou RESOLVE et IMPUT développés par Fugro Airborne et les systèmes temporels héliportés plus récents comme AeroTEM, VTEM de Geotech ltd, SKYTEM, NEWTEM (Fountain et al., 2005).

Les figures 1.16 et 1.17 présentent quelques systèmes électromagnétiques embarqués sur avion et hélicoptère.

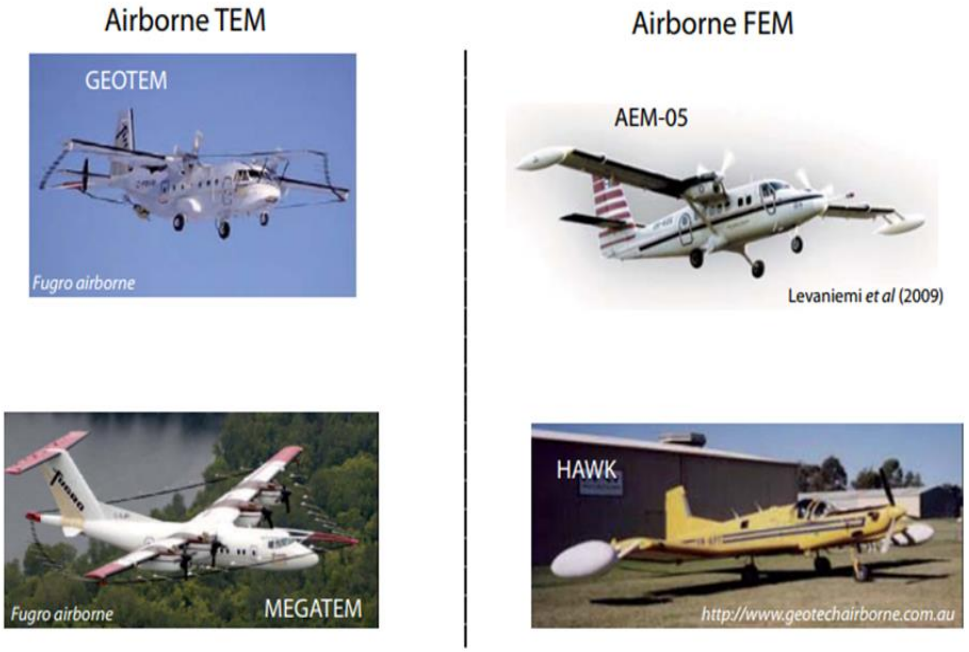


Figure 1.16 Quelques systèmes électromagnétiques embarqués sur avion (Levaniemi et al., 2009).

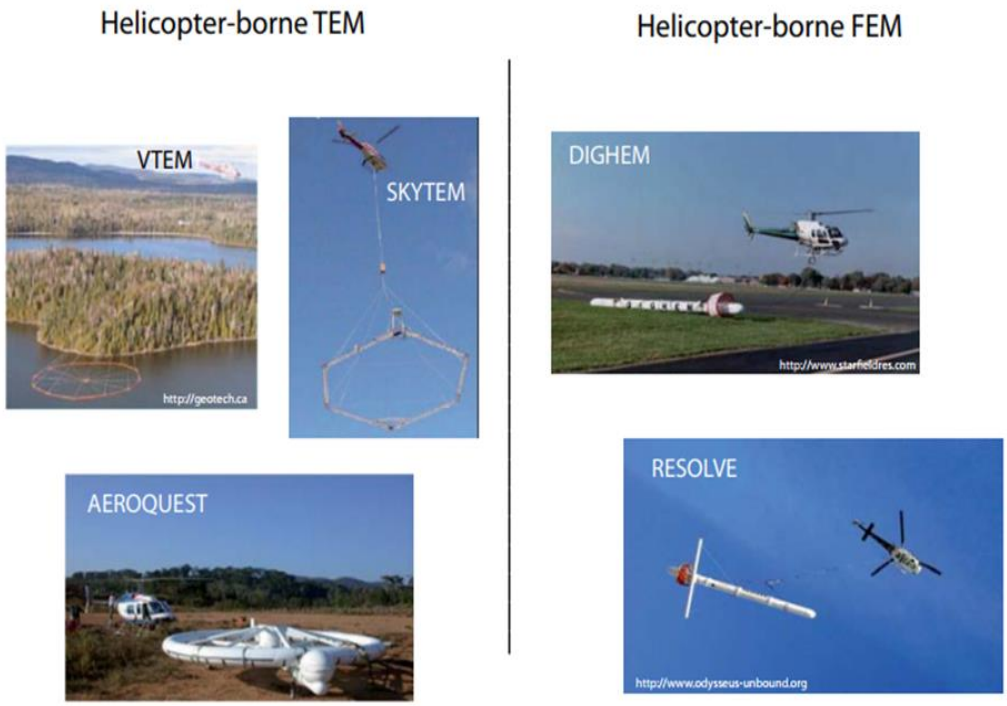


Figure 1.17 Quelques systèmes électromagnétiques embarqués sur hélicoptère (Fountain et al., 2005).

1.5.3 Méthode électromagnétique satellitaire

Cette méthode utilise la télédétection, qui est une technique permettant d'étudier la surface de la Terre ou une zone de la surface de la Terre sans contact direct avec celle-ci en utilisant les propriétés du rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par cette dernière. Lors de la mise en œuvre de cette technique, le soleil (ou le capteur) émet un rayonnement en direction de la cible, une partie de ce rayonnement est réfléchie par celle-ci vers le capteur qui l'enregistre. L'énergie enregistrée par le capteur est ensuite transmise à une station de réception où l'information est transformée en images, puis traitée et interprétée. Le rayonnement devant passer par l'atmosphère avant d'atteindre la cible, celle-ci absorbe certaines longueurs d'onde et ne laisse passer que celles du domaine du visible, de l'infrarouge et des hyperfréquences enregistrées par le capteur. Plusieurs programmes de télédétection ont été mis sur pieds depuis son arrivée jusqu'à nos jours, parmi lesquels on peut citer Météosat (EUMETSAT 63E), GEOS (USA 75W), SPOT, ALOS, ESA, LANDSAT.

1.6 Travaux antérieurs dans la zone d'étude

Les méthodes géophysiques ont prouvé leur efficacité dans la cartographie des réservoirs de matériaux locaux ainsi que des caractéristiques structurales du sol. Une synthèse de quelques travaux menés dans la zone d'étude est présentée ci-dessous.

1.6.1 Travaux gravimétriques

Abate et al., 2017 ont étudié la structure de la croûte terrestre au Centre-Nord du Cameroun à partir des données gravimétriques dérivées du modèle EGM2008. L'interprétation du modèle de champ de potentiel EGM2008 met en évidence les linéaments, définis comme failles et contacts géologiques. En outre, les résultats obtenus ont montré que la ligne de gravité Poli-Ounianga-Kébir est la caractéristique régionale qui délimite la zone de cisaillement de Tcholliré d'orientation SO-NE, et permis d'établir une corrélation entre les anomalies positives dérivées du modèle EGM2008, la tectonique et la minéralisation dans la zone d'étude. A Garoua, au nord du Cameroun, une interprétation structurale des données gravimétriques a été effectuée par Anaba et al., 2021. L'interprétation des anomalies isostatiques a montré une corrélation négative entre la topographie et les anomalies régionales isostatiques, par rapport à la compensation isostatique. Par conséquent, les zones côtières telles que Garoua et Lagdo étaient caractérisées par des gradients plus élevés, décroissants du NE au SO en raison de l'épaississement de la croûte. Cependant, l'interprétation des anomalies résiduelles isostatiques révèle que les conditions d'équilibre ne sont pas bien satisfaites dans la zone d'étude, où certaines zones très élevées présentent une sous-compensation tandis que les zones côtières présentent une surcompensation. En outre, l'extraction des failles superficielles et profondes montre les directions principales E-O et NO-SE.

En 2021, Kamto et al. ont caractérisé la région côtière du sud-ouest du Cameroun en combinant les données gravimétriques terrestres et satellitaires. L'analyse spectrale de la carte résiduelle de l'anomalie de Bouguer, montre que la région d'étude a une couverture sédimentaire quasi-uniforme sur sa partie ouest (avec des épaisseurs des sédiments variant entre 1,68 ± 0,08 et 2,95 ± 0,15 km), pouvant servir de guide dans

l'identification des sites présentant un bon potentiel d'hydrocarbures. La caractérisation structurale de la zone d'étude met en évidence quatre directions de linéaments à savoir N-S, E-O, SO-NE et SSO-NNE, avec pour direction dominante celle N-S indubitablement liée à la zone de cisaillement de Kribi. La majorité des failles de surface de directions N-S et SSO-NNE pourraient constituer des pièges structuraux utiles à l'accumulation des fluides. Marcel et al., 2018 lors de leur étude sur le sous-sol de la LVC en utilisant les données gravimétriques, ont identifié plusieurs failles (de direction prédominante NE-SO) dont certaines correspondent à des structures géologiques connues telles que la faille de Foumban, la ZCSC, et le contact entre la ceinture de plis panafricaine et le craton du Congo. De plus, une correspondance a été trouvée entre les anomalies gravimétriques et les formations géologiques.

1.6.2 Travaux magnétiques et aéromagnétiques

Noutchogwé et al., 2010 ont déterminé les caractéristiques structurales du sud de l'Adamaoua déduites des anomalies magnétiques. Il en ressort que la configuration du système de failles responsables de la structuration du secteur étudié, sur la carte du relief ombragé de l'amplitude du gradient horizontal, suggère un jeu sénestre pour le cisaillement centre-camerounais dans le secteur d'étude. L'interprétation quantitative des anomalies observées suivant un profil orienté SSE-NNO met en évidence la présence d'un corps de forte aimantation, interprété comme une intrusion de roches volcaniques probablement basaltiques, dans le socle granitique, mises en place à la faveur de la réactivation du cisaillement centre-camerounais. En outre, la forte corrélation observée entre les directions structurales cartographiées, l'emplacement des griffons des sources thermominérales et le réseau hydrographique pourront orienter les recherches hydrogéologiques futures dans le secteur d'étude.

Som et al., 2018 ont cartographié les structures tectoniques profondes du Cameroun central et méridional. Les résultats qui en découlent révèlent l'existence de deux domaines structuraux, qui sont confirmés par le contraste de la susceptibilité magnétique dans la zone du centre du Cameroun. Les profondeurs suggérées sont de l'ordre de 3,34 km à 4,63 km. La carte structurale montre deux types de failles (mineures

et majeures) d'orientation O-E, N-S, NO-SE, NE-SO, ENE-OSO, ONO-ESE, NNE-SSO et NNO-SSE. Les failles majeures les plus profondes (3,81 km à 4,63 km) de direction NE-SO, O-E et N-S sont très représentées dans le second domaine qui comprend la zone Pangar-Djerem. Ce domaine qui recouvre de nombreuses localités (Ngaoundéré, Tibati, Ngaoundal, Yoko, Bétaré-Oya et Yaoundé) est associé à l'orogenèse panafricaine et à la LVC.

Yandjimain et al., 2017 ont étudié les caractéristiques structurales de la zone d'Akonolinga-Loum, au centre-est du Cameroun à partir des données aéromagnétiques à travers les méthodes d'angle d'inclinaison et de déconvolution d'Euler. Les résultats obtenus indiquent qu'il existe des linéaments majeurs et mineurs partout localisant la circulation des minéraux, de la surface à la base de la zone d'étude, avec comme direction principale SO-NE. La pente probable desdits linéaments dans la partie nord de la région varie de 30˚ à 60˚ dans une direction S-E tandis que dans la partie sud, et elle varie de 30˚ à 60˚ dans une direction N-O. Le contact à gradient vertical et le contact à quasi-horizontal est également obtenu, indiquant la subduction de la ceinture panafricaine sous le craton du Congo, due à la collision intense qui a provoqué le rajeunissement de la croute. La principale conséquence de cette collision est la formation de structures de poudingue et de plis, depuis la partie superficielle jusqu'à la base, et qui ont provoqué l'intrusion de schiste, de chlorite-schiste, de quartzite dans le micaschiste et les intrusions de gneiss et de schistes grenatifères dans la migmatite.

Nyaban et al., 2020, ont effectué une analyse multi-échelle et modélisé les données aéromagnétiques pour des fins d'investigation structurale. D'après les résultats obtenus, plusieurs familles de failles majeures ont été cartographiées et dont les orientations sont ENE-OSO, E-O, NO-SE, N-S. Les preuves de la tectonique locale sont principalement dues à plusieurs épisodes de déformation (D1, D2 et D4) associés à des événements NE-SO, E-O et NO-SE respectivement. La profondeur des failles interprétées varie de 1000 à 3400 m. Plusieurs structures linéaires en corrélation avec des veines mylonitiques connues ont été identifiées. La modélisation 2.75D a révélé plusieurs failles de profondeur supérieure à 1200 m.

1.6.3 Travaux électromagnétiques satellitaires

Nguemhe et al., 2020, ont utilisé les images Sentinel-1A pour étudier la minéralisation aurifère à l'est du Cameroun, le long de la zone de cisaillement de Bétaré-Oya (ZCBO). L'utilisation des méthodes de modèle de points et d'analyse de Fry, a permis de caractériser la distribution spatiale de 37 dépôts aurifères le long de la ZCBO. Il en ressort que ladite distribution spatiale est non aléatoire, et ainsi il peut en découler la conclusion selon laquelle la minéralisation aurifère est contrôlée par des facteurs structuraux. Plus loin, les résultats obtenus révèlent que la minéralisation aurifère est principalement contrôlée par les linéaments d'orientation NNE et NE, suivi des linéaments d'orientation ENE-OSO. En outre, les tendances des gisements d'or dans la ZCBO sont principalement liées aux structures de type P dans le modèle de Riedel. En utilisant une approche de distribution de distance, en vue d'évaluer qualitativement et quantitativement la corrélation spatiale entre les modèles de linéaments (linéaments d'orientation NNE et NE) avec la minéralisation aurifère, il a été révélé qu'un corridor d'une largeur comprise entre 200 et 500 m est une zone peu probable pour la localisation des gisements aurifères.

Gweth et al., 2021a, ont évalué la contribution des images Landsat 7 ETM+ et Landsat 8 OLI dans la détection des fractures autour des lacs de cratère le long de la LVC. Les images Landsat 7 ont permis de cartographier 597 failles et fractures tandis que les images Landsat 8 ont permis d'en identifier 730, de direction moyenne respective N30 et N20 prouvant ainsi que la zone est plus fracturée que ce que l'on pensait. Dans la même zone, Gweth et al., 2021b, ont cartographié les réseaux de fractures en utilisant les images Sentinel-1A. Les résultats présentent plusieurs nouvelles failles et fractures majeures densifiées autour des lacs Nyos et Monoun mesurant respectivement au moins 12,7 km et 21,5 km.

Conclusion

Dans ce chapitre, les mots clés de ce travail ont été définis, suivis de la présentation de la zone d'étude et son contexte géologique. Subséquemment, une synthèse sur les structures géologiques majeures, le climat, la végétation, le relief, les sols et l'hydrographie retrouvés au Cameroun a été ressortie. Par la suite, les généralités sur les méthodes d'acquisition des données par la méthode électromagnétique ont été abordées. Enfin, a été présentée une synthèse des travaux scientifiques antérieurs effectués au Cameroun.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODES

Introduction

Généralement en géophysique, les données sont acquises par des méthodes de prospection in situ, telles que les méthodes gravimétriques, électriques, magnétiques, sismiques etc. Toutefois, lorsque la zone à investiguer est relativement grande, les méthodes de prospection satellitaire sont sollicitées. Dans le cas d'espèce, la surface à investiguer s'étend sur une superficie de 475442 km^2. Vu l'étendue de la zone d'investigation, les données utilisées pour réaliser cette étude sont des données satellitaires obtenues au moyen de la télédétection, ayant l'avantage de couvrir une grande surface en un espace de temps réduit. Ce travail combine à la fois la géomatique pour la cartographie des potentiels réservoirs de matériaux locaux, et la méthode de prospection in situ pour la validation de ladite cartographie. Dans ce chapitre seront présentées tour à tour les approches géomatique et in situ, chacune avec son matériel utilisé.

2.1 Géomatique et matériel utilisé

Deux types de données ont été utilisés à savoir les images satellitaires Landsat 8 OLI et SRTM.

2.1.1 Données spectrales Landsat 8 OLI/TIRS

Lancé en 2013, Landsat 8 est un satellite américain d'observation de la Terre. Huitième satellite du programme Landsat et septième à atteindre l'orbite avec succès, il embarque deux capteurs dont OLI (Operational Land Imager) et TIRS (Thermal Infrared Sensor). Le capteur OLI est caractérisé par neuf bandes dont quatre dans le domaine du visible (0,43 – 0,67µm), une dans le proche infrarouge (0,85 – 0,88 µm), deux dans le domaine de l'infrarouge moyen (1,57 – 2,29 µm), une bande dans le domaine de Cirrus (1,36 – 1,38 µm) et une bande panchromatique (0,50 – 0,68 µm). Toutes les bandes de ce capteur ont une résolution de 30 m exceptée la bande panchromatique qui elle, a une résolution de 15 m. Le capteur TIRS quant à lui est constitué de 2 bandes, toutes dans

le domaine de l'infrarouge thermique (10,60 – 12,51 µm) et ayant chacune une résolution de 100 m. Dans ce travail seules certaines bandes du capteur OLI dont le tableau 2.1 ci-dessous récapitule les caractéristiques, ont été utilisées.

Vingt-huit scènes couvrant toute la zone d'étude ont été acquises et les informations sur ces dernières sont consignées dans le tableau 2.2.

Tableau 2. 1 Caractéristiques du capteur OLI.

Numéros des bandes	Bandes spectrales	Longueur d'onde (µm)	Résolution spatiale en (m)
1	Aérosol	0,43 – 0,45	30
2	Bleu	0,45 – 0,51	30
3	Vert	0,53 – 0,59	30
4	Rouge	0,64 – 0,67	30
5	Proche infra-rouge (PIR)	0,85 – 0,88	30
6	infra-rouge Moyen 1 (IRM1)	1,57 – 1,65	30
7	infra-rouge Moyen 2 (IRM2)	2,11 – 2,29	30
8	Panchromatique	0,50 – 0,68	15
9	Cirrus	1,36 – 1,38	30

2.1.2. Données spectrales SRTM

Les données spectrales SRTM (Shuttle Radar Topography mission) sont des données altimétriques recueillies au cours d'une mission de onze jours en février 2000 par la navette spatiale Endeavour en utilisant l'interférométrie radar. Le SRTM de la NASA a fourni des données altimétriques numériques pour plus de 80% du globe. Elles sont disponibles sous forme de modèle numérique de terrain de 3 secondes d'arc

(résolution d'environ 90 m). Un produit de données de 1 seconde d'arc (résolution d'environ 30 m) a également été produit mais n'est pas disponible pour tous les pays. Le produit de données utilisé dans ce travail est celui de 1 seconde d'arc, de résolution 30 m. Les images Landsat 8 OLI et SRTM qui ont servi à cette étude ont toutes été téléchargées sur le site web http://earthexplorer.usgs.gov/, et ont été obtenues au moyen de la télédétection qui sera décrite plus bas.

Tableau 2.2 Information sur les scènes Landsat 8 OLI/TIRS acquises.

Scènes	Ligne	Colonne	Date d'acquisition	Niveau
1	58	182	01/05/2020	1
2	59	182	01/05/2020	1
3	55	183	13/02/2020	1
4	57	183	13/02/2020	1
5	58	183	28/01/2020	1
6	51	184	20/02/2020	1
7	52	184	04/02/2020	1
8	53	184	04/02/2020	1
9	54	184	20/02/2020	1
10	55	184	20/02/2020	1
11	56	184	18/11/2020	1
12	57	184	18/11/2020	1
13	58	184	23/12/2015	1
14	51	185	27/02/2020	1
15	52	185	11/02/2020	1
16	53	185	11/02/2020	1
17	54	185	11/02/2020	1
18	55	185	11/02/2020	1
19	56	185	11/02/2020	1

20	57	185	26/01/2020	1
21	58	185	26/01/2020	1
22	55	186	18/02/2020	1
23	56	186	05/03/2020	1
24	57	186	06/01/2016	1
25	58	186	29/03/2017	1
26	55	187	25/02/2020	1
27	56	187	24/01/2020	1
28	57	187	29/01/2016	1

2.1.3 Télédétection

La télédétection englobe tout le processus qui consiste à enregistrer l'énergie d'un rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi, à traiter et à analyser l'information. La télédétection est donc un moyen de définir un objet ou un groupe d'objets à la surface de la Terre à partir de leurs caractéristiques spécifiques :

- Une signature spectrale ;
- Une variation temporelle de cette signature spectrale ;
- Une répartition spatiale spécifique de l'objet ;
- Une ou des relations dites de voisinage de cet objet avec les autres objets qui l'entourent.

La télédétection satellitaire est actuellement un des seuls outils permettant d'acquérir des informations détaillées en tout point du globe terrestre (ou quasiment), rapidement et de manière objective, régulière et répétitive, permettant ainsi un suivi des évènements environnementaux dans plusieurs domaines.

2.1.3.1 Eléments constituant les systèmes de télédétection

Les systèmes de télédétection sont constitués de trois éléments que sont, un vecteur, un ou plusieurs capteurs, et un ensemble de moyens de contrôle du système et d'exploitation des données acquises.

- ✓ Les vecteurs : ce sont des engins sur lesquels sont embarqués des appareils de mesure et d'enregistrement (capteurs) des données acquises sur les objets observés à la surface de la Terre. Il peut s'agir des satellites, des avions ou des ballons.
- ✓ Les capteurs : ils sont des instruments de mesure permettant d'acquérir et d'enregistrer la portion du rayonnement électromagnétique réfléchi par les objets observés à la surface de la terre dans une ou plusieurs longueurs d'onde donnée, qu'ils retransmettent ensuite vers un système de reception sur la Terre. Lorsque le capteur se contente d'enregistrer uniquement l'énergie solaire réfléchie par la cible ou le rayonnement propre émis par celle-ci, on parle de capteur passif. Tandis que lorsqu'il émet sa propre énergie pour illuminer la cible et en enregistre l'écho on parle de capteur actif.
- ✓ Les moyens de contrôle et de réception : il s'agit d'un centre de mission définissant régulièrement les tâches du satellite, un centre de contrôle pour piloter le satellite, des stations de réception et d'enregistrement des données, un centre de prétraitement des données souvent associé à des stations de réception qui fournissent ainsi des produits standards utilisables plus aisément, des structures de diffusion des données, auxquelles est toujours associé un système de télédétection satellitaire.

2.1.3.2 Principe de la télédétection

Le principe de fonctionnement général de la télédétection est résumé par la figure 2.1 ci-dessous.

À l'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible. Elle peut être naturelle (le soleil) ou artificielle (le capteur). Le rayonnement émis interagit avec l'atmosphère qui absorbe certaines longueurs d'onde et ne laisse passer que celles du domaine du visible, de l'infrarouge et des hyperfréquences : ce sont les fenêtres atmosphériques. La portion du rayonnement qui atteint la cible est réfléchie en direction du capteur (embarqué sur un satellite, un avion ou un ballon) qui l'enregistre et retransmet l'information vers les systèmes de réception placés sur Terre.

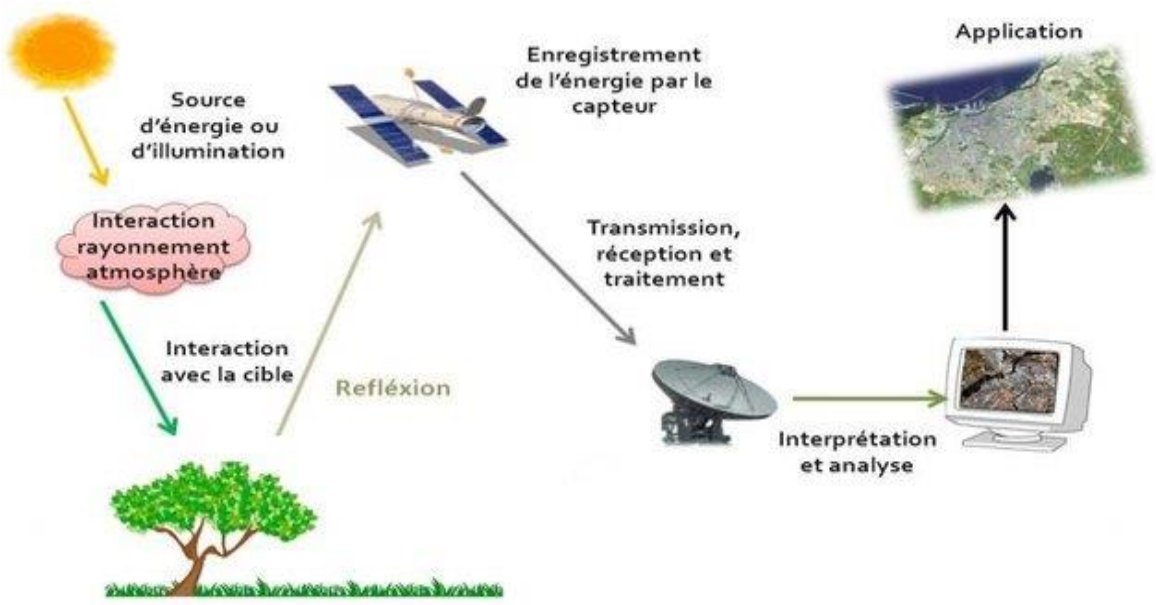


Figure 2.1 Principe de fonctionnement général des systèmes de télédétection (El Houcine, 2020) ;

L'information est ensuite transformée en images, traitée et interprétée de façon visuelle ou numérique pour en extraire l'information qu'on désire obtenir de la cible.

Source d'énergie

L'observation de la Terre par les satellites implique nécessairement une source d'énergie. En télédétection, trois sources d'énergie sont utilisées. La première, la plus commune et la plus utilisée est le soleil qui illumine la surface de la Terre. La portion

du rayonnement réfléchie par la surface de la Terre est alors captée et enregistrée par le capteur du satellite. Ce processus illustre la télédétection optique, dans les domaines du visible et du proche infrarouge. En revanche, la source d'énergie n'est pas toujours la lumière solaire. Quant à la deuxième il s'agit de la surface de la Terre, qui se comporte également comme une source d'énergie à travers l'émission d'un rayonnement qui peut être capté et enregistré par les capteurs satellitaires. Cela correspond à la télédétection dans le thermique ou dans le domaine des micro-ondes passives. Troisièmement, le capteur du satellite peut lui-même être source d'énergie en émettant grâce à une antenne, un rayonnement vers la surface terrestre, puis en enregistre la partie du rayonnement rétrodiffusée. Ce processus est connu sous le nom de télédétection active dans le domaine des hyperfréquences.

La télédétection utilise les propriétés du rayonnement électromagnétique pour analyser à distance la surface du sol, de l'océan ou l'atmosphère. Une bonne connaissance de la physique élémentaire du rayonnement est indispensable à l'interprétation des résultats de la télédétection.

2.1.3.3 Ondes électromagnétiques

Une onde électromagnétique correspond à la vibration simultanée dans l'espace d'un champ électrique et d'un champ magnétique. Elle est une onde progressive et transversale ; le sens de la variation des champs est perpendiculaire à la direction de propagation (Figure 2.2).

Une onde électromagnétique se caractérise par sa fréquence, sa période, sa longueur d'onde, son amplitude et sa polarisation.

- La fréquence **ν** : c'est le nombre de cycles par unité de temps. Son unité est le Hertz (Hz). Un Hz équivaut à un cycle par seconde. Les ondes utilisées en télédétection se caractérisent par des fréquences très élevées mesurées en multiples du Hz (kHz, MHz ou GHz).

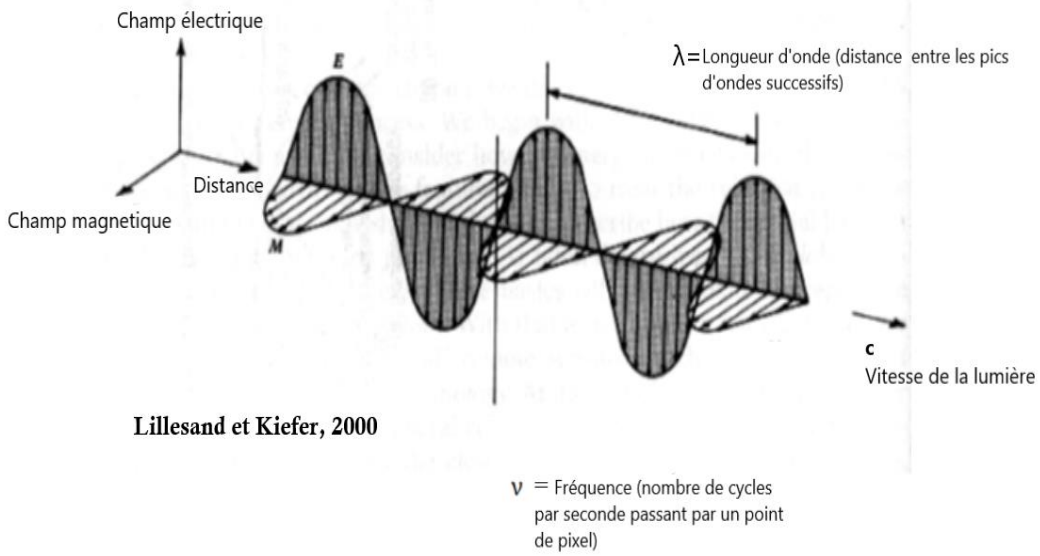


Figure 2.2 Onde électromagnétique simple (monochromatique et plane) (Kergomard, 2017).

- La période **T** : c'est le temps au bout duquel le champ électrique ou magnétique retrouve sa valeur à partir d'un instant quelconque, c'est à dire effectue un cycle. L'unité est la seconde (s).
- La longueur d'onde **λ** : elle est exprimée par une unité de longueur, le mètre ou ses multiples, ou ses sous-multiples en particulier le micron ou micromètre (µm) et le nanomètre (nm). Elle est liée à la fréquence par la formule :

$$c = \lambda . \nu \qquad (2.1)$$

où c, est la vitesse de la lumière dans le vide. $c = 3.\ 10^8\ m.s^{-1}$

- La polarisation : c'est l'orientation du champ électrique dans le plan perpendiculaire à la direction de propagation. La lumière visible (rayonnement solaire) est non-polarisée, c'est à dire qu'elle n'a pas d'orientation privilégiée dans ce plan. En revanche, la polarisation du rayonnement doit être prise en compte en télédétection micro-ondes (capteurs radars).
- L'amplitude : elle conditionne l'intensité du rayonnement en ce sens que plus l'amplitude est forte plus le flux d'énergie est intense.

2.1.3.4 Spectre électromagnétique

Le rayonnement électromagnétique, d'origine naturelle ou artificielle, existe pour une gamme très étendue de fréquences ou de longueurs d'onde (de 10^{-9} m à 10^{5} m), qui constitue le spectre électromagnétique (Figure 2.3). La lumière que nos yeux peuvent déceler se trouve dans ce qui s'appelle le "spectre visible" (dont les longueurs d'onde s'étendent de 0,4 à 0,7 µm). Toutefois le spectre visible représente une infime partie de l'ensemble du spectre. Une grande partie du rayonnement électromagnétique qui nous entoure est invisible à l'œil nu, mais peut cependant être captée par d'autres dispositifs de télédétection.

Le spectre électromagnétique est constitué par ordre croissant de longueur d'onde :

- Des rayons gamma (ɣ) : ce sont des radiations à éléments radioactifs, très énergétiques et ont la capacité de traverser la matière. Leur longueur d'onde est comprise entre10^{-14} et 10^{-12} m ;
- Des rayons X : ils sont très énergétiques et traversent plus ou moins facilement la matière, et sont utilisés en médecine et radiologie. Leur longueur d'onde varie entre10^{-12} et 10^{-8} m ;
- Des rayons ultraviolets : ils sont assez énergétiques et nocifs pour la peau, mais sont stoppés par la couche d'ozone. Ils ont un intervalle de longueur d'onde de $[10^{-7} – 0{,}4.10^{-6}]$ m ;
- Du domaine du visible : il est constitué de six couleurs de longueur d'onde variant de 0,4 à 0,7 µm, présentées à la figure 2.4.
- Du domaine de l'infrarouge : on distingue deux types de rayonnement infrarouge, le rayonnement infrarouge réfléchi dont la longueur d'onde s'étend de 0,7 à 3 µm, et le rayonnement infrarouge thermique, qui correspond à l'énergie dégagée par la surface de la Terre sous forme de chaleur du fait de sa température. Ce dernier a une longueur d'onde allant de 3 à 15 µm.

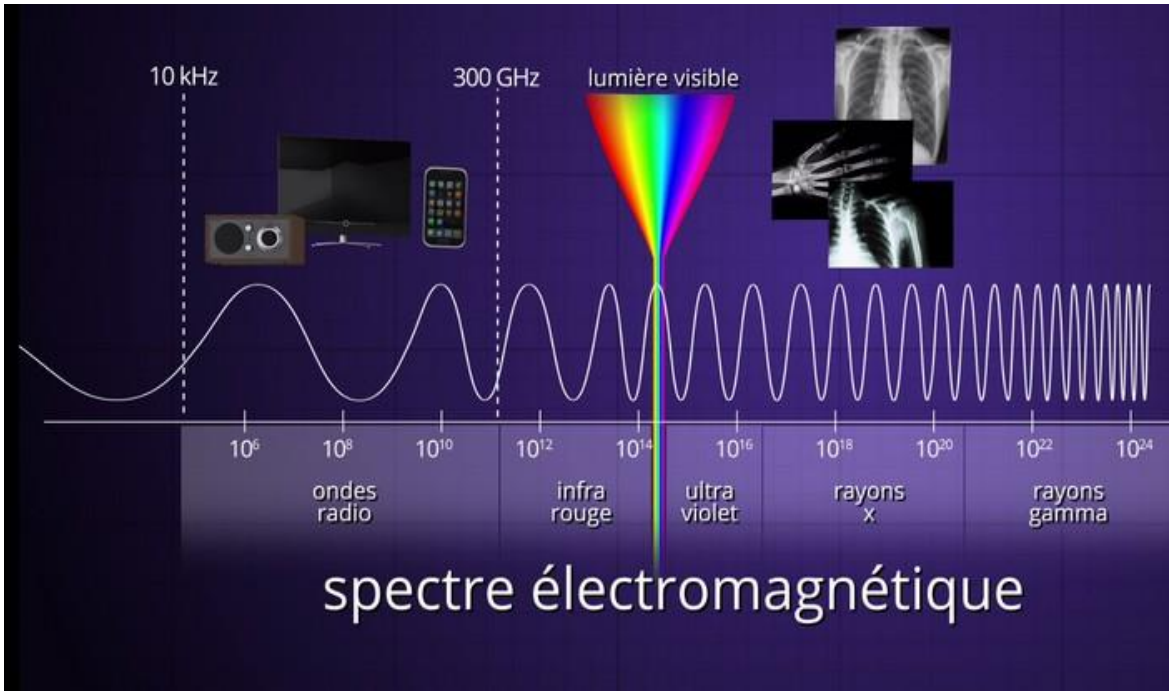
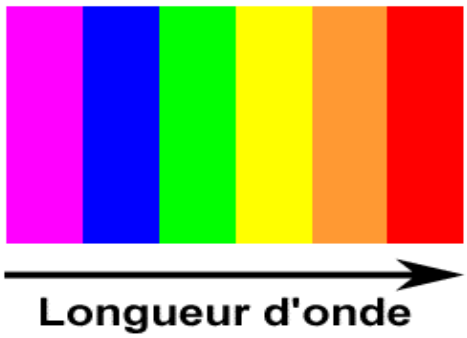


Figure 2.3 Spectre électromagnétique (Médiathèque, 2018).

- Des micro-ondes ou hyperfréquences : elles ont des longueurs d'onde allant de 3 mm à 1m.
- Des ondes radio : elles permettent la transmission d'information (radio, TV, téléphone) et ont une longueur d'onde au moins égale à 3 m.



Violet : 0,4 – 0,446 µm
Bleu : 0,446 – 0,500 µm
Vert : 0,500 – 0,578 µm
Jaune : 0,578 – 0,592 µm
Orange: 0,592 – 0,620 µm
Rouge: 0,620 – 0,7 µm

Figure 2.4 Spectre du visible et longueurs d'onde y associées (Médiathèque, 2018).

2.1.3.5 Rayonnement et énergie

Le rayonnement électromagnétique est une forme de transport d'énergie. Une onde électromagnétique transporte l'énergie non pas de façon continue, mais de façon discrète (au sens mathématique du terme), par entités élémentaires ou quanta d'énergie. Ces quanta d'énergie peuvent être assimilés à des particules, et sont parfois appelés des photons. La quantité d'énergie associée à un photon dépend de la fréquence :

$$E = h.\nu \qquad (\mathbf{2.2})$$

où E est la quantité d'énergie, ν la fréquence et h la constante de Planck : h = $6{,}63.10^{-34}$ J.s. Les rayonnements de fréquence élevée ou de courte longueur d'onde (ultraviolet, lumière visible) transportent ainsi beaucoup plus d'énergie que les rayonnements de grande longueur d'onde (infrarouge, micro-ondes). C'est l'énergie transportée par le rayonnement électromagnétique qui est détectée par les capteurs utilisés en télédétection.

Interactions du rayonnement électromagnétique avec la surface terrestre

Le rayonnement solaire qui atteint la surface peut être réfléchi par celle-ci et retourner vers l'espace d'où il provient, tout comme il peut être absorbé par la matière et se transformer en une autre forme d'énergie, ou alors il peut être transmis dans le volume occupé par ladite surface. D'après la loi de conservation de l'énergie, la somme de l'énergie réfléchie, absorbée et transmise doit être égale à l'énergie incidente. En normalisant les énergies par la quantité totale du rayonnement incident nous retrouvons ainsi les trois quantités de base de la télédétection dans cette partie du spectre : la réflectance (ρ), l'absorptance (α) et la transmittance (τ) (Figure 2.5).

De ces trois grandeurs, celle qui nous intéresse c'est la réflectance des objets. C'est elle qui est à la base de la brillance des objets tels que perçus sur une image de télédétection. L'absorptance est utile pour la compréhension des phénomènes d'échauffement des objets durant le cycle diurne du soleil et qui ont des répercussions sur le rayonnement émis dans l'infrarouge thermique. Quant à la transmittance, elle est

considérée souvent nulle car la plupart des objets sont opaques au rayonnement solaire. Elle est une quantité importante pour les objets translucides (comme les feuilles des plantes) ou transparents (comme un volume d'eau).

La réflectance des objets varie de 0 (absorption totale + transmission totale) à 1 (réflexion totale). Elle n'est pas constante dans le spectre, et sa variation en fonction de la longueur d'onde constitue la signature spectrale de l'objet. Ainsi, chaque objet terrestre peut être distingué des autres objets par sa façon unique, en principe, de réfléchir le rayonnement solaire. Les deux principaux facteurs modulant la signature spectrale d'un objet sont sa composition chimique et sa géométrie.

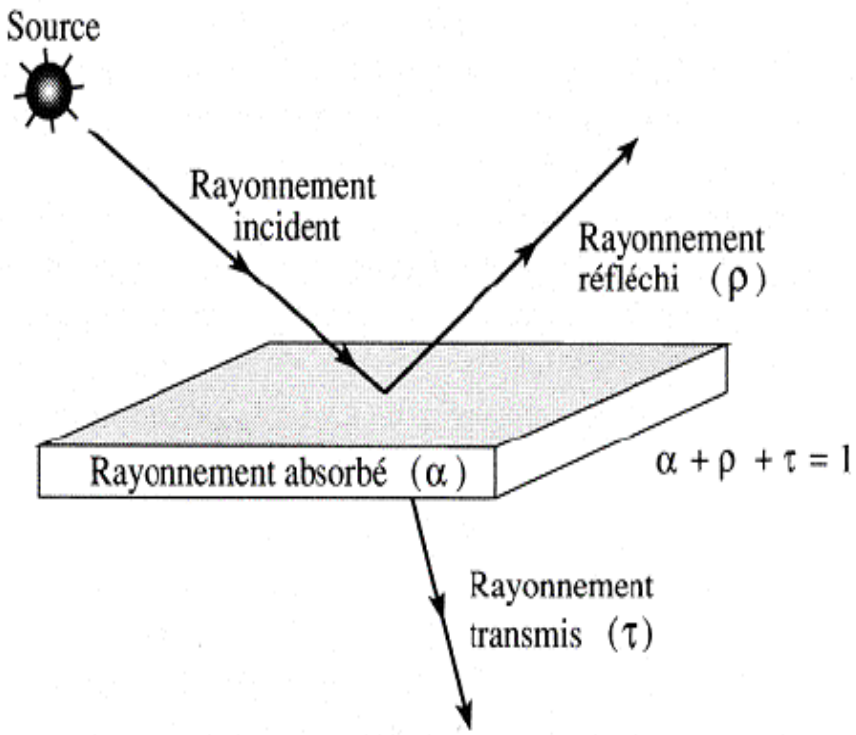


Figure 2.5 Interaction du rayonnement solaire avec la surface (GéoBrétagne, 2000).

Interaction du rayonnement solaire avec les feuilles des plantes

En étudiant la nature du spectre réfléchi par une cible, on peut obtenir des informations sur cette cible, sa nature, son état.

A titre d'exemple, les feuilles d'une plante en bonne santé vont absorber les longueurs d'onde du rouge et du bleu (pour les besoins physiologiques de la plante) à travers la chlorophylle, et réfléchir les longueurs d'ondes du vert (figure 2.6). Ainsi, nous voyons les feuilles de couleur verte. Par conséquent, les feuilles contenant un maximum de chlorophylle en été, sont donc plus vertes pendant cette saison. En automne, les feuilles qui contiennent moins de chlorophylle, absorbent moins de rouge, et paraissent donc rouges ou jaunes.

La structure interne des feuilles en santé agit comme un excellent réflecteur diffus pour les longueurs d'onde de l'infrarouge, c'est pour cela que les scientifiques utilisent d'ailleurs l'infrarouge pour déterminer l'état de santé de la végétation.

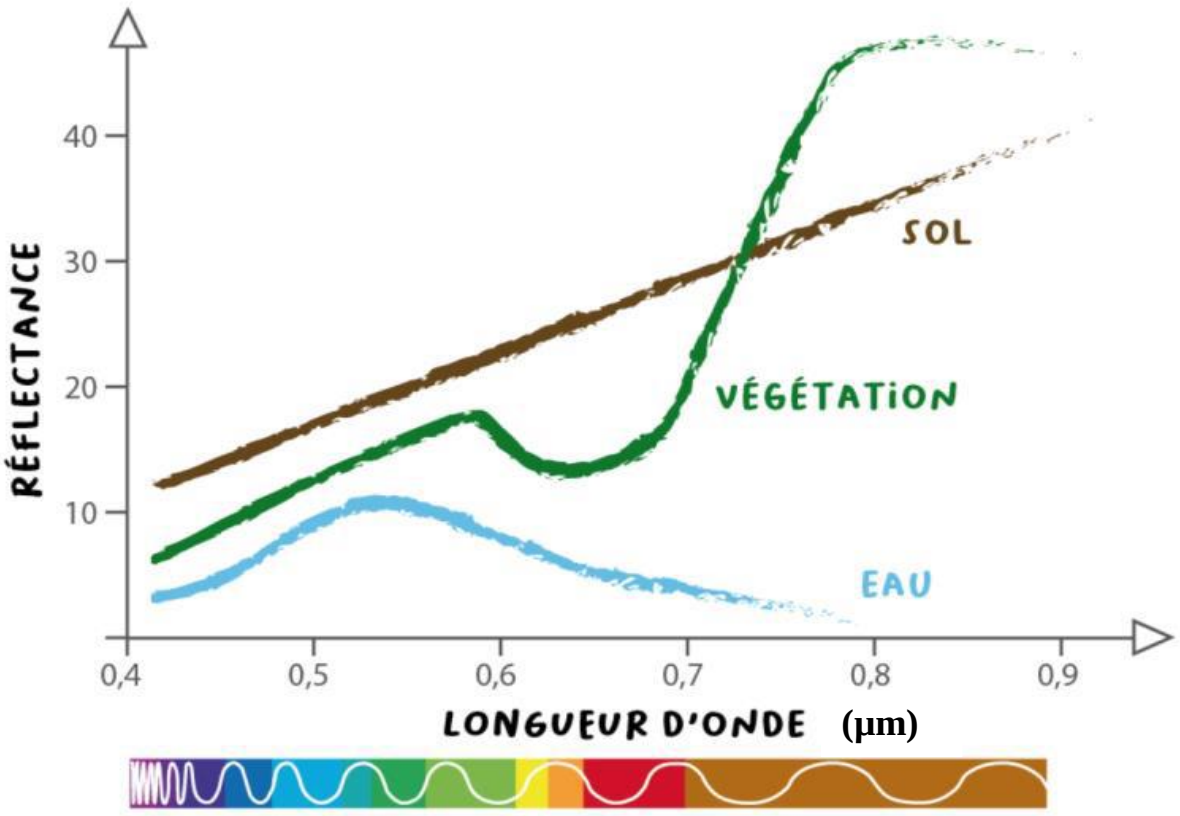


Figure 2.6 Signature spectrale de quelques objets (GéoBrétagne, 2000).

2.1.3.6 Mesure du rayonnement

La mesure du rayonnement se fait essentiellement à partir de l'énergie transportée par ce rayonnement. Les grandeurs radiométriques sont donc des flux d'énergie ou flux radiatifs, c'est-à-dire des quantités d'énergie émises, transportées ou reçues par unité de temps. L'unité de flux radiatif est le Watt (W).

En télédétection, les capteurs les plus fréquemment utilisés sont des radiomètres qui enregistrent ou mesurent donc un flux d'énergie en provenance de la surface de la Terre, qu'il ait été émis ou qu'il ait été réfléchi par celle-ci. L'intensité de ce flux d'énergie dépend de :

- L'étendue de la surface terrestre qui émet ou réfléchit (unité de surface : m^2).
- L'ouverture du champ de vision du capteur par rapport à l'émission ou à la réflexion de la surface qui s'effectue dans toute les directions ; cette ouverture est un angle solide (dans l'espace), dont l'unité de mesure est le stéradian (sr).
- L'étendue de la gamme des longueurs d'onde à laquelle est sensible le capteur (bande spectrale), qui se mesure en microns (µm).

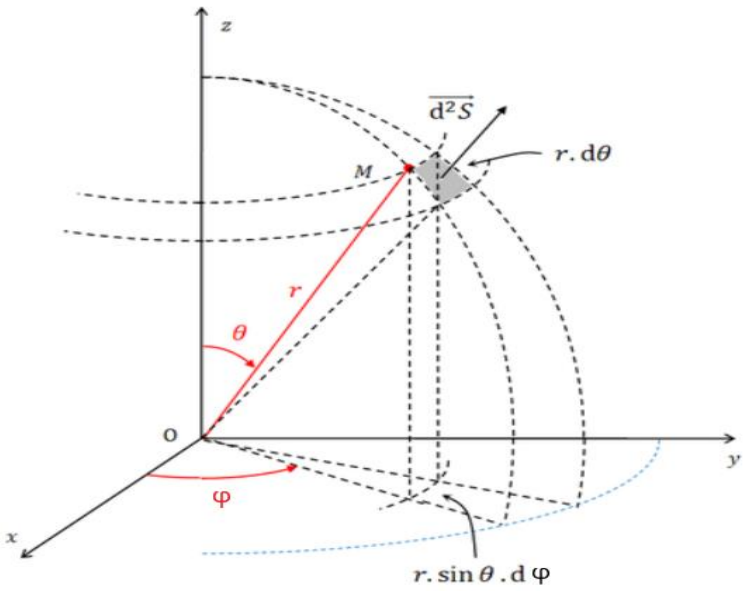


Figure 2.7 Angle solide élémentaire en coordonnées sphériques.

L'angle solide élémentaire $d^2\Omega$ (Figure 2.7) correspondant à une surface infinitésimale d'aire d^2S s'exprime sous la forme :

$$d^2\Omega = d^2S/r^2 \quad \textbf{(2.3)}$$

où r est la distance qui sépare le sommet de l'angle solide élémentaire de l'élément de surface.

Pour une sphère de rayon r, l'angle solide élémentaire $d^2\Omega$ est défini pour un élément de surface élémentaire d^2S, correspondant à des variations angulaires infinitésimales des altitude θ et azimut φ:

$d^2S = r\,d\theta\; r\sin\theta\,d\varphi = r^2\sin\theta\,d\varphi\,d\theta$**,** *d'où*

$$d^2\Omega = \sin\theta\,d\theta\,d\varphi \quad \textbf{(2.4)}$$

$$\Omega = \iint \sin\theta\,d\theta\,d\varphi \quad \textbf{(2.5)}$$

Dans le cas d'un cône de révolution de demi-angle au sommet θ', l'angle solide s'exprime :

$$\Omega = \iint d^2\Omega = \int_0^{2\pi} d\varphi \int_0^{\theta'} \sin\theta\,d\theta = 2\pi\,(1-\cos\theta') = \Omega = 4\pi\sin^2\frac{\theta'}{2}$$

Pour les petits angles,

$$\Omega = \pi\,\theta'^2 \quad \textbf{(2.6)}$$

Grandeurs radiométriques de la mesure du rayonnement

Le flux énergétique **Φ** : c'est la puissance du rayonnement électromagnétique émis par une source, transporté par un faisceau ou intercepté par un récepteur. Il s'exprime en W. m^{-1}. Son expression dans une bande de longueur d'onde $[\lambda_1\ ,\ \lambda_2\ ]$ est donnée par la formule :

$$\Phi_{[\lambda_1\lambda_2]} = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \Phi_\lambda d\lambda \quad \textbf{(2.7)}$$

où, $\Phi_\lambda = \frac{d\epsilon(\lambda)}{dt}$; $\epsilon(\lambda)$ est l'énergie spectrale reçue par le récepteur pour chaque longueur d'onde.

La luminance **L** : c'est l'intensité du flux radiatif émis ou réfléchi par une portion de la surface de la Terre, telle qu'elle est mesurée par un capteur, et se mesure en $W.m^{-2}.sr^{-1}.\mu m^{-1}$. Elle est donnée par la formule :

$$L = \frac{d^4\Phi}{d^2S\cos\theta\, d^2\Omega} \quad \textbf{(2.8)}$$

L'émittance **M** : c'est le flux énergétique émis dans toutes les directions par unité de surface réelle. Elle s'exprime en $W.m^{-2}$ et est donnée par la formule :

$$M = \frac{d^2\Phi}{d^2S} \quad \textbf{(2.9)}$$

Dans le cas d'un angle solide élémentaire $d^2\Omega$, il s'écrit en fonction de la luminance :

$$d^2M = \frac{d^4\Phi}{d^2S} = L\cos\theta\, d^2\Omega \quad \textbf{(2.10)}$$

L'éclairement **E** : est le flux reçu par unité de surface réelle issu de toutes les directions. Il se mesure également en $W.m^{-2}$ et est donné par la formule :

$$E = \frac{d^2\Phi_r}{d^2S'} \quad \textbf{(2.11)}$$

Sous un angle solide élémentaire, il s'écrit en fonction de la luminance :

$$d^2E = \frac{d^4\Phi_r}{d^2S'} = L\,cos\,\theta' d^2\Omega' \quad \textbf{(2.12)}$$

La réflectance : elle représente la part du rayonnement solaire incident qui est réfléchie par la surface du sol dans la direction du capteur. Elle est donnée par la formule :

$$\rho(\lambda) = \frac{\pi.L(\lambda)}{E_S(\lambda,t).cos(\theta_S)} \quad \textbf{(2.13)}$$

Avec θ_S l'angle d'éclairement.

Le flux reçu sur une surface dépend de son orientation par rapport à la source lumineuse. En effet, si la surface est perpendiculaire aux rayons lumineux, le flux est maximum, tandis que si elle est parallèle, il devient nul, d'où la présence de $cos(\theta_s)$ dans la formule (2.13). Le facteur de normalisation π fait en sorte que la réflectance soit égale à 1 si la surface réfléchit vers le ciel la totalité de l'éclairement incident.

2.1.3.7 Quelques applications de la télédétection

La télédétection s'applique à toutes les disciplines qui nécessitent d'appréhender la répartition spatiale d'un phénomène, soit pour déterminer un état à un instant donné, soit pour suivre une évolution plus au moins rapide d'un phénomène.

En agriculture

L'agriculture joue un rôle primordial dans l'économie des pays développés et en voie de développement et peut représenter une industrie rentable pour un pays économiquement fort ou une production élémentaire de subsistance pour un pays pauvre. Tout producteur agricole a besoin d'information pour gérer efficacement ses récoltes et doit disposer des outils d'information qui lui permettent de planifier ses opérations et de faire face aux multiples aléas pouvant menacer sa production, telles que des infestations d'insectes, intempéries, sécheresses ou dommages reliés au stress des végétaux, qui peuvent affecter le potentiel de sa récolte et les conditions de sa terre.
La télédétection offrant une méthode sûre et efficace de cueillette d'information, sert donc ici à la classification des types de cultures, l'estimation de la production totale d'une récolte, la cartographie des caractéristiques du sol, la cartographie des pratiques de gestion du sol. En plus d'offrir une vue synoptique, elle peut fournir de l'information sur la structure et la santé de la végétation. En effet, la réflectance spectrale d'un champ varie selon le stade de croissance, le type de plantes et leur état de santé.

En géologie

Grâce à la télédétection, à partir de la réflectance spectrale, les données multispectrales peuvent fournir l'information sur la composition lithologique des roches,

et les données radar, sur la rugosité et la géométrie de la surface, très utile pour produire une représentation détaillée du relief. Les principales applications de la télédétection pour la géologie sont donc la cartographie des dépôts de surface, la cartographie lithologique, la cartographie structurale, l'exploration et exploitation des agrégats (sable et gravier), l'exploration minière, la cartographie et la surveillance des taux de sédimentation, la cartographie et la surveillance des phénomènes naturels, la cartographie des risques géologiques, la cartographie planétaire.

En hydrologie

Dans ce domaine la télédétection offre un aperçu synoptique de la distribution spatiale et de la dynamique des processus hydrologiques, qui n'est généralement pas disponible avec les relevés terrestres. Le radar apporte une nouvelle dimension aux études hydrologiques, car c'est un capteur actif qui permet l'acquisition de données le jour, la nuit et même durant les tempêtes. Parmi les applications de la télédétection en hydrologie on peut citer : la cartographie et la surveillance des marécages et des inondations, l'évaluation de l'humidité du sol, la surveillance et la cartographie de l'étendue d'une surface de neige, la surveillance de la dynamique des glaciers (ablation, poussée), la détection des changements dans les rivières, la cartographie et la modélisation des bassins hydrologiques.

2.1.4 Méthodes

Le traitement des différentes images utilisées notamment Landsat 8 OLI et SRTM s'est fait en trois étapes principales : le prétraitement, le traitement et l'extraction des linéaments.

2.1.4.1 Prétraitement

Dans cette étape, les images Landsat 8 OLI et SRTM ont subi des corrections radiométriques notamment la réduction du bruit, de la brume et l'égalisation d'histogramme, et par la suite été projetées dans le système WGS-84, Zone 32N et 33N.

Subséquemment, la mosaïque qui est une opération permettant d'assembler différentes scènes complémentaires en une seule, a été réalisée (Figures 2.8 et 2.9). Les corrections radiométriques et la mosaïque ont été effectuées à l'aide du logiciel ERDAS Imagine, tandis que la projection a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGis.

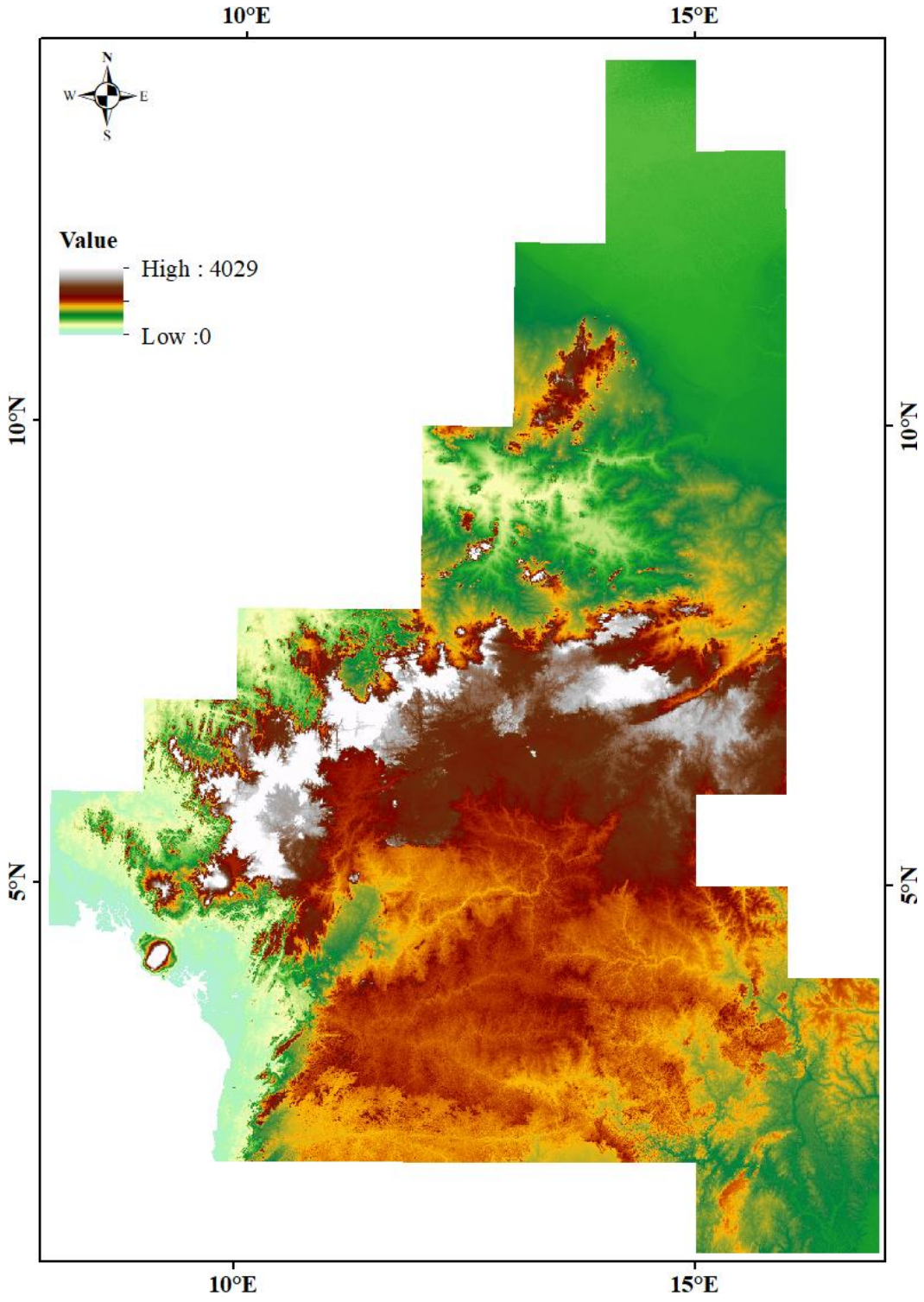


Figure 2. 8 Mosaïque des différentes images SRTM.

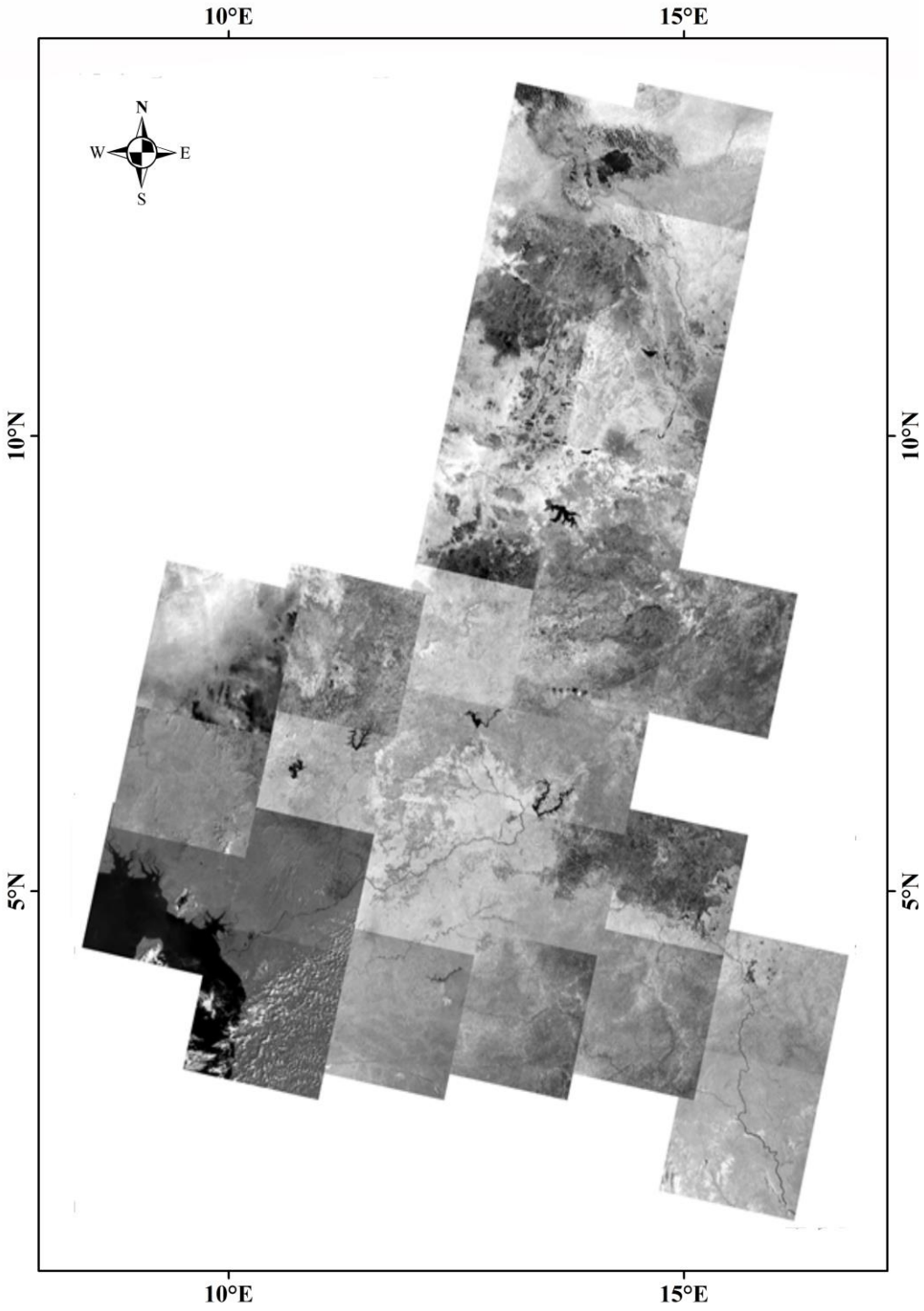


Figure 2.9 Mosaïque des différentes images Landsat 8 OLI.

2.1.4.2 Traitement

Analyse en composantes principales (ACP)

L'ACP est une méthode d'extraction de caractéristiques, appliquée sur des jeux de données décrits par des unités statistiques en lignes et des variables quantitatives en

colonnes. Par ses résultats, elle cherche à : repérer les similitudes entre les individus vis à vis de l'ensemble des variables ; relever les différences entre les individus et mettre en évidence ceux dont le comportement est atypique par rapport à l'ensemble des variables ; savoir si l'information brute ne pourrait être obtenue à partir d'un nombre restreint de variables ; réécrire simultanément les liaisons entre les variables.

Pour ce faire, on diminue la dimension du jeu de données en déterminant successivement les axes factoriels. C'est une méthode de réduction de la dimensionnalité des données. En résumé, l'ACP est une méthode analytique utilisée pour comprimer les informations contenues dans les bandes initiales en de nouvelles bandes appelées composantes principales, en éliminant la redondance des données (Gabr et al., 2010 ; Adiri et al., 2016 ; Amer et al., 2012).

L'ACP, dans ce travail a été utilisée pour compresser les données redondantes d'images multibandes afin d'obtenir une combinaison de la composition colorée la plus discriminante. Elle a été appliquée aux images Landsat 8 OLI à la combinaison de bande 7, 6, 2.

Filtrage spatial

Les filtres spatiaux représentent une autre méthode de traitement numérique, utilisées pour le rehaussement d'une image. Ils sont conçus de façon à faire ressortir ou à supprimer des caractéristiques spécifiques d'une image en se basant sur leur fréquence spatiale (fréquence de variation des différents tons qui apparaissent dans une image).

La méthode de filtrage spatial consiste à déplacer une fenêtre d'une dimension de quelques pixels au-dessus de chaque pixel de l'image. On applique alors un traitement mathématique utilisant les valeurs des pixels sous la fenêtre et on remplace la valeur du pixel central par le résultat obtenu. La fenêtre est déplacée le long des colonnes et des lignes de l'image, un pixel à la fois, répétant le calcul jusqu'à ce que l'image entière ait été filtrée.

Il existe plusieurs types de filtres parmi lesquels les filtres directionnels qui sont ceux utilisés dans cette étude.

Les filtres directionnels (ou filtres détectant les contours) sont utilisés pour rehausser les caractéristiques linéaires d'une image. Ces filtres peuvent aussi être conçus pour

rehausser des caractéristiques ayant une certaine orientation dans l'image. Ils ont de nombreuses applications en géologie pour la détection de structures géologiques linéaires telles que les linéaments.

L'un des objectifs de cette méthode est de mettre en évidence les discontinuités structurelles et de faciliter la discrimination des linéaments dans toutes les directions possibles et d'en faire ressortir le maximum. Les filtres utilisés dans ce travail sont des filtres directionnels de Sobel appliqués dans quatre directions : NS, EO, NE-SO, SE-NO avec des matrices de convolution de taille 7×7 (Binam et al., 2018 ; Gweth et al., 2021a) (Tableau 2.3).

Tableau 2.3 Matrices de convolution 7×7 des filtres directionnels de Sobel

NE-SO

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

NO-SE

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

N-S

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

E-O

-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

Plusieurs études ont montré l'efficacité de la combinaison de différentes techniques de traitement d'image pour améliorer le contraste de l'image et ainsi mieux mettre en évidence les discontinuités et les failles géologiques (Kenea, 1997 ; Suzen et Toprak, 1998). À cet égard, le filtrage de Sobel a été appliqué à la composante principale ayant le plus grand pourcentage de variance par combinaison de bande. Cette tâche a été réalisée à l'aide du logiciel ERDAS Imagine.

Relief ombragé

Les cartes thématiques en relief ombré sont une représentation visuelle du terrain constituée de valeurs de gris stockées dans des images matricielles, dérivées du modèle numérique de terrain (MNT). Le relief ombragé est couramment utilisé pour l'extraction de linéaments à partir de l'image SRTM (Mallast et al., 2011). Les limites entre les zones ombragées et non ombragées peuvent indiquer la présence de linéaments (Masoud et Koike, 2006). À cette fin, certains paramètres ont été appliqués aux données SRTM d'entrée, tels que la modification de l'azimut virtuel du soleil tout en conservant son marqueur d'élévation afin de créer un relief ombragé (Abdelouhed et al., 2021). Quatre images de relief ombragé constituant des fichiers de sortie avec un azimut de 0°, 45°, 90° et 135°, ont été obtenues.

Cette tâche a été réalisée avec le logiciel ArcGIS en utilisant l'outil d'analyse spatiale hillshade.

Extraction des linéaments

Deux approches ont été utilisées pour extraire les linéaments, l'approche automatique et l'approche manuelle.

L'extraction automatique a été appliquée à la composante principale de l'image Landsat ayant subi l'opération de filtrage et au relief ombragé de l'image SRTM, dans les quatre directions privilégiées. Ceci a été réalisé à l'aide du logiciel PCI Geomatica via l'algorithme du module de LINE en utilisant les valeurs des paramètres optimaux présentés dans le tableau 2.4.

De même l'extraction manuelle réalisée avec le logiciel ArcGIS a été appliquée à la composante principale filtrée de l'image Landsat 8 et au relief ombragé de SRTM,

dans les quatre directions privilégiées NS, NE-SO, NO-SE et EO. L'application des différentes méthodes de traitement sur les images Landsat 8 et SRTM a conduit à la carte de linéaments de la zone d'étude.

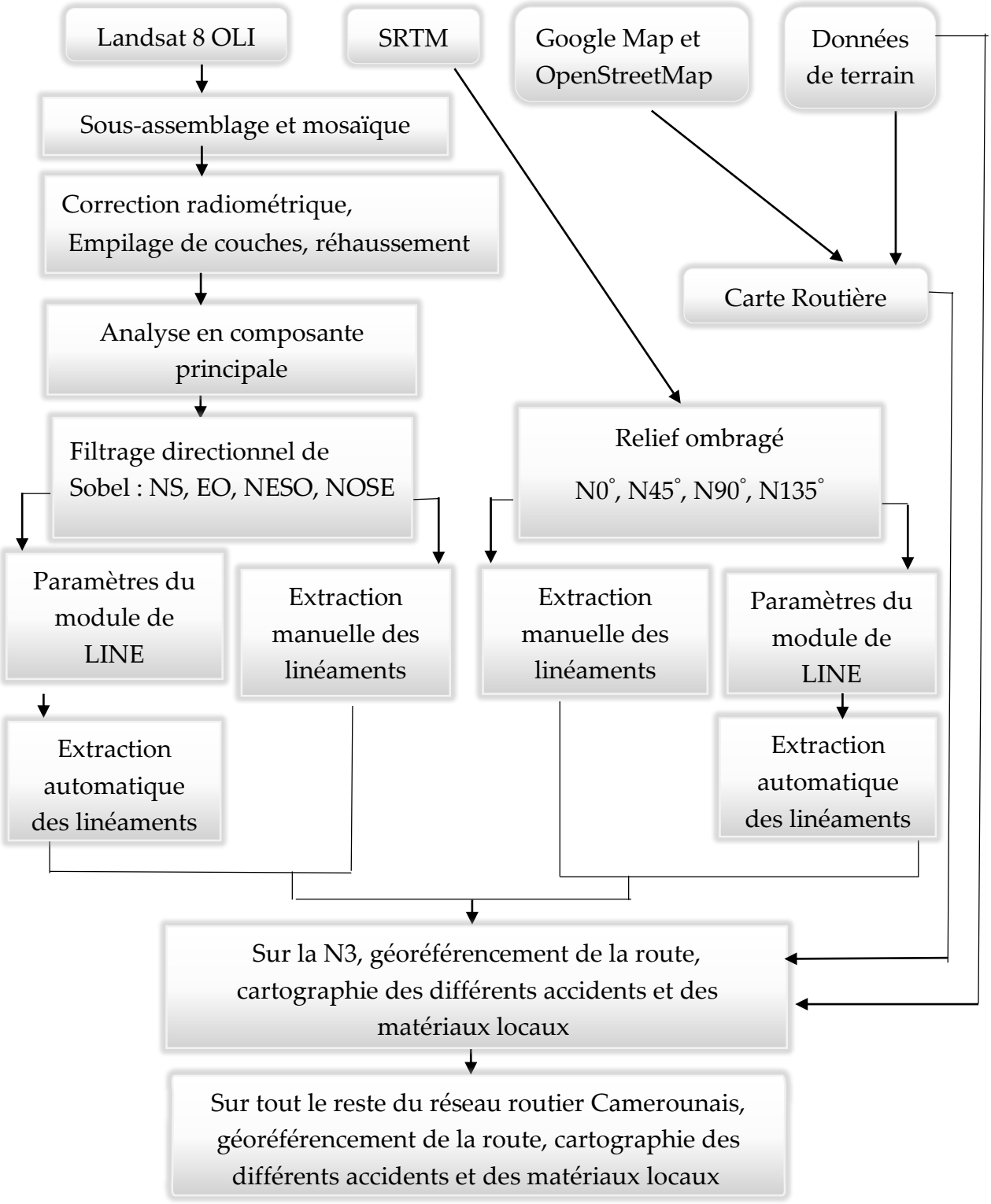


Figure 2.10 Organigramme de la méthodologie utilisée.

Les principales étapes qui ont mené à l'extraction des linéaments sont résumées par la figure 2.10.

Par la suite, pour catégoriser les linéaments, comme de façon générale les linéaments indiquent soient les failles soient les fractures, les linéaments considérés comme failles sont ceux qui sur le MNT se traduisent par une variation de hauteur d'au moins 30 m, et dans le cas contraire, des fractures.

Diagramme de Rose

Le diagramme de Rose est un diagramme donnant l'orientation des linéaments. La méthode conventionnelle consiste à produire les rosaces directionnelles proportionnelles à la longueur cumulative des linéaments par classe d'orientation 10^{o} (Abdelouhed et al., 2021 ; Singh et al., 2020) . Cette tâche a été effectuée à l'aide du logiciel Rockworks.

Tableau 2.4. Valeurs des paramètres appliqués pour l'extraction des linéaments.

Paramètres de seuil et unités	Valeurs par défaut	Valeurs sélectionnées
RADI (En pixel)	10	10
GTHR (allant de 0–255)	100	80
LTHR (En pixel)	30	30
FTHR (En pixel)	3	3
ATHR (En degré)	30	20
DTHR (En pixel)	20	20

Densité

La densité des linéaments qui est un paramètre très étudié dans de nombreuses études, fournit l'information sur la concentration des linéaments par unité de surface (Lachaine, 1999). Son expression est donnée par la formule (2.14). Elle a été examinée dans ce travail pour ressortir les zones les plus affectées par les failles et les fractures. Cette rubrique a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGIS à travers l'outil line density.

$$d_l = \frac{\sum L_i}{A} \quad (2.14)$$

L_i représente la longueur du linéament et A, la surface occupée par ledit linéament.

Altimétrie

La carte altimétrique a été réalisée en vue de déterminer les zones de collines pouvant constituer un réservoir de matériaux locaux. Elle a été obtenue à partir du MNT. Cette tâche a été réalisée à l'aide du logiciel ArcGis.

2.2 Travaux de terrain et matériel utilisé

Des campagnes de terrain ont été menées pendant la saison sèche de 2019 à 2023 à l'aide d'une boussole, d'un récepteur GPS, d'un décamètre, d'un altimètre et d'un véhicule, pour identifier les zones de failles, et de montagnes, en particulier le long de la route nationale N3. Cette route a été choisie comme zone pilote parce qu'elle est la principale route reliant la zone portuaire (depuis l'océan Atlantique) à tous les autres pays d'Afrique centrale et qu'elle appartient à la fois à la zone équatoriale et à la zone côtière, caractérisées par une forte couverture nuageuse. Les failles longitudinales et transversales de plus de 5 km de long ont été étudiées, car elles ont une extension longitudinale très importante et sont donc difficiles à modifier par l'activité humaine.

2.2.1 Boussole

Une boussole de marque Gelaisi a été utilisée (Figure 2.11). Elle fournit une direction de référence connue qui aide à la navigation. Elle nous permet de mesurer les directions des linéaments. Les points cardinaux sont (dans le sens des aiguilles d'une montre) : Nord, Est, Sud et Ouest.

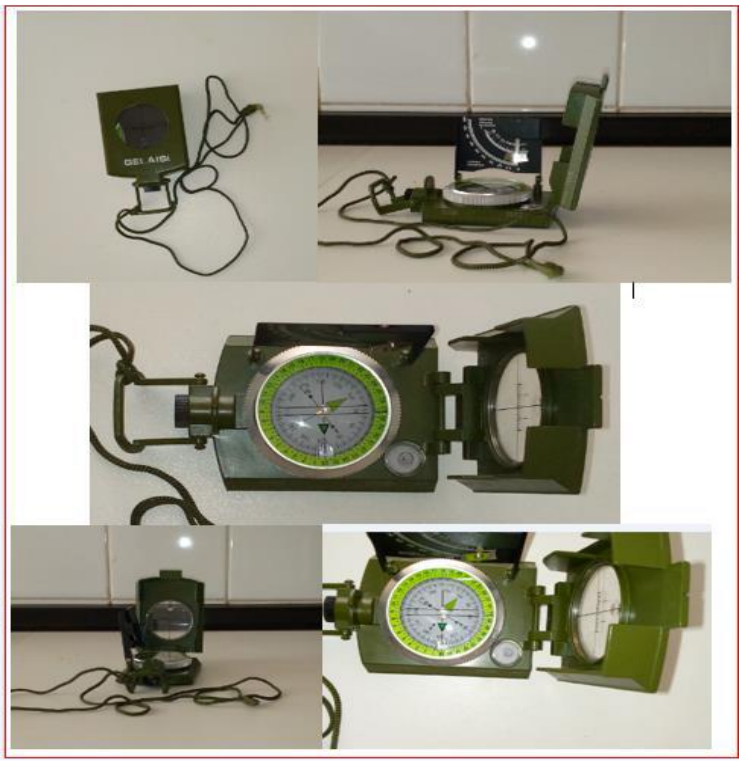


Figure 2.11 Boussole.

2.2.2 Décamètre

Figure 2.12 Décamètre.

Le décamètre est l'unité de longueur égale à dix mètres. Il nous permet de mesurer la longueur des linéaments (igure 2.12).

2.2.3 Récepteur GPS

Le récepteur GPS (Global Positioning System) est un appareil permettant de donner la localisation géographique (Figure 2.13). Il a été utilisé pour localiser la position des linéaments et des montagnes.

Figure 2.13 Récepteur GPS.

Conclusion

Les différentes données utilisées dans cette étude ont été présentées, ainsi qu'une description de la technique ayant permis de les collecter. De même, les logiciels ayant servi pour le traitement de ces données, au même titre que les méthodes utilisées ont été mis en évidence.

CHAPITRE 3 : RESULTATS ET DISCUSSION

Introduction

L'exploitation des données présentées précédemment a conduit aux résultats obtenus dans ce chapitre. Ainsi, le présent chapitre comprend deux grandes parties. La première qui est celle des résultats, déroulera les différentes cartes obtenues et les tableaux y associés éventuellement, tandis que la deuxième étayera lesdits résultats à travers une discussion.

3.1 Résultats

3.1.1 Production des cartes géoréférencées de la route nationale N3, des accidents tectoniques, ainsi que des formations géologiques et pédologiques y rencontrées

Après avoir établi la carte de la nationale N3 (Figure 3.1a), 25 zones de failles et fractures et 18 zones de pente dont les coordonnées sont consignées dans le tableau 3.3, ont été cartographiées (Figure 3.1b) ; 6 formations géologiques ont également été cartographiées à savoir, les collines de gneiss, de basalte, de granite, de schiste, de micaschiste, et de quartzite, dont les plus nombreuses sont les collines de gneiss (Figure 3.1c). De même 2 formations pédologiques dont les sols latéritiques et les sols argilo-sableux ont été cartographiées, les plus répandues étant les sols argilo-sableux (Figure 3.1d).

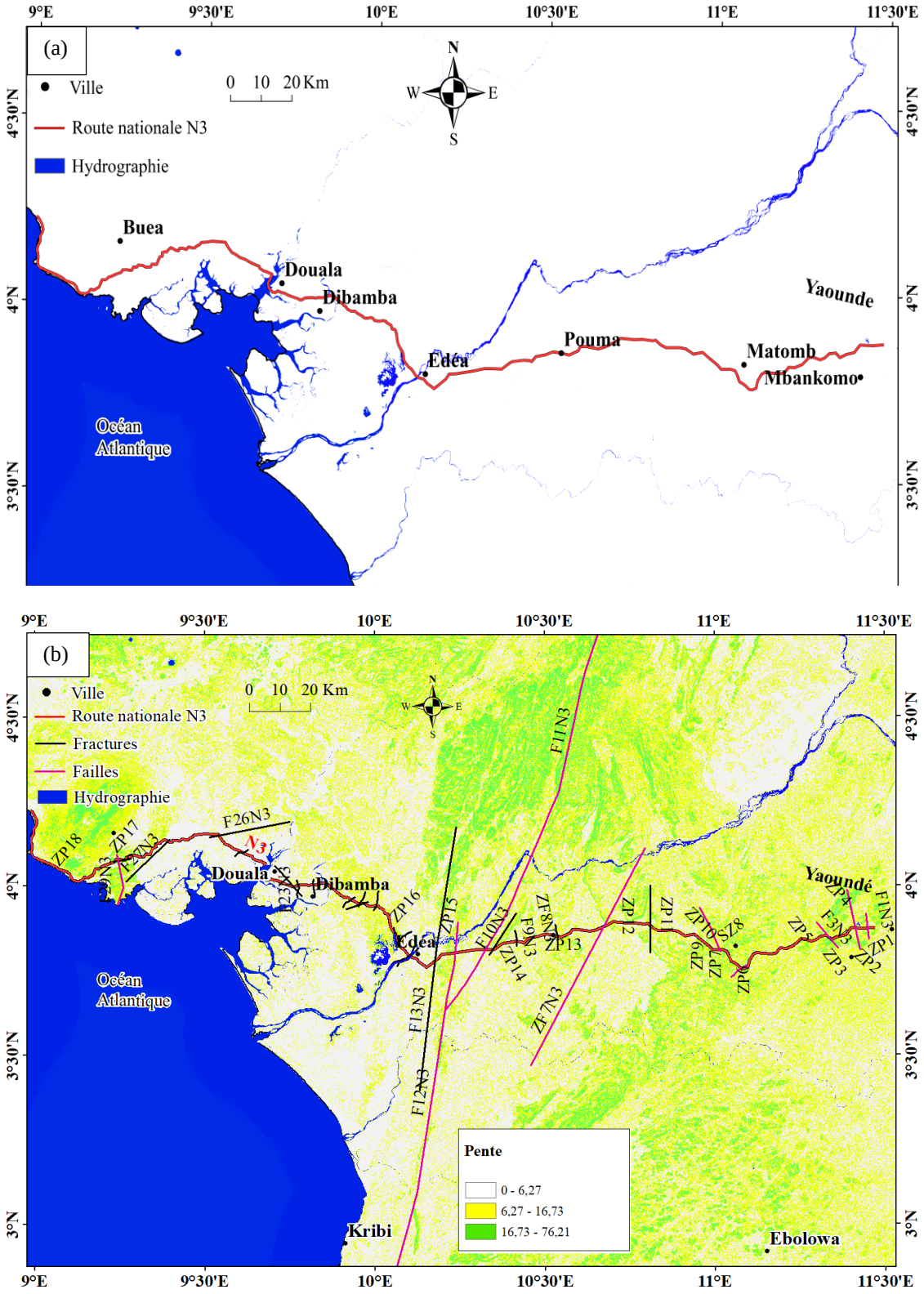


Figure 3.1 Carte de : (a) la route nationale N3 géoréférencée et des (b) failles, fractures et zones de pente sur la route nationale N3.

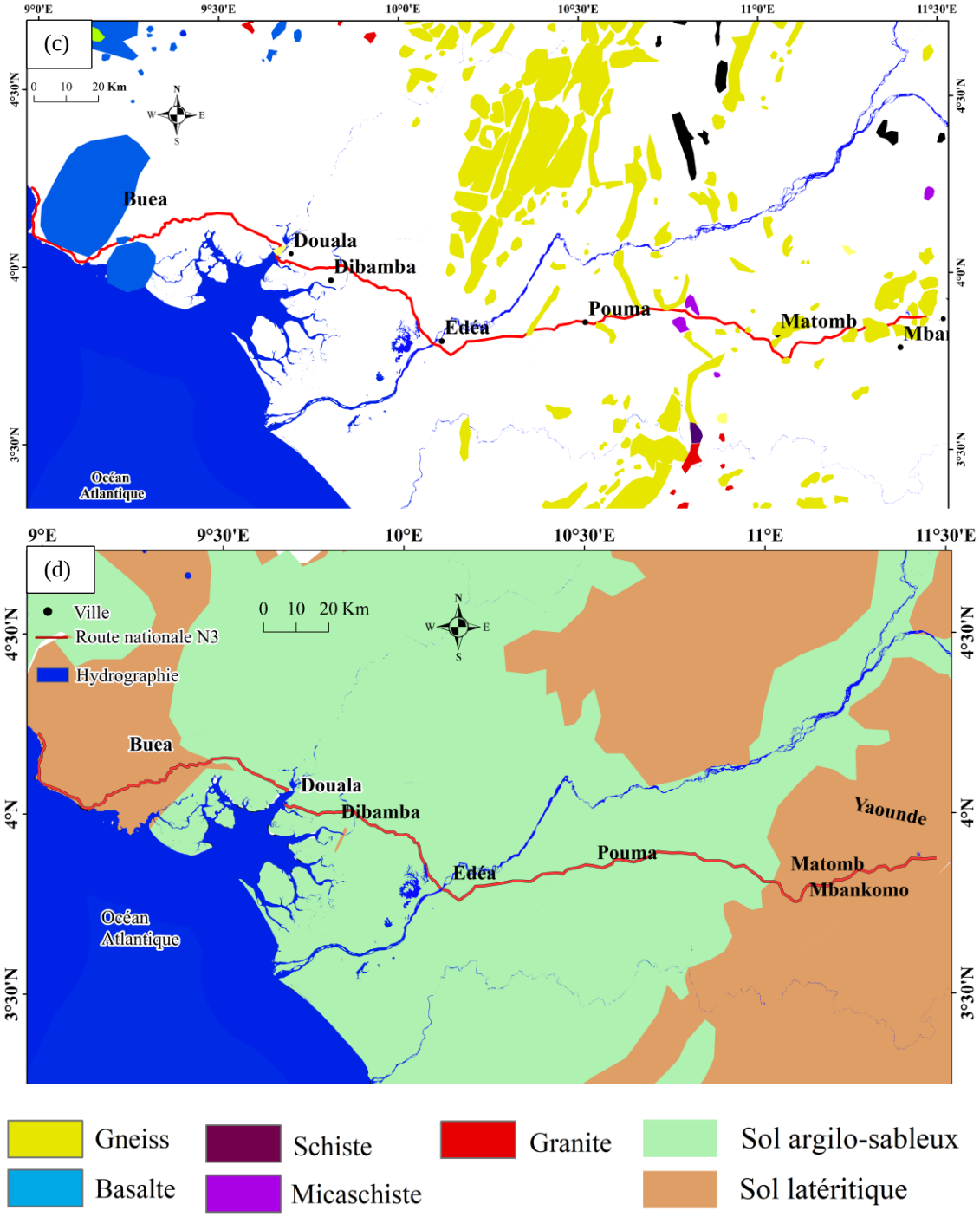


Figure 3.1 Carte des : (c) formations géologiques et (d) pédologiques le long de la route nationale N3.

Tableau 3.1 Coordonnées des différentes failles, fractures et pentes le long de la route nationale N3.

	Faille et fracture				**Pente**	
F1N3	11º26'55,5"E	3º52'30,8"N	N174°	ZP1	11º28'16,2"E	3º52'6,6"N
F2N3	11º24'40,7"E	3º52'45,"N	N168°	ZP2	11º22'53,7"E	3º51'0,5"N
F3N3	11º19'59,3"E	3º51'0,2"N	N140°	ZP3	11º19'11,5"E	3º50'58,3"N
F4N3	11º4'39,4"E	3°45'18,1"N	N55°	ZP4	11º20'34,7"E	3º50'30,2"N
ZF5N3	11º0'53,6"E	3º48'38,4"N	N155°	ZP5	11º16'30,2"E	3º50'8,5"N
ZF6N3	10º48'35,6"E	3º52'57,3"N	N0°	ZP6	11º2'39,1"E	3º47'23,2"N
ZF7N3	10º40'24"E	3º52'51,4"N	N28°	ZP7	11º2'35,8"E	3º47'15"N
ZF8N3	10º32'12,1"E	3º51'22,8"N	N172°	ZP8	11º2'3,1"E	3º48'24,7"N
F9N3	10º20'45,7"E	3º48'45,4"N	N174°	ZP9	10º57'14,4"E	3º50'36,5"N
F10N3	10º24'59,7"E	3º50'16,9"N	N32°	ZP10	10º58'26,5"E	3º49'43,3"N
F11N3	10º19'41,7"E	3º48'54,7"N	N22°	ZP11	10º49'37"E	3º52'15,1"N
F12N3	10º14'14,6"E	3º48'9,3"N	N9°	ZP12	10º44'52,8"E	3º53'28,4"N
F13N3	10º10'39,5"E	3º46'42,3"N	N8°	ZP13	10º33'41"E	3º51'11"N
F14N3	10º6'16,5"E	3º47'24"N	N52°	ZP14	10º22'25,3"E	3º49'37"N
F15N3	10º5'58,2"E	3º47'35,5"N	N52°	ZP15	10º12'60"E	3º48'5,1"N
F16N3	10º3'59,5"E	3º49'55,8"N	N54°	ZP16	10º3'38,4"E	3º51'31,5"N
F17N3	10º3'29,9"E	3º51'30"N	N176°	ZP17	9º14'17,9"E	4º4'36,7"N
F18N3	10º0'18,1"E	3º56'26,6"N	N16°	ZP18	9º11'14,3"E	4º3'15,8"N
F19N3	9º58'10"E	3º57'1,2"N	N72°			
F20N3	9º57'22"E	3º56'59"N	N23°			
F21N3	9º55'50,5"E	3º57'40,5"N	N51°			
F22N3	9º49'8"E	4º0'19,4"N	N5°			
F23N3	9º46'32,4"E	4º0'12,7"N	N0°			
F24N3	9º45'42"E	3º59'52,1"N	N140°			
F25N3	9º36'37,8"E	4º6'0,2"N	N60°			
F26N3	9º32'28,5"E	4º9'4,2"N	N80°			

F27N3	9º23'32,9"E	4º7'55,5"N	N47°
F28N3	9º14'12,2"E	4º4'26,7"N	N80°
F29N3	9º14'39,6"E	4º4'45"N	N0°

3.1.2 Production de la carte du réseau routier

L'utilisation des images de OpenStreetMap et Google Map a permis d'établir la carte du réseau routier principal au Cameroun. Ce réseau routier compte globalement 18 routes nationales, mais en tenant compte des bretelles on peut en dénombrer 27, à savoir les nationales N1, N1A, N2, N2A, N3, N4, N5, N6, N6A, N7, N8, N9, N10, N10A, N11, N12, N13, N13A, N14, N15, N15A, N16, N17, N17A, N17B, N18 et N19 (Figure 3.2). N1, N1A, N6, N6A et N14 assurent les échanges entre le Cameroun et le Nigéria; N1, N12, N13 et N13A relient le Cameroun au Tchad; N2 et N17B relient le Cameroun au Gabon; N2A et N7 assurent la communication entre le Cameroun et la Guinée Equatoriale; N9 relie le Cameroun au Congo; N1 et N10 relient le Cameroun à la République Centrafricaine. N3 est la principale route reliant la zone portuaire (à partir de l'océan Atlantique) à tous les autres pays de l'Afrique Centrale. Les autres routes nationales sont des routes intermédiaires débouchant sur les nationales N1A, N1, N2, N2A, N6, N7, N9, N10, N12, N13, N13A, N14 et N17B.

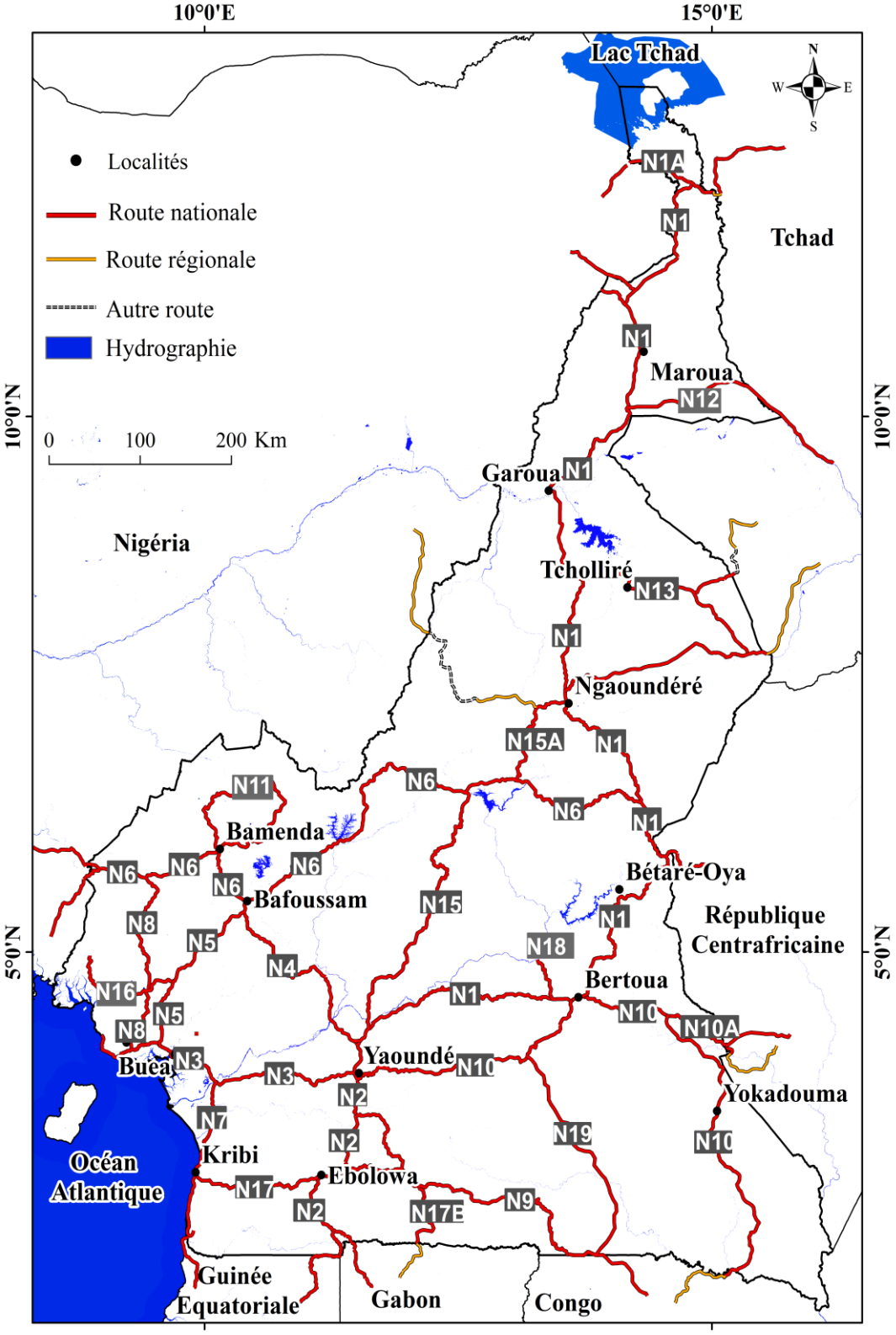


Figure 3.2 Carte du réseau routier.

3.1.3 Production de la carte des linéaments obtenue dans la zone d'étude

Les méthodes d'extraction manuelle et automatique ont permis de dresser la carte des linéaments. L'analyse statistique des linéaments obtenus dans ce travail fait état de 2321 (dont 1052 manuels et 1269 automatiques) linéaments extraits des images Landsat 8 (Figure 3.3) et 3142 (dont 1874 manuels et 1268 automatiques) linéaments extraits des images SRTM (Figure 3.4). Pour faciliter la comparaison entre les linéaments obtenus et les failles de la carte géologique, dans la suite du travail, seuls les linéaments d'au moins 5 km de long ont été pris en compte. Les linéaments obtenus par l'approche manuelle, présentent des longueurs variant de 5 à 65 km avec une longueur moyenne de 11 km pour les images Landsat 8, tandis que les linéaments extraits des images SRTM quant à eux ont une longueur variant de 5 à 356 km avec une longueur moyenne de 20 km. Pour ce qui est de l'extraction automatique, les longueurs des linéaments varient de 5 à 35 km avec une valeur moyenne de 6 km, et de 5 à 30 km avec une valeur moyenne de 6 km pour les images Landsat 8 et SRTM respectivement. La carte finale des linéaments a été générée en combinant tous les linéaments extraits automatiquement et manuellement pour chacun des ensembles de données (Figure 3.5a) ; ainsi 5463 linéaments ont été identifiés. Après avoir supprimé les linéaments répétitifs et ceux correspondant aux pistes, 5222 ont été retenus, constituant ainsi la carte finale des linéaments ; leurs longueurs variant de 5 à 356 km avec pour directions respectives N160 et N33, une longueur moyenne de 12 km et un écart type de 14 km (Tableau 3.2). Les linéaments de longueur inférieure à 12 km sont les plus nombreux et constituent un pourcentage de 73%. L'analyse statistique des linéaments a été menée par plusieurs auteurs en vue d'étudier la géométrie du réseau de linéaments et d'identifier les directions dominantes dans la zone.

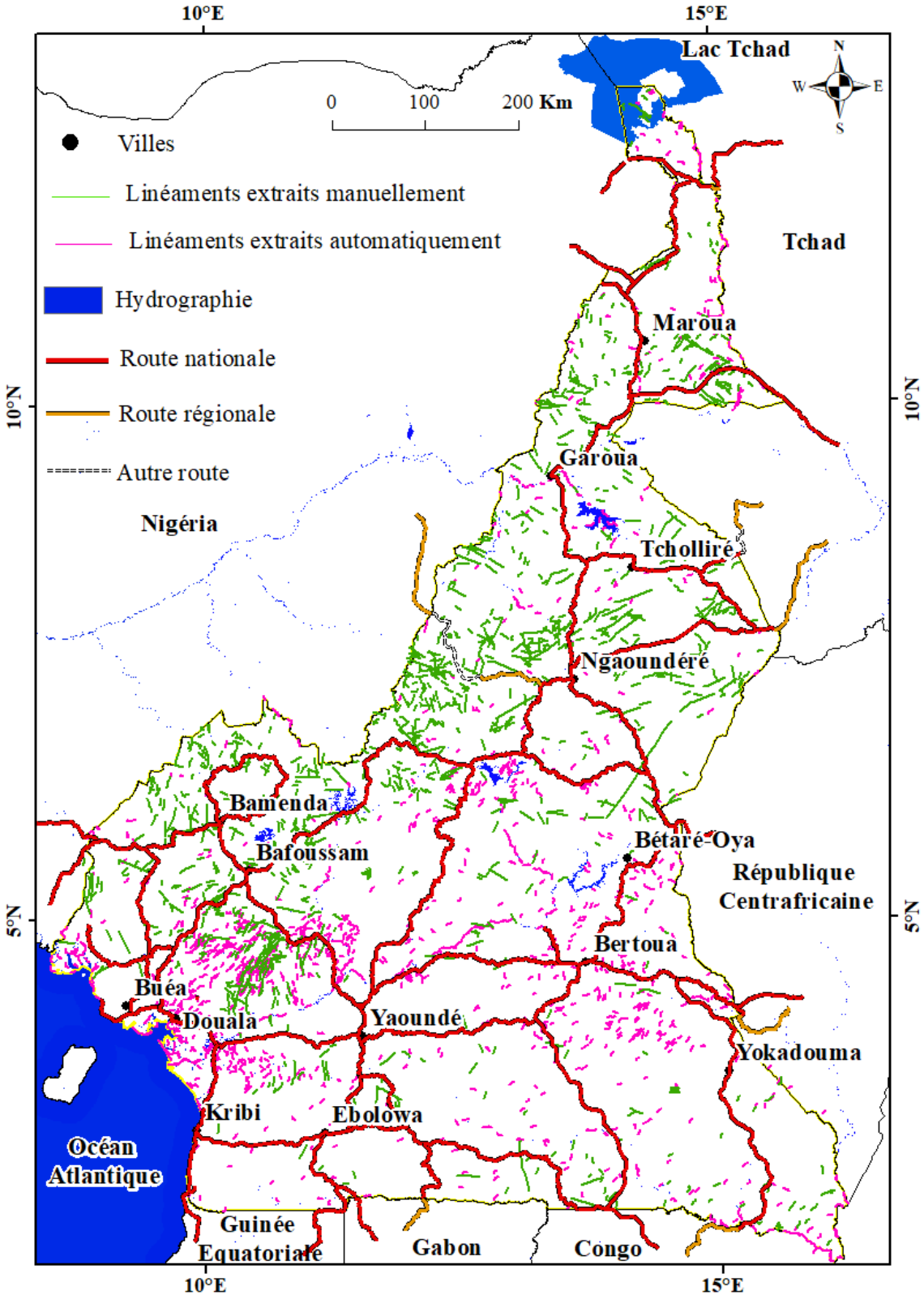


Figure 3.3 Carte des linéaments extraits à partir des images Landsat 8.

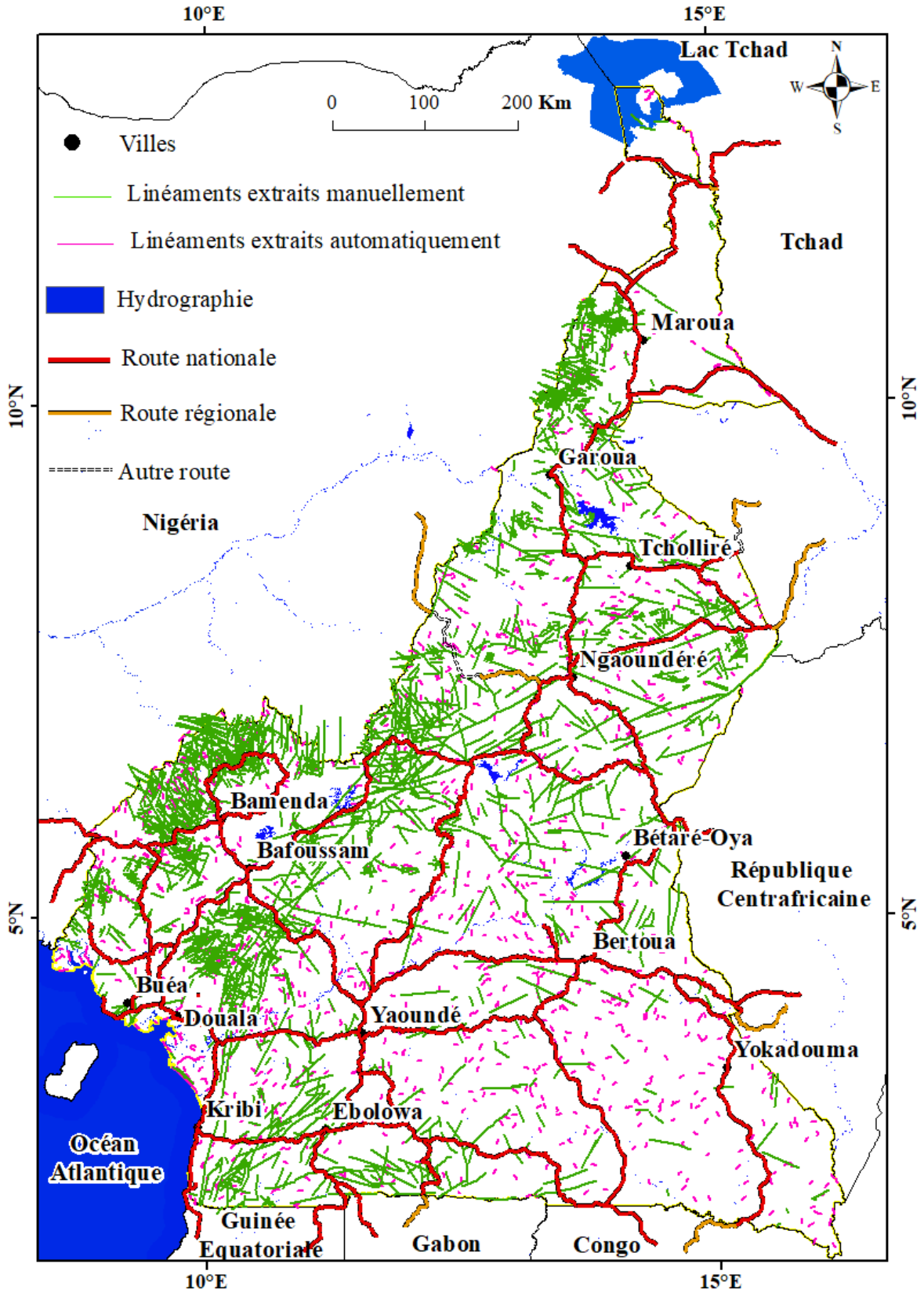


Figure 3.4 Carte des linéaments extraits à partir des images SRTM.

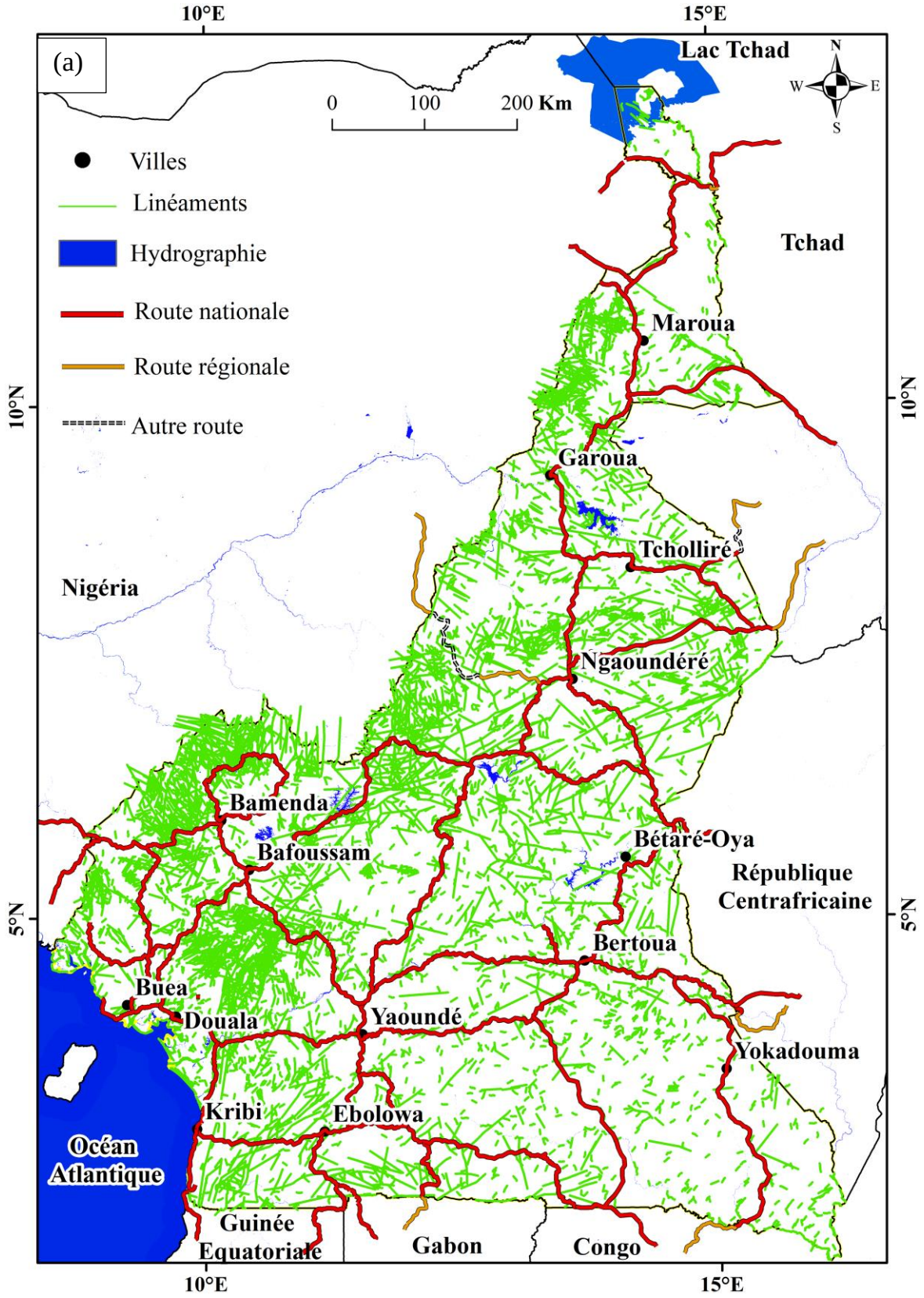


Figure 3.5 (a) Carte de linéaments.

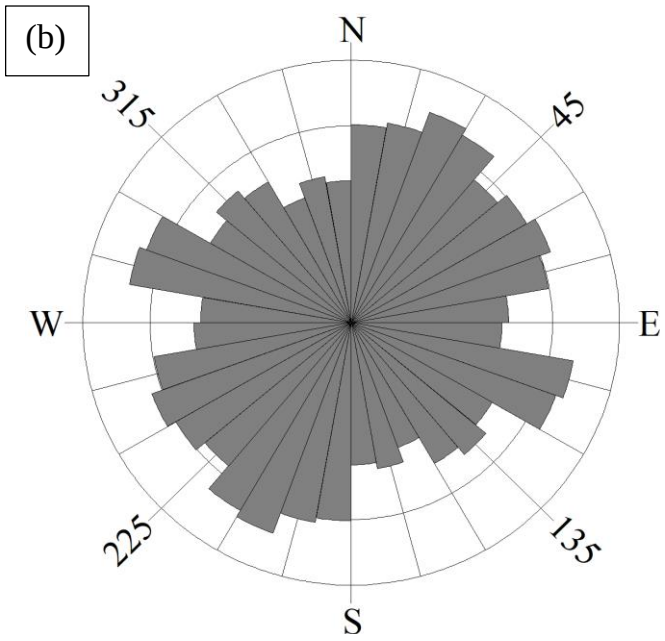


Figure 3.5 (b) Rosace directionnelle des linéaments en fonction de la longueur.

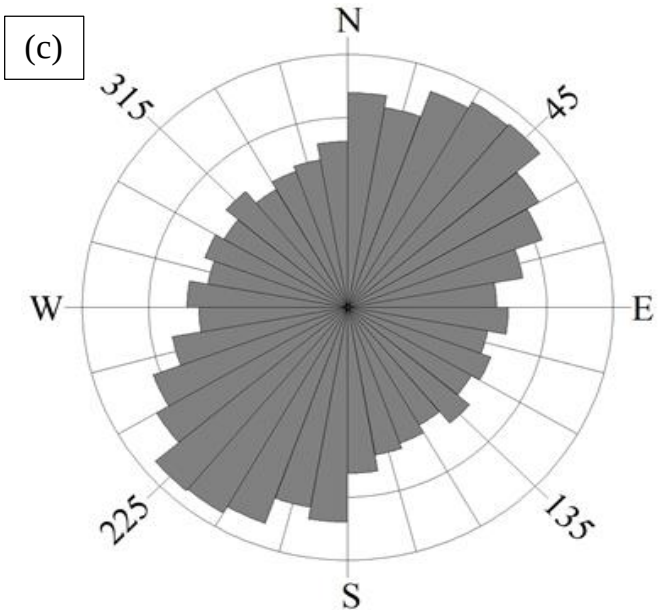


Figure 3.5 (c) Rosace directionnelle des linéaments en fonction de la fréquence.

La rosace directionnelle obtenue en fonction de la longueur des linéaments, montre une prédominance des classes de direction N20-N30, N100-N110, N30-N40 et N110-N120 (Figure 3.5 b). La direction N20-N30 serait donc la direction principale des

déformations, et la direction N110-N120 qui lui est perpendiculaire serait la direction des contraintes majeures.

La rosace directionnelle obtenue en fonction du plus grand nombre de linéaments montre une prédominance des classes de direction N40-N50, N30-N40, N20-N30 et N0-N10 (figure 3.5 c).

Tableau 3.2 Statistiques de base des linéaments extraits.

Critère	Valeur
Nombre	5222
Minimum	5 km
Maximum	356 km
Somme	61896 km
Moyenne	12 km
Ecart type	14 km

Densité des linéaments

La carte de densité de linéaments (Figure 3.6) présente 3 classes de densité, la première allant de 0 à 27,66 km/km^2, la deuxième allant de 27,66 à 55,32 km/km^2 et la troisième allant de 55,32 à 82,99 km/km^2. Sur cette carte, on observe de fortes valeurs de densité dans les parties nord, ouest et sud-est de la zone d'étude traduisant leur très grande fragmentation.

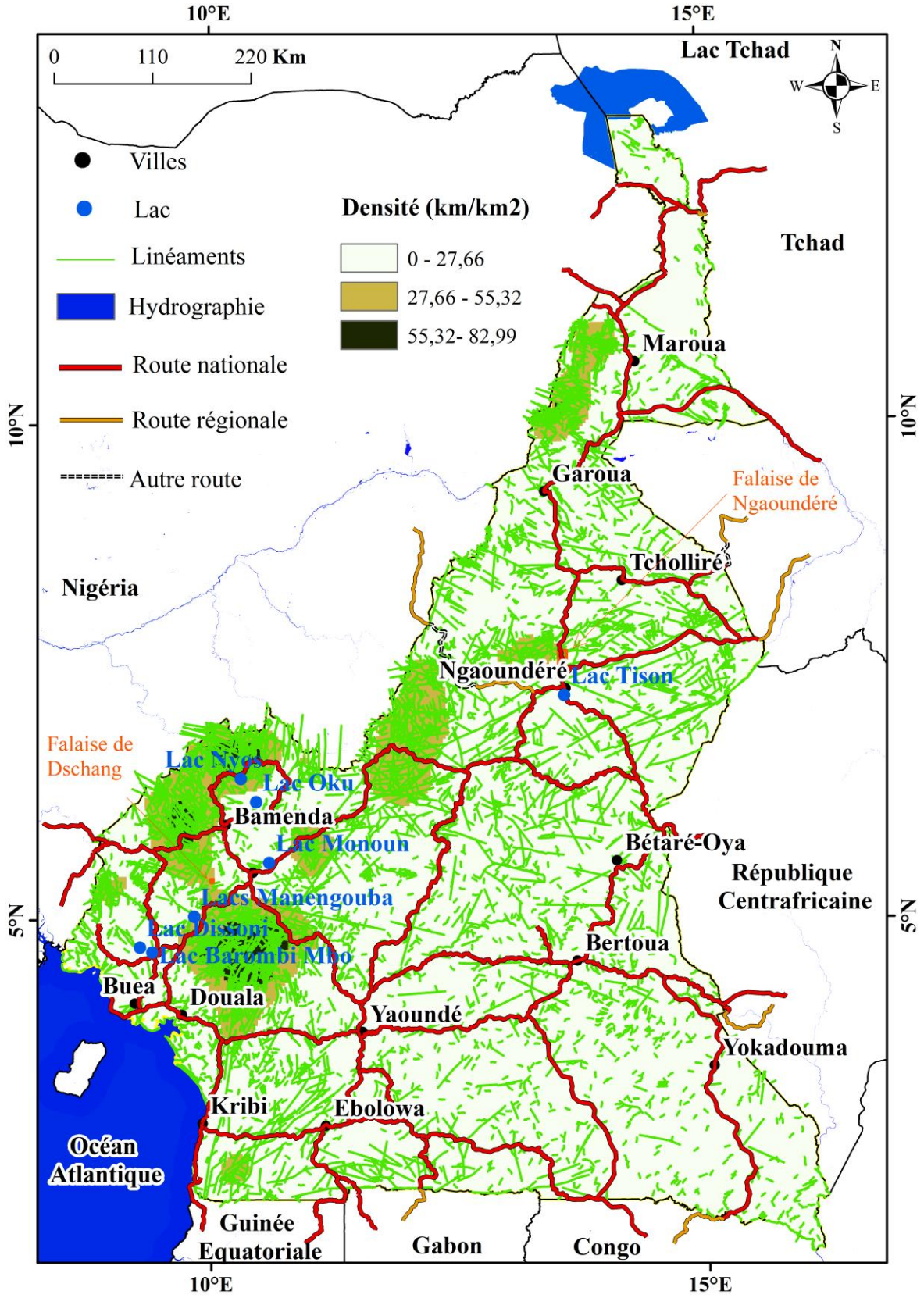


Figure 3.6 Carte de densité des linéaments.

Pente

La carte des pentes (Figure 3.7), dérivant du modèle numérique de terrain (MNT) exprime le changement d'élévation où les valeurs élevées correspondent à des pentes raides et les valeurs faibles à des zones planes. Les valeurs élevées de la pente correspondent à des changements brusques et inégaux et sont souvent des indicateurs clés de la présence des linéaments (Li, 2010 ; Nkono et al., 2013). La carte des pentes obtenue présente 3 différentes classes, les classes de faible pente variant de 0 à 6,27 ; de pente moyenne allant de 6,27 à 16,73 et de pente élevée allant de 16,73 à 76,21.

Les zones de forte pente élevée sont concentrées à l'ouest de la zone d'étude (Bafoussam, Bamenda, Buéa), un peu au Nord (Maroua, Ngaoundéré) et au Sud-Ouest (Ebolowa, Yaoundé). Les zones de pentes moyennes se retrouvent plus au Sud et à l'Est (Bertoua, Yokadouma) et les zones de faible pente au Centre, au Nord et à l'Est (Garoua).

3.1.4 Production de la carte de localisation des matériaux locaux

Les images SRTM présentées plus haut ont été utilisées en vue de localiser les réservoirs de matériaux locaux généralement utilisés dans la construction d'infrastructures routières. A cet effet, les cartes de courbes de niveau (Figure 3.8) ainsi que d'altitude (Figure 3.9) ont été établies en vue d'identifier les zones de montagnes. Par la suite elles ont été corrélées aux cartes géologiques et pédologiques pour déterminer leur nature.

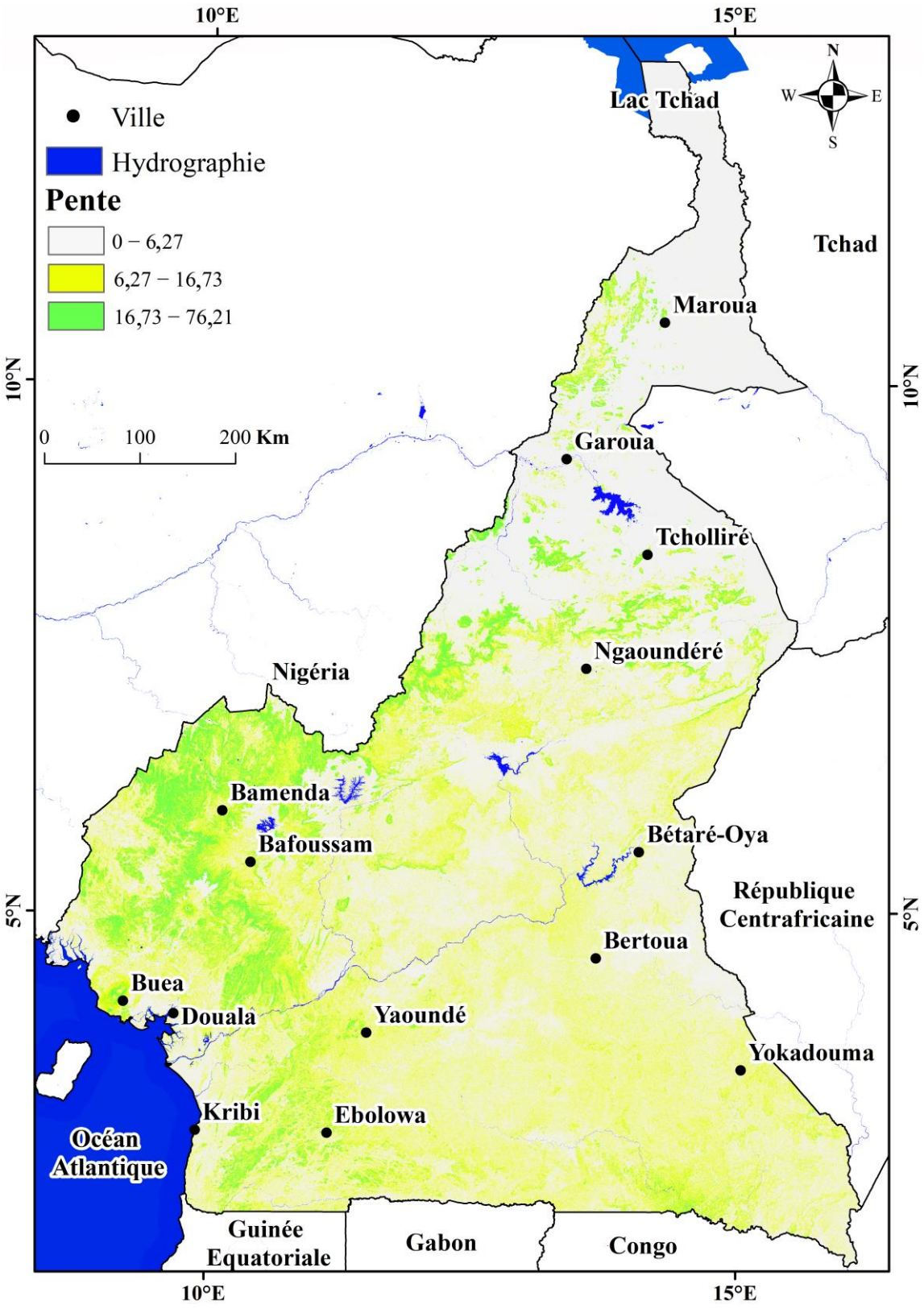


Figure 3.7 Carte de pentes.

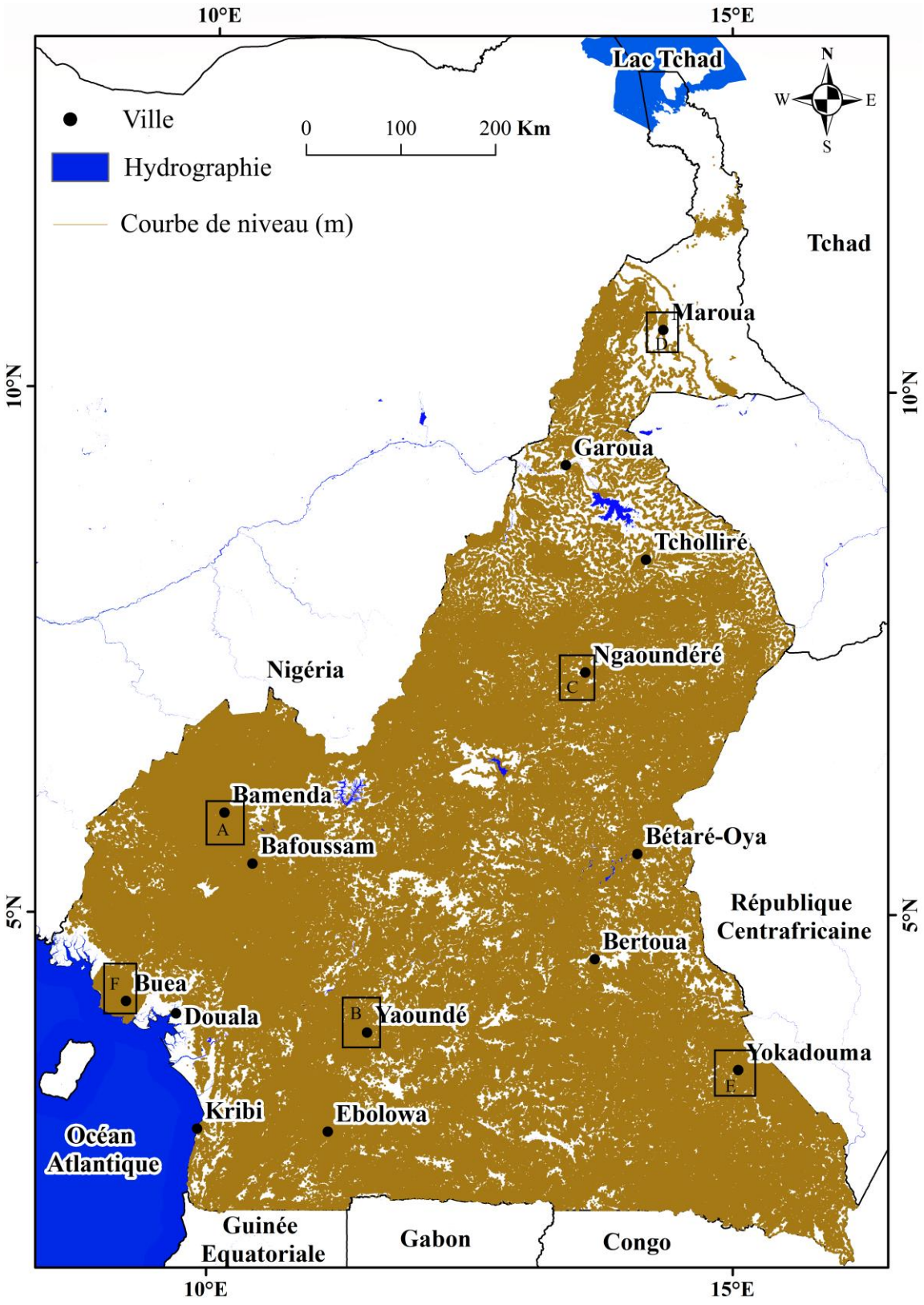


Figure 3.8 Carte des courbes de niveau.

Figure 3.8 Carte des courbes de niveau agrandie par secteur : (A) secteur de Bamenda, (B) secteur de Yaoundé, (C) secteur de Ngaoundéré, (D) secteur de Maroua.

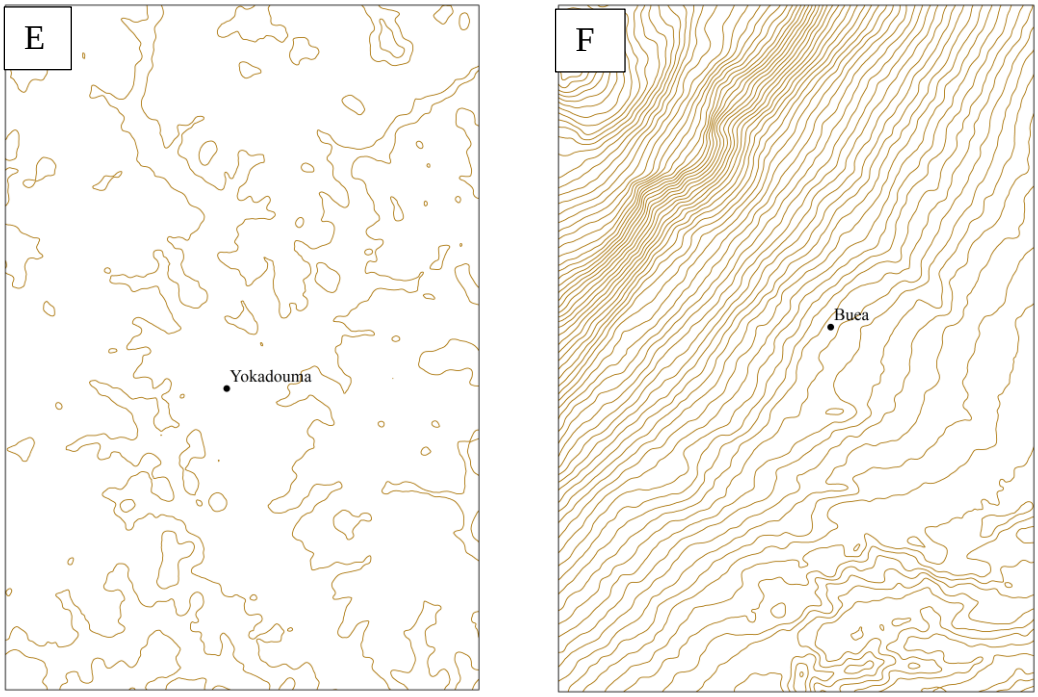


Figure 3.8 Carte des courbes de niveau agrandie par secteur : (E) secteur de Yokadouma, (F) secteur de Buéa.

Courbes de niveau

Sur la figure 3.8, les zones où les lignes sont resserrées indiquent des régions montagneuses, tandis que celles où elles sont espacées indiquent les zones de plaines.

Altimétrie

La carte altimétrique (Figure 3.9) obtenue à partir du modèle numérique de terrain (MNT) se décline en 3 classes notamment les classes de basses altitudes comprises entre -28 et 490 m dans les régions côtières et de l'Extrême-Nord, d'altitudes moyennes allant de 490 à 944 m dans le Centre et le Sud, et de hautes altitudes variant de 944 à 4029 m dans les localités de Buéa, Bamenda, Bafoussam et Ngaoundéré.

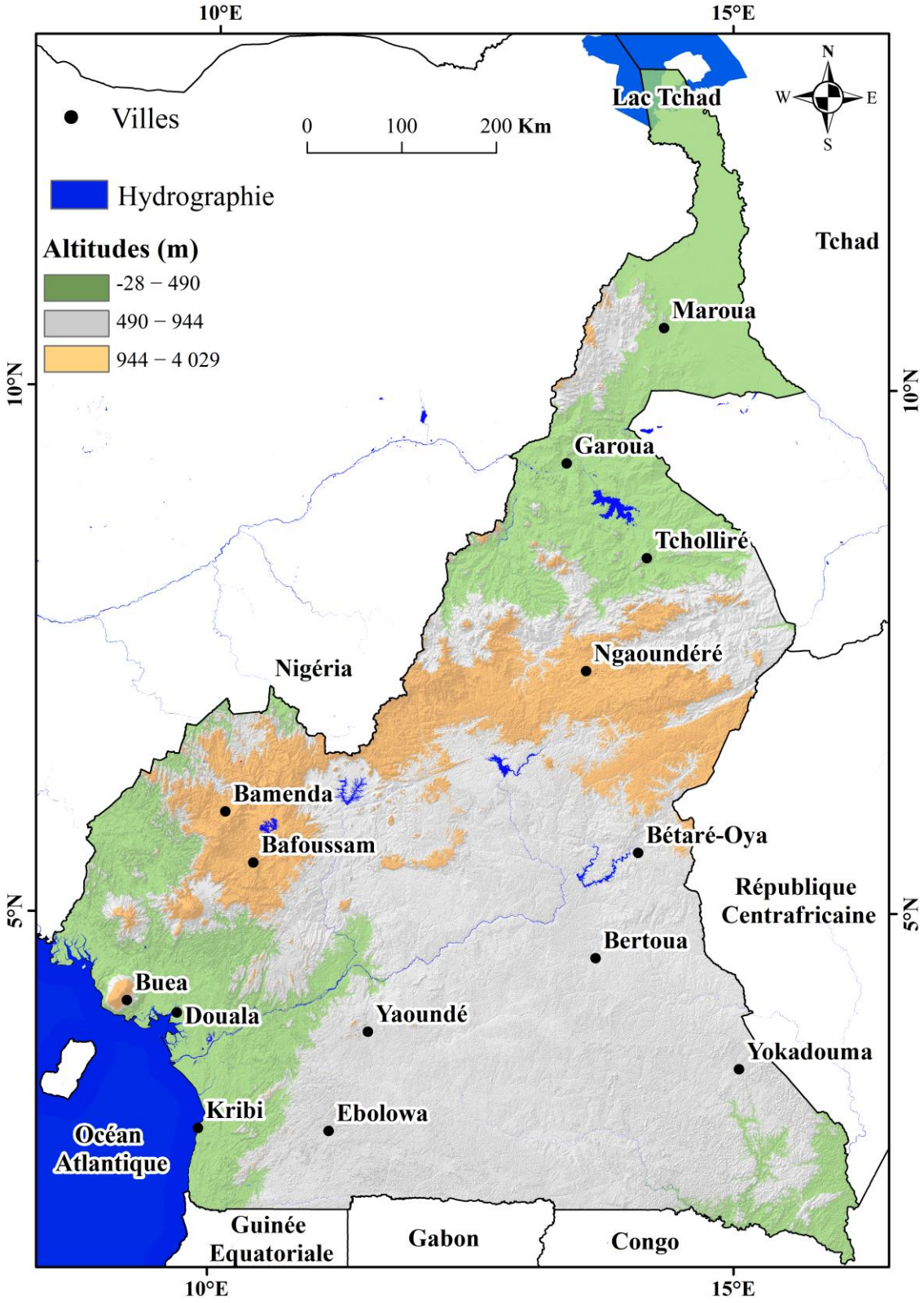


Figure 3.9 Carte altimétrique ;

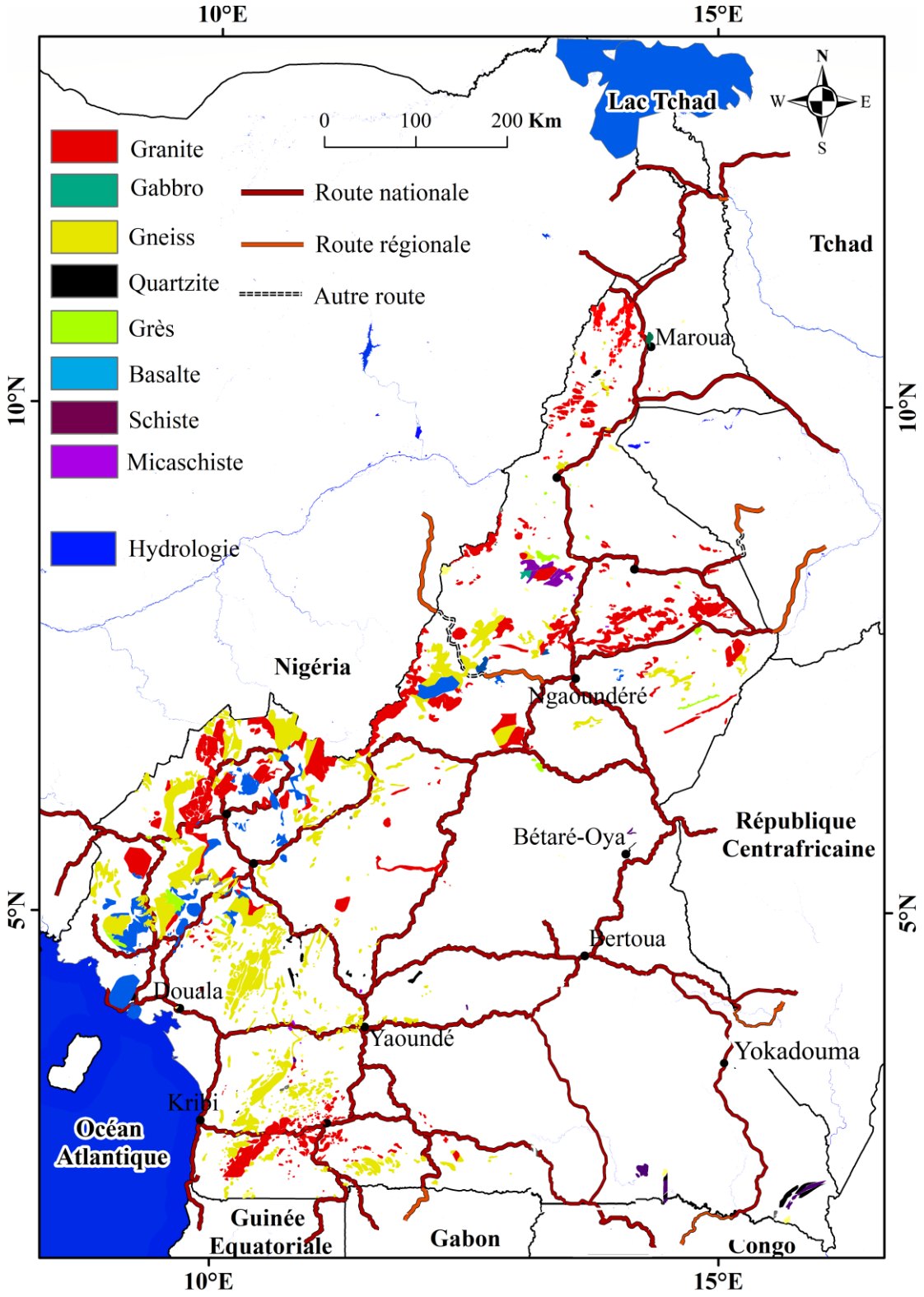


Figure 3.10 Carte des formations géologiques.

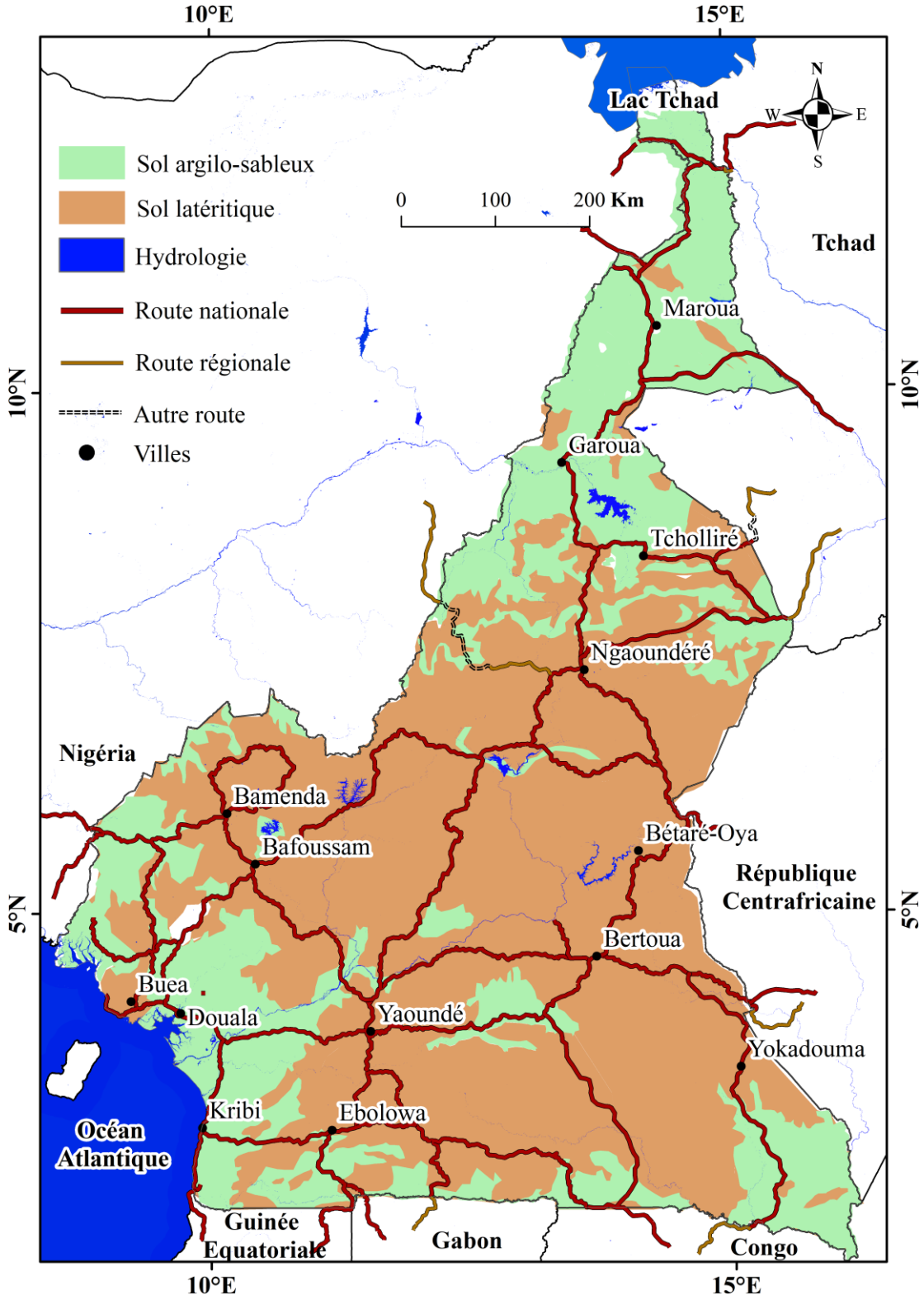


Figure 3.11 Carte des formations pédologiques.

Géolocalisation des matériaux locaux

Huit types de formations géologiques et deux types de formations pédologiques intervenant généralement dans la construction des infrastructures routières ont été cartographiés, notamment les granites, les gabbros, les gneiss, les quartzites, les grès, les basaltes, les micaschistes, les schistes (Figure 3.10), les sols latéritiques et les sols argilo-sableux (Figure 3.11). Ces matériaux se situent à au plus 50 km des routes et donc peuvent être dits locaux car non loin desdites routes, pouvant faire l'objet de réhabilitation ou de reconstruction.

3.2. Validation des résultats et discussion

3.2.1 Validation de la carte routière

Les cartes routières proposées par Mbouombouo et al., 2022 (Figure 1.12) et OpenStreetMap (Figure 1.13) présentant des manquements, cela a motivé la proposition d'une nouvelle (Figure 3.2) présentant plus de détails que ces deux précédentes, et en même temps, ressortant 100% du réseau routier illustré par ces dernières.

Première validation de la carte de linéaments

3.2.2 Corrélation de la carte de linéaments avec la carte géologique

La figure 3.12 présente les linéaments se superposant aux failles géologiques. Parmi les 20 failles de la carte géologique, 16 ont été retrouvées, représentant ainsi un pourcentage de 80%. En superposant pour une première validation le réseau de linéaments obtenu ayant plus de 5 km avec les failles connues, il apparaît quatre failles dont, F1, F9, F17 et F18 (Figure 3.12) qui n'ont pas pu être identifiées par le présent travail.

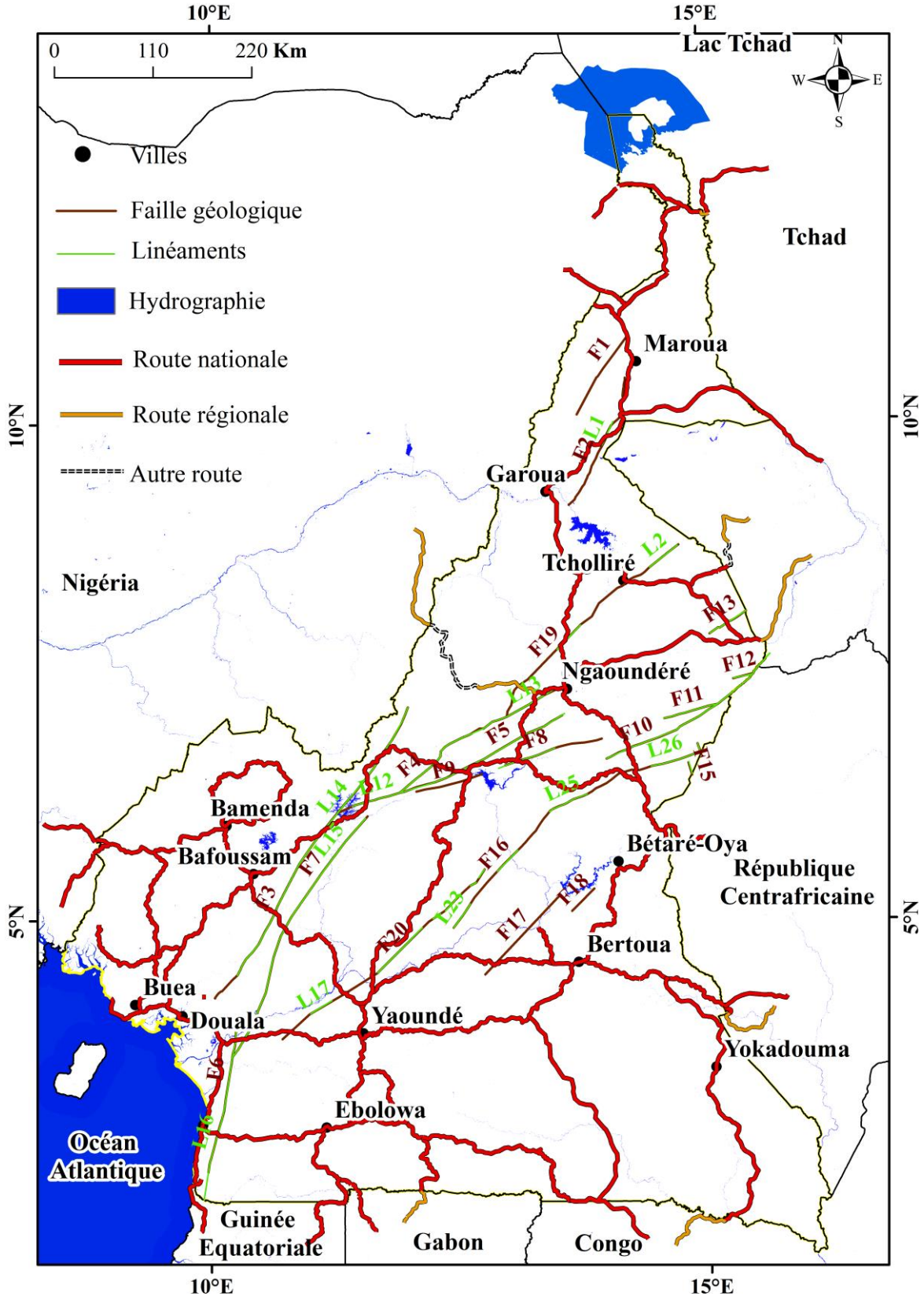


Figure 3.12 Carte de linéaments superposés aux failles géologiques.

La validation de ces failles par les campagnes de terrain n'ayant pas été possible à cause des conditions d'accès difficiles, cela a conduit à une nouvelle campagne de terrain le long de la route nationale N3 pour les valider. Le tableau 3.3 montre certains linéaments obtenus et les failles géologiques auxquelles ils correspondent et se superposent. La figure 3.5 montre que les linéaments sont très concentrés le long de la ligne volcanique du Cameroun (LVC), le long de la faille de Foumban (FF), le long de la zone de cisaillement sud camerounais (ZCSC), dans la partie Sud de la zone de cisaillement centre camerounais (ZCCC), au nord de la zone de cisaillement de Kribi-Campo (ZCKC) et dans la partie est du Craton du Congo. Dans la zone de l'extrême Nord la concentration de linéaments est faible, certainement dû à la présence de sable et des alluvions recouvrant le sol. La superposition des linéaments à la carte géologique montre que la densité de fracturation dans le craton du Congo est de 0,13 tandis que celle dans la zone mobile est de 0,14. Cela montre que le craton du Congo que l'on croyait stable semble très fracturé, surtout dans les flancs ouest et centre. On peut comprendre pourquoi les tremblements de terre (Actualités IRGM, 2019) se font ressentir dans les zones contenues dans cette unité.

Tableau 3.3 Equivalence entre les linéaments obtenus et les failles géologiques.

N^0	Linéaments	Failles géologiques	Routes correspondantes
1	/	F1	/
2	L1	F2	N1
3	L14	F3 (FF)	N4, N6
4	L13	F4	N6, N15A
5	L9, L10, L11, L12	F5 (ZCCC)	N6, N15A
6	L16	F6 (ZCKC)	N3, N17
7	L15	F7 (ZCSC)	N3, N4
8	L8	F8	N6
9	/	F9	N15
10	L6	F10	N1

11	L7	F11	/
12	L5	F12	/
13	L4	F13	N13
14	L27	F14	/
15	L28	F15	/
16	L23, L24, L25, L26	F16 (ZCM)	N1, N6
17	/	F17	N1
18	/	F18	/
19	L2, L3	F19 (ZCTB)	N1, N13
20	L17, L18, L19, L20, L21, L22	F20 (ZCS)	N3, N4, N15

3.2.3 Corrélation de la carte de linéaments avec certains travaux géophysiques antérieurs

En plus de certaines failles géologiques retrouvées, ce travail a permis de mettre en évidence, la faille annoncée par Manguellé-Dicoum et al., 1992 au niveau d'Akono-Mbalmayo mais qui jusqu'ici est restée peu connue probablement à cause des conditions d'accès particulièrement difficiles. Parmi les failles mises en évidence par Aretouyap et al., 2021, 4 d'entre elles sur les 5 confirmées et 7 sur les 8 supposées ont été retrouvées. Seules 3 des failles confirmées interceptent le réseau routier principal. En outre, les linéaments présentent une forte concentration autour des lacs Nyos et Manengouba, tel qu'observé par Gweth et al., 2021a, b.

De plus, la direction des linéaments N40-N50 mise en évidence dans ce travail, a aussi été trouvée dans les travaux de Aretouyap et al., 2021, sur la survenue des glissements de terrain dans la région de l'Ouest Cameroun, identifiant la direction N45-N50 comme orientation prédominante des linéaments. De même, l'étude menée par Cheunteu et al., 2022, sur la cartographie des linéaments tectoniques majeures traversant le Cameroun, a aussi révélé que les linéaments sont majoritairement orientés dans la direction N45. La direction N0-N10 obtenue dans cette étude, a également été identifiée par Cheunteu et al., 2022. Une autre direction N20-N30 obtenue dans ce travail, a été mise en évidence dans les travaux de Gweth et al., 2021a, sur les modèles de comparaison de fracture dans

la LVC, où les directions N20 et N30 ont été obtenues pour l'utilisation des images Landsat 8 et Landsat 7 respectivement.

3.2.4 Corrélation de la carte de linéaments avec la carte altimétrique

La corrélation entre la figure 3.4 et la figure 3.8 montre une démarcation du relief observée entre Kribi et Ebolowa correspondant à la famille de failles de la zone de cisaillement de Kribi-Campo (ZCKC) retrouvée sur la figure 1.11 et la figure 3.4. Entre Bafoussam et Bertoua, la combinaison des figures 3.4 et 3.8 montre également une famille de failles au niveau de la faille de Foumban (FF). De même, elle révèle que les falaises de Dschang et Ngaoundéré se trouvent dans des zones de hautes altitudes et de densité de fracturation élevée. Plus loin, la corrélation entre les figures 3.4 et 3.8 montre que, parmi les 376 linéaments obtenus, 256 sont des fractures, 117 des failles normales et 3 des fractures dans l'une de leurs portions et des failles normales dans leur prolongement. Les linéaments catégorisés comme des fractures peuvent entraîner des fissures le long de la route et ceux catégorisés comme des failles normales peuvent induire des affaissements et des effondrements de blocs.

Deuxième validation de la carte de linéaments

Les campagnes de terrain le long de la route nationale N3, ont montré que toutes les failles et fractures (tableau 3.3) ayant une extension longitudinale de plus de 5 km dans les régions côtières aussi bien que dans celles forestières (pour les 28 scènes utilisées avec un pourcentage de nuage de 0%, 0.31%, 3.24%, 6.02% et 46%) peuvent être cartographiés en utilisant la méthode décrite dans l'organigramme (figure 2.8).
De même, une faille trouvée sur la carte à partir de données satellitaires peut correspondre à plusieurs systèmes de failles, comme c'est le cas dans les zones FZ5N3, FZ6N3, FZ7N3 et FZ8N3 (figure 3.12, tableau 3.3). Les 03 failles F11N3, F12N3 et F13N3 (figure 3.11) décrites dans les documents géologiques (Gweth et al., 2021 a) et cartographiées dans cette étude ont été confirmées par les travaux de terrain, de même que les 26 autres nouvelles failles. De plus, les zones de fractures (20) et de pentes (18)

mises en évidence au cours de ce travail et qui n'étaient pas toutes observables dans les documents géologiques existants ont également été validées par cette étude. Cependant, la précision sur la localisation des zones de failles varie de 0 à 100 m.

Par ailleurs, l'approche utilisée dans ce travail a permis de cartographier toutes les zones autour desquelles des glissements de terrain peuvent se produire. Mais contrairement à la localisation des zones de failles, l'écart dans la localisation des zones de glissements de terrain variait de 0 à 500 m en moyenne par rapport à la route.

Les 4 failles F1, F9, F17 et F18 non retrouvées précédemment pourraient être dues au fait que leur dénivellation est inférieure à 30 m (correspondant à la résolution du MNT utilisé), ou bien il pourrait s'agir de contacts entre différentes formations géologiques, recouvertes par une couche sédimentaire. Tous ces résultats montrent que l'utilisation des données Landsat 8 et SRTM peut être efficace pour le tracé durable des routes et autoroutes en Afrique centrale et dans le monde, tout en contribuant de manière pertinente à la réduction du coût de leur construction, encore très élevé en Afrique Centrale (entre 336.944 USD et 4.930.885 USD) (www.eu-africa-infrastructure-tf.net, news.alibreville.com, www.gabonreview.com, www.investiraucameroun.com).

3.2.5 Corrélation de la carte de linéaments avec la carte de pentes

En superposant la figure 3.5a et la figure 3.7, on observe une forte concentration des linéaments qui se corrèlent avec les zones de fortes pentes telles que Kribi, Bafoussam, Bamenda et Ngaoundéré, montrant que les routes peuvent être sujettes à de nombreux phénomènes d'éboulement. Ainsi, la figure 3.5 permet de comprendre et de justifier les éboulements de terrain sur les routes nationales N1, N4, N5, N6, au niveau des localités de Kékem (Nguimbous-Kouoh et Manguelle-Dicoum, 2010 ; Pouyon et al., 2012), de Bafoussam (Aretouyap et al., 2021) à déversement du nord-est vers le sud-ouest, entre autres.

3.2.6 Corrélation de la carte de pente avec le réseau routier

L'effondrement des talus se faisant des zones de pente plus élevée vers celle de pente moins élevée : au niveau de la route nationale N17, on pourra donc avoir tendance à observer des glissements de talus du sud-ouest vers le nord-ouest. Au niveau de la route N2 allant d'Ebolowa en Guinée équatoriale, les talus auront tendance à glisser du sud-est vers le nord-ouest. Au niveau de la route N4, l'effondrement des talus pourra se faire du sud-ouest vers le nord-est. Au niveau de la route N5, les talus tendront à glisser du nord-ouest vers le sud-est comme ce fut le cas au niveau de la localité de Kékem. Au niveau de la route N8, la rupture des talus s'effectuera du sud-ouest vers le nord-est ou du nord-ouest vers le sud-est. Au niveau de la route N16, on aura tendance à observer des glissements de talus du nord vers le sud. Au niveau de la route N6 reliant Bamenda au Nigeria, on observera une tendance de glissement des talus du nord-ouest vers le sud-est. Les glissements des talus le long de la route N6 allant de Bamenda vers Bafoussam, se feront du nord-est vers le sud-ouest. Ainsi, de façon globale les accidents qui peuvent survenir sur le réseau routier dans la zone d'étude venant des pentes, sont les éboulements de blocs de terre de part et d'autre de la route. Le cas de figure où l'éboulement se fait face à la route est peu probable, étant donné que la zone d'étude comprend un nombre de tunnel négligeable.

3.2.7 Corrélation des linéaments avec le réseau routier

La superposition de la figure 3.5a et de la figure 3.2 montre que 376 linéaments de type faille ou fracture interceptent le réseau routier du Nord au Sud, et de l'Est à l'Ouest (figure 3.13 a), montrant que l'activité tectonique peut avoir des conséquences sur ce dernier. Leurs longueurs varient de 5 à 356 km avec une valeur moyenne de 28 km, et un écart type de 38 km (tableau 3.4) caractérisant une grande dispersion des longueurs. Les diagrammes de rose tracés en fonction de la longueur et la fréquence des linéaments (figure 3.13 b, c) montrent que les linéaments interférant avec le réseau routier sont majoritairement orientés dans les directions N60-N70 et N50-N60 respectivement.

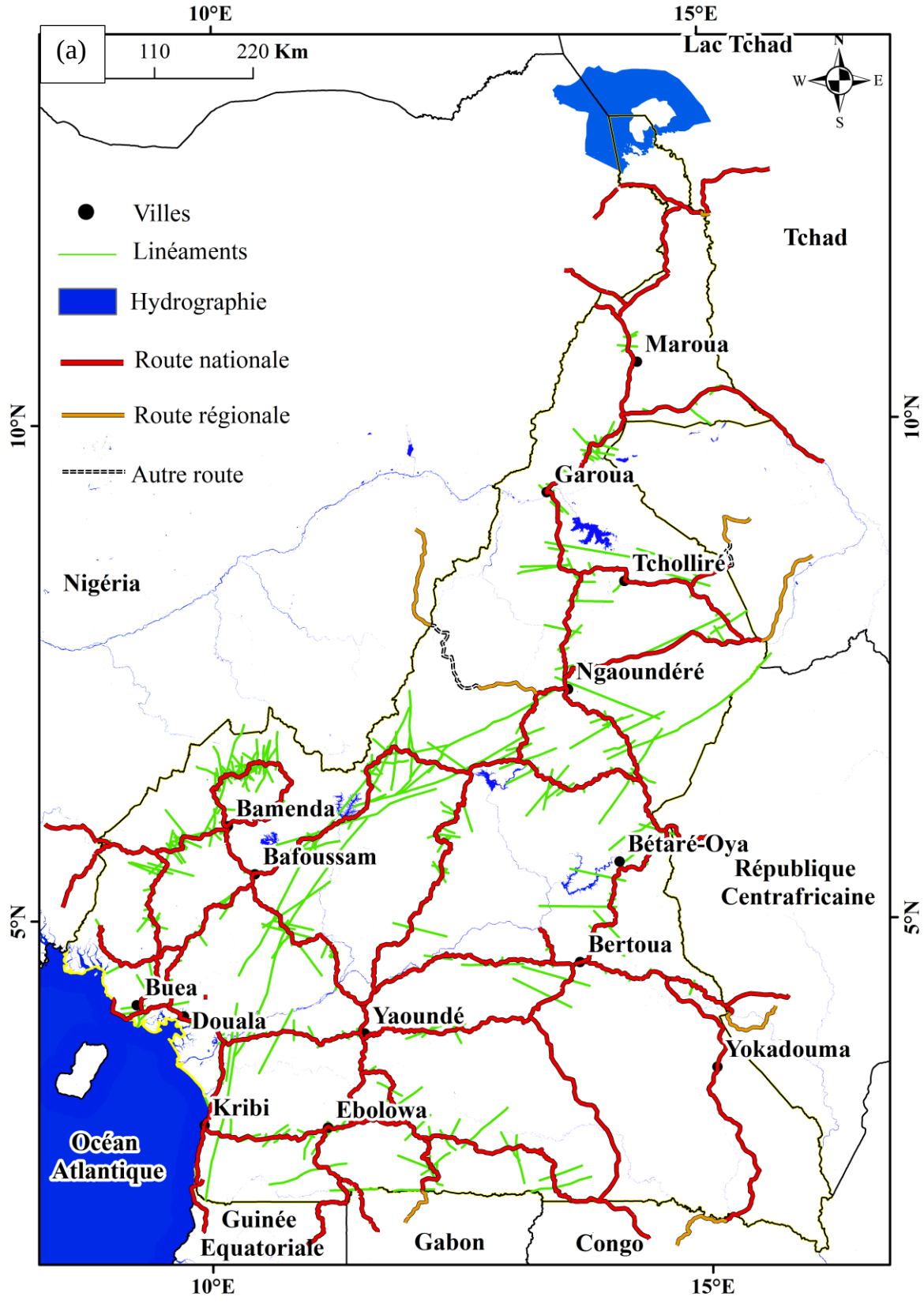


Figure 3.13 (a) Zone de faille et fracture interceptant le réseau routier.

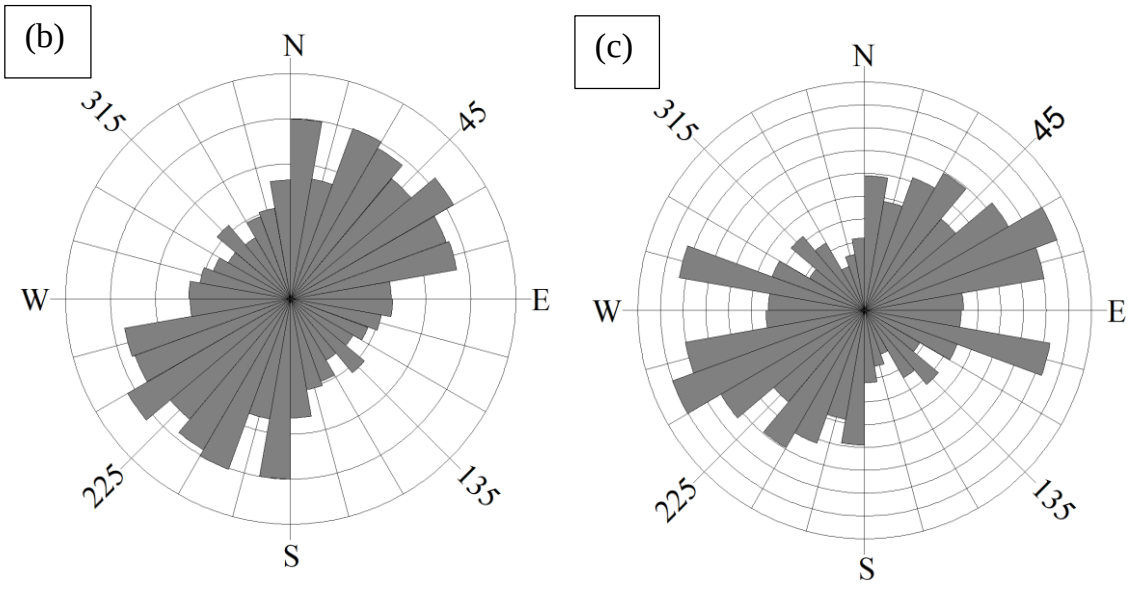


Figure 3.13 (b) Diagramme de rose en fonction de la fréquence, (c) diagramme de rose en fonction de la longueur.

Tableau 3.4 Statistiques de base des zones de faille et fracture interceptant le réseau routier.

Critère	**Valeur**
Nombre	376
Minimum	5 km
Maximum	356 km
Somme	10292 km
Moyenne	28 km
Ecart type	38 km

Parmi ces linéaments, 18 d'entre eux longent le réseau routier (à une distance inférieure ou égale à 1km), 2 s'y superposent et 2 l'interceptent.

Les résultats obtenus montrent qu'il n'y a pas seulement 14 failles (figure 3.10) qui interceptent le réseau routier, mais qu'il y en a d'autres qui ont créé et pourraient créer des cisaillements et des effondrements sur ledit réseau routier, comme présentés dans le

tableau 3.5. Ce tableau présente également les différentes formations géologiques et pédologiques que l'on peut retrouver dans un rayon de 50 km du réseau routier.

Tableau 3.5 Types d'accident pouvant survenir sur les routes étudiées, ainsi que les formations géologiques et pédologiques environnantes.

N°	**Route**	**Type d'accident**					**Formation**	
		ZPEb	**ZPEf**		**ZPCi**		**Géologique**	**Pédologique**
			Trans	**Long**	**Trans**	**Long**		
1	N1	5	7	0	65	7	Gabbro, granite, gneiss, grès, schiste, micashiste	Sols latéritiques et argilo-sableux
2	N1A	0	0	0	0	0	/	Sols argilo-sableux
3	N2	4	4	1	4	1	Gneiss, granite	Sols latéritiques et argilo-sableux
4	N2A	0	0	0	1	0	Gneiss, granite	Sols latéritiques et argilo-sableux
5	N3	18	8	1	19	1	Gneiss, schiste, micashiste,	Sols latéritiques et argilo-sableux

							basalte, quartzite	
6	N4	7	4	0	17	1	Micashiste, gneiss, quartzite, granite, basalte	Sols latéritiques et argilo-sableux
7	N5	4	8	0	6	0	Basalte, gneiss, grès, granite	Sols latéritiques et argilo-sableux
8	N6	7	23	0	56	1	Basalte, gneiss, grès, granite	Sols latéritiques et argilo-sableux
9	N6A	1	0	0	1	0	Gneiss	Sols argilo-sableux
10	N7	0	0	0	4	1	Gneiss, granite	Sols argilo-sableux
11	N8	4	7	0	13	1	Basalte, gneiss, grès, granite	Sols latéritiques et argilo-sableux
12	N9	1	7	0	10	0	Gneiss, granite	Sols latéritiques et argilo-sableux

13	N10	3	4	0	9	0	Gneiss, quartzite, schiste	Sols latéritiques et argilo-sableux
14	N11	19	17	0	25	0	Basalte, gneiss, granite	Sols latéritiques
15	N12	0	0	0	8	1	Granite	Sols argilo-sableux
16	N13	5	1	0	6	0	Granite	Sols latéritiques et argilo-sableux
17	N13A	1	0	0	3	0	Granite	Sols latéritiques
18	N14	1	0	0	1	0	Gabbro, granite	Sols sableux
19	N15	4	10	0	8	0	Granite, gneiss	Sols latéritiques et argilo-sableux
20	N15A	4	1	0	7	1	Granite, gneiss	Sols latéritiques
21	N16	7	1	0	3	0	Basalte, granite, grès	Sols sableux
22	N17	13	8	0	2	0	Gneiss, granite	Sols latéritiques

								et argilo-sableux
23	N17A	3	1	0	0	0	Gneiss, granite	Sols latéritiques
24	N17B	2	5	0	2	0	Gneiss, granite	Sols latéritique et argilo-sableux
25	N18	0	1	0	1	0	/	Sols latéritiques
Total		113	117	2	271	15	/	/

Comparée à la carte géologique (figure 1.11), cette nouvelle carte de linéaments (figure 3.5a), permet de prédire plus facilement les accidents liés à l'activité tectonique sur le réseau routier. L'analyse statistique a permis d'obtenir une valeur de corrélation (r) de 0,072, calculée à partir de la formule (3.1), témoignant ainsi de l'existence d'une corrélation entre le réseau routier et celui des linéaments dans la zone d'étude.

$$r = \frac{L_I}{L_T} \quad (3.1)$$

L_I représente le nombre de linéaments interceptant la route et L_T le nombre total de linéaments.

Ainsi, il peut être observé pour les linéaments interceptant le réseau routier, des accidents tels qu'une scission transversale, de même qu'un affaissement transversal sur la route (figures 1.9 c, d). Les linéaments se superposant au réseau routier quant à eux sont susceptibles d'entraîner une scission longitudinale et un affaissement longitudinal de la route (figures 1.9 a, b). Les linéaments longeant le réseau routier peuvent créer des accidents similaires à ceux l'interceptant.

Le tableau 3.5 montre que les routes au Cameroun peuvent faire l'objet d'éboulement, d'effondrement et de cisaillement. Ainsi, sur le corridor N1 ont été dénombrées 5 zones d'éboulement, 7 zones d'effondrement transversal, 65 zones de cisaillement transversal et 7 zones de cisaillement longitudinal possibles. Sur le corridor N1A, aucun type d'accident n'a été dénombré. Sur le corridor N2, 4 zones d'éboulement, 4 zones d'effondrement transversal, 1 zone d'effondrement longitudinal, 4 zones de cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal possibles ont été énumérées. Sur le corridor N2A, seule 1 zone de cisaillement transversal possible a été observée. Sur le corridor N3, 18 zones d'éboulement, 8 zones d'effondrement transversal, 1 zone d'effondrement longitudinal, 19 zones de cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal possibles ont été énumérées. Sur le corridor N4, ont été dénombrées 7 zones d'éboulement, 4 zones d'effondrement transversal, 17 zones de cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal possibles. Sur le corridor N5, ont été dénombrées 4 zones d'éboulement, 8 zones d'effondrement transversal et 6 zones de cisaillement transversal possibles. Sur le corridor N6, 7 zones d'éboulement, 23 zones d'effondrement transversal, 56 zones de cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal possibles ont été déterminées. Sur le corridor N6A, seules 1 zone d'éboulement et 1 zone de cisaillement transversal possibles ont été dénombrées. Sur le corridor N7, ont été énumérées 4 zones de cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal possibles. Sur le corridor N8, ont été dénombrées 4 zones d'éboulement, 7 zones d'effondrement transversal, 13 zones de cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal possibles. Sur le corridor N9, ont été observées 1 zone d'éboulement, 7 zones d'effondrement transversal et 10 zones de cisaillement transversal possibles. Sur le corridor N10, ont été dénombrées 3 zones d'éboulement, 4 zones d'effondrement transversal et 9 zones de cisaillement transversal possibles. Sur le corridor N11, 19 zones d'éboulement, 17 zones d'effondrement transversal et 25 zones de cisaillement transversal possibles ont été dénombrées. Sur le corridor N12, ont été dénombrées 8 zones de cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal possibles. Sur le corridor N13, ont été observées 5 zones d'éboulement, 1 zones d'effondrement transversal et 6 zones de cisaillement transversal possibles. Sur le corridor N13A, ont été énumérées 1 zone d'éboulement et 3 zones de cisaillement

transversal possibles. Sur le corridor N14, 1 zone d'éboulement et 1 zone de cisaillement transversal possibles ont été observées. Sur le corridor N15, ont été dénombrées 4 zones d'éboulement, 10 zones d'effondrement transversal et 8 zones de cisaillement transversal possibles. Sur le corridor N15A, ont été dénombrées 4 zones d'éboulement, 1 zone d'effondrement transversal, 7 zones de cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal possibles. Sur le corridor N16, 7 zones d'éboulement, 1 zone d'effondrement transversal et 3 zones de cisaillement transversal possibles ont été observées. Sur le corridor N17, 13 zones d'éboulement, 8 zones d'effondrement transversal et 2 zones de cisaillement transversal possibles ont été énumérées. Sur le corridor N17A, 3 zones d'éboulement et 1 zone d'effondrement transversal possibles ont été observées. Sur le corridor N17B, ont été dénombrées 2 zones d'éboulement, 5 zones d'effondrement transversal et 2 zones de cisaillement transversal possibles. Sur le corridor N18, seules 1 zone d'effondrement transversal et une zone de cisaillement transversal possibles ont été observées.

La route nationale N11 présente le plus grand nombre de zone d'éboulement possible, suivie de la route nationale N17. Celles N1A, N2A, N7, N12 et N18 n'en présentent aucune. La route nationale N6 regorge plus de zones possibles d'effondrement transversal, suivie de celle N11. Les routes N1A, N2A, N6A, N7, N12, N13A et N14 n'en regorgent aucune. Seules les routes nationales N2 et N3 présentent chacune une zone possible d'effondrement longitudinal, les autres n'en présentent aucune. La route nationale N1 présente le plus grand nombre de zone de possible cisaillement transversal, suivie de celle N6. Les routes N1A et N17A n'en présentent aucune. La route nationale N1 présente le plus grand nombre de zone de possible cisaillement longitudinal, les autres n'en présentent aucune, exceptées celles N2, N3, N4, N6, N7, N8, N12 et N15A qui en présentent une seule. En tenant compte de chaque type d'accident, il en ressort que la route nationale N6 est la plus accidentogène, suivie de celle N1.

De façon globale, le réseau routier au Cameroun peut être sujet a 113 zones de possible éboulement, 117 zones de possible effondrement transversal, 2 zones de possible effondrement longitudinal, 271 zones de possible cisaillement transversal et 15 zones de possible cisaillement longitudinal.

En revanche, les matériaux locaux cartographiés pourront être utilisés dans la réhabilitation des routes ayant subi divers accidents tectoniques. Des huit formations géologiques cartographiées, les plus abondantes sont les granites, les basaltes et les gneiss. Quant aux formations pédologiques, les plus répandues sont les sols latéritiques. Ainsi les différents matériaux qu'on peut retrouver dans le voisinage des corridors sont :
Pour la Nationale N1, on peut trouver les gabbros, les granites, les gneiss, les grès, les schistes, les micaschistes, les sols latéritiques et argilo-sableux ;
pour la Nationale N1A, les sols argilo-sableux ; pour les Nationales N2, N2A, N9, N15, N17 et N17B, les gneiss, les granites et les sols latéritiques et argilo-sableux ;
pour la Nationale N3, les gneiss, les basaltes, les micaschistes, les sols latéritiques et argilo-sableux ;
pour la Nationale N4, les micaschistes, les gneiss, les quartzites, les granites, les basaltes, les sols latéritiques et argilo-sableux ;
pour la Nationale N5, les gneiss, les basaltes, les schistes, les micaschistes, les quartzites, les sols latéritiques et argilo-sableux ;
pour la Nationale N6, les basaltes, les gneiss, les grès, les granites, les sols latéritiques et argilo-sableux ;
pour la Nationale N6A, les gneiss et les sols argilo-sableux ;
pour la Nationale N7, les gneiss, les granites et les sols argilo-sableux ;
pour la Nationale N8, les basaltes, les gneiss, les grès, les granites, les sols latéritiques et argilo-sableux ;
pour la Nationale N10, les granites, les quartzites, les schistes, les sols latéritiques et argilo-sableux ;
pour la Nationale N11, les basaltes, les gneiss, les granites et les sols latéritiques ; pour la Nationale N12, les granites et les sols argilo-sableux ;
pour la Nationale N13, les granites et les sols latéritiques et argilo-sableux ; pour la Nationale N13A, les sols latéritiques ;
pour la Nationale N14, les gabbros, les granites et les sols argilo-sableux ; pour la Nationale N15A, les granite, les gneiss et les sols latéritiques ;
pour la Nationale N16, les basaltes, les granites, les grès et les sols argilo-sableux ;

pour la Nationale N17A, les gneiss, les granites et les sols latéritiques ; pour la Nationale N18, les sols latéritiques.

Conclusion

Ce chapitre a présenté les différents résultats obtenus dans ce travail ainsi qu'une discussion y afférente. La carte routière de la zone a été établie, de même que celle des linéaments. Une corrélation entre ces deux cartes a été faite afin de voir les linéaments interceptant le réseau routier, et par conséquent de mettre en évidence les accidents tectoniques qu'il peut subir. Une carte des matériaux locaux utilisés dans la construction des ouvrages d'art notamment les routes a également été établie en vue d'avoir leur localisation pour leur exploitation dans des projets de construction ou de réhabilitation de ces ouvrages routiers.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

CONCLUSION GENERALE

Il était question dans cette étude d'une part, d'élaborer un algorithme permettant un géoréférencement du réseau routier, une cartographie des accidents tectoniques et des matériaux locaux pouvant servir à leur construction et réaménagement dans un contexte équatorial et côtier caractérisé par un niveau élevé de nuages, et d'autre part de l'évaluer et de le valider sur la Nationale N3 notamment entre les villes de Douala-Yaoundé, puis de l'utiliser pour le géoréférencement, la cartographie des accidents tectoniques et des matériaux locaux dans une proximité de 50 km pouvant servir à la construction et la réhabilitation du principal réseau routier national. A cet effet, les techniques de la géomatique, de la cartographie in situ et télédétectée associées aux SIG, ont été utilisées. Pour atteindre ces objectifs, il a été judicieux de connaître de prime abord ce que c'est qu'un ouvrage d'art, de connaître ses différents types, ainsi que les dégâts que ces derniers peuvent subir. Les ouvrages d'art sur lesquels l'étude s'est appesantie sont ceux de type routier.

S'agissant du premier et du second objectif, un organigramme a été proposé, et sa robustesse ainsi que sa fiabilité ont été validées sur la Nationale N3 entre les villes de Douala et Yaoundé. Un géoréférencement de cette section a été réalisé, 18 zones de possible éboulement, 8 zones de possible effondrement transversal, 1 zone de possible effondrement longitudinal, 19 zones de possible cisaillement transversal et 1 zone de cisaillement longitudinal ont été cartographiées sur cette section et sur le reste de la Nationale N3. De même les matériaux cartographiés dans les environs de cette Nationale sont les gneiss, les basaltes, les schistes, les micaschistes, les quartzites, les sols latéritiques et les sols argilo-sableux.

Quant au troisième objectif, après que la fiabilité de l'organigramme ait été validée sur la N3, une carte de tout le réseau routier mise à jour a été établie.

En ce qui concerne le quatrième objectif, les différents accidents que peut subir ce réseau routier ont été déterminés, dont 113 au total pour les éboulements, 117 pour les effondrements transversaux, 2 pour les effondrements longitudinaux, 271 pour les cisaillements transversaux et 15 pour les cisaillements longitudinaux.

Relativement au cinquième et dernier objectif, une cartographie des matériaux locaux a été réalisée et huit formations géologiques ont été recensées, à savoir les gneiss, les granites, les basaltes, les grès, les schistes, les micaschistes, les gabbros, les quartzites, de même que deux formations pédologiques dont les sols latéritiques et les sols argilo-sableux.

PERSPECTIVES

Dans les jours à venir nous envisageons de :

- ✓ Etendre l'étude à la cartographie des matériaux locaux rattachés au réseau routier et autoroutier secondaire et ceux à construire au Cameroun.
- ✓ Utiliser l'interférométrie radar pour détecter les matériaux locaux et prévoir millimétriquement les accidents pouvant survenir sur les corridors existants et ceux à construire.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abate, E. J. M., Marcel, J., Yene A. J. Q., Ahmad, D.A., Dassou, F.E., Mbossi, E. F., Mvondo, O.J. and Penaye, J., **2017**. Interpretation of gravity data derived from the Earth Gravitational Model EGM2008 in the Center-North Cameroon: structural and mining implications. Arab J Geosci 10,130.

Abdelouhed, F., Algouti, A., Mlouk, M. A. and Ifkirne, M., **2021**. Lithological mapping using Landsat 8 Oli multispectral data in Boumalne, Imider, and Sidi Ali Oubork, High Central Atlas, Morocco. E3S Web of Conferences 234, 00017. https://doi.org/10.1051/e3sconf/202123400017.

Actualités IRGM: Séisme dans Plusieurs Localités du Cameroun. 2019. Available online: https://www.irgm-cameroun.org/actualites (accessed on 15 December 2022).

Adekunle, T.O. and Odeyale, T.S., **2008**. Innovative and sustainable local material in traditional African architecture-Socio cultural dimension. Structural Analysis of Historic Construction: Preserving Safety and Significance. 113.

Adiri, Z., El Harti, A., Jellouli, A., Maacha, L. and Bachaoui, E. M., **2016**. Lithological mapping using Landsat 8 OLI and Terra ASTER multispectral data in the Bas Drâa inlier, Morocan Anti Atlas. Journal of Applied Remote Sensing 10, 016005. https://doi.org/10.1117/1.JRS.10.016005.

Agenda Culturel du Cameroun, **2021**. Le viaduc Bakwa-Supe (Kumba-Mamfe) vu de haut fait rêver. Available online : https://images.app.goo.gl/cFToSLJD9RXKLd8RA

Allala, F., **2005**. Généralités sur les ouvrages d'art. Cours d'ouvrages d'art. ENI de GABES,14p.

Amer, R., Kusky, T. and El Mezayen, A., **2012**. Remote sensing detection of gold related alteration zones in Um Rus area, Central Eastern Desert of Egypt. Advances in Space Research 49, 121-134. https://doi.org/10.1190/1.2387138.

Anaba, F., Djonthu, L.Y.S., Ndougsa-Mbarga, T., Bikoro, B-A. M., Reid, A., Djieto, L. A. E., Penaye, J., Basseka, C.A. and Tantoh, S.B., **2021**. Structural interpretation of gravity data in Garoua, North Cameroon. Arabian Journal of Geosciences 14, 2007.

Aretouyap, Z., Kemgang, F. E. G., Domra, J. K., Bisso, D. and Njandjock, P. N., **2021**. Understanding the occurrences of fault and landslide in the region of West-Cameroon using remote sensing and GIS techniques. Natural Hazards 109, 1589–1602. https://doi.org/10.1007/s11069-021-04890-8.

Bazant, Z.P. and Kaplan, M.F., **1996**. Concrete at high temperature, first ed., Longman, London, 424 p.

Binam, E. P. M., Bidjeck, L. M. B., Wambo, J. D. T., Taku, J.R.A., Betsi, T. B., Ipan, A. S., Nfada, L. T. and Dieudonné, L. B., **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. https://doi.org/10.1016/j.crte.2017.11.003.

Cadot, O., De Melo, J., Plane, P., Wagner, L. et Tesfaye, W. M., **2016**. Industrialisation et transformation structurelle : l'Afrique subsaharienne peut-elle se développer sans usines ? Revue d'économie du développement 24, 19-49.

Carte routière du Cameroun, **2023**. Available online: https://www.openstreetmap.org.

Cheunteu, C. A. F., Adiang, C. M., Pemi, M. M., Tokam, A. P. K., Nouayou, R. and Nguiya, S., **2022**. Mapping of major tectonic lineaments across Cameroon using potential field data. Earth, Planets and Space 74,59. https://doi.org/10.1186/s40623-022-01612-7.

Colmaroute Spécialiste du Traitement Fissures de Chaussée, **2014**. Available online: https://images.app.goo.gl/25gtcYSrZkgdeSqA8.

Courier des journalistes, **2018**. Effondremant de la Route à Bifoun: Le Gouvernement se Mobilise pour Rétablir la Situation. Available online: https://courierdesjournalistes.com/societe/effondrement-de-la-rote-a-bifoun-le-gouvernement-se-mobilise.

Dejeant, F., Garnier, P. et Joffroy, T., **2021**. Matériaux locaux d'avenir : Ressources locales pour des villes et territoires durables en Afrique. Ville fontaine: CRAterre 96p. ISBN 979-10-96446-36-0.

El Houcine, E. M., **2020**. Cartographie de l'arganeraie par télédétection optique et radar à haute résolution spatio-temporelle. Etude de cas : commune rurale Smimou. Mémoire présente pour l'obtention du diplôme de Master Mécanique des Fluides et Energétique (MFE). Université Cadi Ayyad, 78p.

Fountain, D., Smith, R., Payne, T. and Limieux, J., **2005**. A helicopter time-domain EM system applied to mineral exploration: system and data. First break 23.

Gabr, S., Ghulam, A. and Kusky, T., **2010**. Detecting areas of high-potential gold mineralization using ASTER data. Ore Geology Reviews 38, 59-69. https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2010.05.007.

Gazel, J. et Guiraudie, C., **1965**. Notice Explicative sur la Région Abong-Mbang Ouest de la Carte Géologique de Reconnaissance à l'échelle du 1/500.000. Direction des Mines et Géologie, Yaoundé, 29 p. Available online :https://books.google.com/books/about/Notice_explicative_sur_la_feuille_Abong.html?id=kaAPswEACAAJ.

GéoBrétagne, 2000. Comprendre une image satellitaire - optique et radar.

Gweth, M.M.A., Ekoro, N.H., Meli'i, J.L., Gouet, D.H. and Njandjock, N.P., **2021a**. Fractures models comparison using GIS data around crater lakes in Cameroon volcanic line environment. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences 419-429.

Gweth, M.M.A., Meli'i, J.L., Oyoa, V., Ahmad, D.D., Gouet, D.H., Jean, M. and Njandjock, N.P., **2021b**. Fracture network mapping using remote sensing in three crater lakes environments of the Cameroon volcanic line (central Africa). Arabian Journal of Geosciences 14, 422.

Investir au Cameroun, **2018.** BTP : le Cameroun a bitume 395 km de routes en 2022, soit plus de 97 km en moins que prévu (officiel). Available online : https://images.app.goo.gl/Wz8i863NsjeQd8jV8

Investir au Cameroun, **2018**. L'Etat du Cameroun prononce la réception provisoire partielle du second pont sur le Wouri construit par le français Sogea Satom. Available online : https://images.app.goo.gl/xAoho8wVRuAjnffJ7

Journal de millau, **2017**.Eboulement Spectaculaire sur la Route des Gorges du Tarn. Available online:https://www.journaldemillau.fr/2017/03/08/un-eboulement-spectaculaire-sur-la-route-des-gorges-du-tarn/.

Kamto, P.G., Lemotio, W., Kamga, T. A-P. and Yap, L., **2021**. Combination of terrestrial and satellite gravity data for the characterization of the southwestern coastal region of Cameroon: appraisal for hydrocarbon exploration. International Journal of Geophysics 1-14.

Kankeu, B., Greiling, R.O., Nzenti, J.P., Ganno, S., Danguene, P.Y.E., Bassahak, J. and Hell, J.V., **2018**. Contrasting Pan-African structural styles at the NW margin of the Congo Shield in Cameroon. J. Afr. Earth Sci. 146, 28–47. https://doi.org/10. 1016/j.jafrearsci.2017.06.002.

Kenea, N., **1997**. Improved geological mapping using Landsat TM data, Southern Red Sea Hills, Sudan: PC and IHS decorrelation stretching. International Journal of Remote Sensing 18, 1233-1244. https://doi.org/10.1080/014311697218386.

Kergomard, C., **2017**. La télédétection aérospatiale : une introduction. Ecole Normale Supérieure de Paris, cours de télédétection, 74p.

La Tribune Afrique, **2020**. Cameroun: barrage de Nachtigal, un modèle de déploiement de l'énergie hydroélectrique en Afrique. Available online : https://images.app.goo.gl/Mdr64YzatpdXVhAPA

Lachaine, G., **1999**. Structures géologiques et linéaments, Beauce (Québec): apport de la télédétection, Université de Sherbrooke. Mémoire présenté pour l'obtention du grade de Maître ès sciences (M.Sc.) en géographie, cheminement télédétection, 105p.

Lerouge, C., Cocherie, A., Toteu, S.F., Penaye, J., Milesi, J.P., Tchameni, R., Nsifa, E.N., Fanning, C. M. and Deloule, 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.

Levaniemi, H., Beamish, D., Hautaniemi, H., Kurimo, M., Suppala, I., Vironmak, J., Cuss, R.J., Lahti, M. and Tartaras, E., **2009**. The jac airbone em system: Aem-05. Journal of Applied Geophysics 67, 219-233.

Li, N., **2010**. Textural and rule-based lithological classification of remote sensing data, and geological mapping in Southwestern Prieska sub-basin. Transvaal Supergroup, South Africa. lmu. 60, 237-246. https://doi.org/10.5282/edoc.11824.

Mallast, U., Gloaguen, R., Geyer, S., Rödiger, T. and Siebert, C., **2011**. Derivation of groundwater flow-paths based on semi-automatic extraction of lineaments from remote sensing data. Hydrology and Earth System Sciences 15, 2665-2678. https://doi.org/10.5194/hess-15-2665-2011.

Manguelle-Dicoum, E., Bokosah, A.S. and Kwende-Mbanwi, T.E., **1992**. Geophysical evidence for a major Precambrian schist-granite boundary in southern Cameroon. Tectonophysics 205, 437-446.

Marcel, J., Abate E. J. M., Njandjock N. P., Sanda, O. and Manguelle-Dicoum, E., **2018**. Validation of gravity data from the geopotential field model for subsurface investigation of the Cameroon Volcanic Line (Western Africa). *Earth, Planets and Space* 70,42. https://doi.org/10.1186/s40623-018-0812-x

Masoud, A. and Koike, K., **2006**. Arid land salinization detected by remotely-sensed landcover changes: A case study in the Siwa region, NW Egypt. Journal of arid environments 66, 151-167. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2005.10.011.

Mazo, J.C., **1980**. La liaison entre les granulats et la pâte de ciment hydratée. In 7eme congrès international de la chimie des ciments, rapport principal, Paris.

Mbouombouo, I. N., Meli'i, J. L., Gweth, M. M. A., Pokam, B. P. G., Koffi, Y. P., Njock, M. C., Nkoma, M. A. P. and Njandjock, P. N., **2022**. Analysis of safety factors for roads slopes in central Africa. Engineering Failure Analysis 138, 106359. https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106359.

Médiathèque. **2018**. Qu'est-ce qu'une onde électromagnétique ? Available online : https://www.cea.fr/multimedia/Pages/videos/culture-scientifique/physique-chimie/definition-onde-electromagnetique.aspx.

Muller, J.P. et Gavaud, M., **1979**. Les sols. Atlas de la République unie du Cameroun 25-27, 5p.

Mur de soutènement du monde entier, **2020**. Structurae. Available online : https://images.app.goo.gl/cb6PhSps4svetaqc9

Nachoui, M., **2021**. Présentation du Cameroun : Potentialités à rentabiliser, défis à surmonter et des ambitions à réaliser. Revue espace géographique et société Marocaine 43-44.

Nettis, A., Massimi, V., Nutricato, R., Nitti, D.O., Samarelli, S., and Uva, G., **2023.** Satellite-based interferometry for monitoring structural deformations of bridge portfolios. Autom. Constr. 147, 104707.

Ngako, V., Affaton, P. and Njonfang, E., **2008**. Pan-African tectonics in northwestern Cameroon: implication for the history of western Gondwana. Gondwana research 14, 509-522. https://doi.org/10.1016/j.gr.2008.02.002.

Nguemhe, F.S.C., Mumbfu, E.M., Nyeck, B., Tamnta, N.M., Boniface Kankeu, B, Njandjock, N.P. and Hell, V.J., **2020**. GIS-Based Spatial Analysis of Regional-Scale Structural Controls on Gold Mineralization Along the Betare-Oya Shear Zone, Eastern Cameroon. Natural Resources Research 29, 3457-3477.

Nguimbous-Kouoh, J.J. and Manguelle-Dicoum, E., **2010**. Contribution of topographic and penetrometric measurements to a site characterization, case of the Kekem landslide, National road Nº5 (western Cameroon). Earth Sci. Res. J. 14, 2.

Njanko, T., Nédélec, A. and Affaton, P., **2006**. Synkinematic high-K calc-alkaline plutons associated with the Pan-African Central Cameroon shear zone (W-Tibati area): petrology and geodynamic significance. Journal of African Earth Sciences 44, 494-510. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.016.

Njiosseu, E. L. T., Nzenti, J.-P., Njanko, T., Kapajika, B. and Nédélec, A., **2005**. New UPb zircon ages from Tonga (Cameroon): coexisting Eburnean–Transamazonian (2.1 Ga) and Pan-African (0.6 Ga) imprints. Comptes Rendus Geoscience 337, 551-562. https://doi.org/10.1016/j.crte.2005.02.005.

Nkono, C., Féménia, S. O., Lesne, A. and Mercier, J.-C., **2013**. Demaiffe, D. Fractal Analysis of lineaments in Equatorial Africa: insights on lithospheric structure. Open Journal of Geology 3. https://doi.org/10.4236/ojg.2013.33019.

Noutchogwe, C.T., Koumetio, F. and Manguelle-Dicoum, E., **2010**. Structural features of South-Adamawa (Cameroon) inferred from magnetic anomalies: Hydrogeological implications. Comptes Rendus Geosciences 342, 467-474.

Nyaban, C. E., Ndougsa-Mbarga, T., Bikoro, B-A. M., Tadjouteu, S. A. M. and Assembe, S. P., **2020**. Multi-scale analysis and 1 Modeling of aeromagnetic data over the Bétaré-Oya area in the Eastern Cameroon, for structural evidences investigations. Solid Earth Discussion 1-32.

Nzenti, J., Barbey, P., Bertrand, J. et Macaudière, J., **1994**. La chaîne panafricaine au Cameroun : cherchons suture et modèle. Abstracts 15eme RST, Nancy, Société Géologique France, édition Paris 99.

Nzenti, J., Barbey, P., Macaudier E, J. and Soba, D., **1988**. Origin and evolution of the late Precambrian high-grade Yaounde gneisses (Cameroon). Precambrian research 38, 91-109. https://doi.org/10.1016/0301-9268(88)90086-1.

Nzolang, C., Kagami, H., Nzenti, J. P. and 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 Archaean crust. Polar Geosci. 16, 196-226. https://doi.org/10.15094/00003129.

Ordener, L., **2023**. Définition de la chaussée routière. Suitedispatch. Available online: https://www.concretedispatch.eu/blog/structure-chaussee-routiere/

Palacky, G.J., **1993**. Use of airbone electromagnetic methods for resource mapping. Advances in space research 13, 5-14.

Penaye, J., Toteu, S.F., Michard, A. et Bertrand, J.M., **1989**. Dautel, D. Reliques granulitiques d'âge protérozoïque inferieur dans la zone mobile panafricaine d'Afrique Centrale au Cameroun ; géochronologie U-Pb sur Zircons. CR Acad. Sci. Paris 309, 315-318.

Pin, C. and Poidevin, J.L., **1987**. U-Pb zircon evidence for a pan-african granulite facies metamorphism in the Central African Republic. A new interpretation of the high-grade series of the northern border of the congo craton. Precambrian Res. 36, 303–312. https://doi.org/10. 1016/ 0301- 9268(87) 90027-1.

Porhel, R et Léon, A., **2014**. L'influence des corridors dans le développement régional : le cas de l'East African Community. Les cahiers d'Afrique de l'Est 17-36.

Pouclet, A., Tchameni, R., Mezger, K., Vidal, M., Nsifa, N. E. and Penaye, P., **2007**. Archaean crustal accretion at the northern border of the Congo Craton (South Cameroon). The charnockite-TTG link. Bull. Soc. Geol. Fr. 178, 3–14.

Pouyon, D. E., Ganno, S. and Tabod, C. T., **2012**. Geophysical and Geotechnical Investigations of a Landslide in Kekem Area, Western Cameroon. International Journal of Geosciences 3, 780-789. http://dx.doi.org/10.4236/ijg.2012.34079.

Saimondy actualités, **2018**. Cameroun : autoroute Yaoundé-Douala : circulation ouverte sur 60 km. Available online : https://images.app.goo.gl/5MhyVspcj9x2WTHq7

Savard, M. et Laflamme, J.F., **2004.** '' Concepts généraux de la surveillance électronique des ponts routiers au ministère des Transports du Québec [archive]'' ; Exposé fait au Congrès annuel de 2004 de l'Association des Transports du Canada à Québec (Québec)|PDF 23 pages.

Shang, C. K., Satir, M. and Siebel, W., **2004**. TTG magmatism in the Congo craton; a view from major and trace element geochemistry, Rb-Sr and Sm-Nd systematic: case of Sangmelima region, Ntem complex, southern Cameroon. Journal of African Earth Sciences 40, 61-79.

Shang, C. K., Satir, M., Nsifa, E. N., Liegeois, J. P., Siebel, W. and 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. Int. J. Earth Sci. 96, 817–842.

Singh, k., Arya, A. K. and Agarwal, K. K., **2020**. Landslide Occurrences Along Lineaments on NH-154A, Chamba, Himachal Pradesh; Extracted from Satellite Data Landsat 8, India. Journal of the Indian Society of Remote Sensing 48**,** 791-803.

Som, M.C.M., Basseka, C.A., Kamguia, J., Etamè, J., Njiteu, T.C.D. and Pemi M.M., **2018**. Mapping of Deep Tectonic Structures of Central and Southern Cameroon by an Interpretation of Surface and Satellite Magnetic Data. International Journal of Geophysics, 1-11.

Suzen, M. and Toprak, V., **1998**. Filtering of satellite images in geological lineament analyses: an application to a fault zone in Central Turkey. International journal of remote sensing 19, 1101-1114. https://doi.org/10.1080/014311698215621.

Takam, T., Arima, M., Kokonyangi, J., Dunkley, D. J. and Nsifa, E. N., **2009**. Paleoarchaean charnockites in the Ntem complex, Congo craton, Cameroon: insights from SHRIMP zircon U–Pb ages. J. Mineral. Petrol. Sci. 104, 1–11.

Tchameni, R., Lerouge, C., Penaye, J., Cocherie, A., Milesi, J. P., Toteu, S. F. and Nsifa, E. N., **2010**. Mineralogical constraint for metamorphic conditions in a shear zone affecting the Archean Ngoulemakong tonalite, Congo craton (southern Cameroon) and retentivity of U–Pb SHRIMP zircon dates. J. Afr. Earth Sci. 58, 67–80.

Tchameni, R., Pouclet, A., Penaye, J., Ganwa, A.A. and Toteu, S.F., **2006**. Petrography and geochemistry of the Ngaoundere Pan-African granitoids in Central North Cameroon: Implications for their sources and geological setting. J. Afr. Earth. Sci. 44, 511–529. https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11. 017.

Tchapga, N.G.M., **2019**. Microstructure et comportement thermomécanique des bétons Hydrauliques à base des rejets miniers et granulats de carrières. Thèse de doctorat/PhD, Université de Yaoundé I.

Toteu, S. F., Penaye, J. and Djomani, Y. P., **2004**. Geodynamic evolution of the Pan-African belt in central Africa with special reference to Cameroon. Canadian Journal of Earth Sciences 41, 73-85. https://doi.org/10.1139/e03-079.

Toteu, S., Michard, A., Bertrand, J. and Rocci, G., **1987**. U/Pb dating of Precambrian rocks from Northern Cameroon, orogenic evolution and chronology of the Pan-African belt of Central Africa. Precambrian Research 37, 71-87. https://doi.org/10.1016/0301-9268(87)90040-4.

Toteu, S., Van Schmus, W., Penaye, J. and 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. https://doi.org/10.1016/S0301-9268(00)00149-2.

Toteu, S.F., Van Schmus, W.R., Penaye, J. and Nyobe, J.B., **1994**. U/Pb and Sm/ Nd edvidence for Eburnian and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon. Precambrian Res. 67, 321–347. https:// doi. org/ 10. 1016/ 0301-9268(94) 90014-0.

Totouom, A., **2018**. Les obstacles au développement industriel de l'Afrique. L'Actualité économique 94, 3.

UNDRR (UN Office for Disater Risk Reduction). Sendai Framework for Disaster Risk Reduction. Available online: https://www.unisdr.org/we/coordinate/sendai-framework (accessed on 25 September 2023).

Vicat, J.-P., Pouclet, A. et Nsifa, E., **1998**. Les dolérites du groupe du Ntem (Sud Cameroun) et des régions voisines (Centrafrique, Gabon, Congo, Bas Zaïre) : Caractéristiques géochimiques et place dans l'évolution du craton du Congo au Protérozoïque. In: J. P. Vicat, and P. Bilong, Eds., Géologie et environnements au Cameroun. Collection GEOCAM: 305-324. Available online :https://www.researchgate.net/profile/Jean_Paul_Vicat/publication/281612596_Les-dolerites-du-complexe-du-Ntem-Sud-Cameroun-comparaison-avec-les-dolerites-du-Nord-Ouest-du-craton-du-Congo-et-evolution-geodynamique-du-Paleoproterozoique-et-du-Neoproterozoique.pdf.

Vijayaraghavan, N. and Wayal, A. S., **2013**. Effects of manufactured sand on compressive strength and workability of concrete. Int. J. Struct. & Civil Engg. Res. 2, 4.

Wheeler, J. and Cheadle, M., **2014**. Geophysics. Reference Module in Earth System and Environmental Sciences.

Yandjimain, J., Ndougsa-Mbarga, T., Meying, M., Bikoro, B-A. M., Ngoumou, P. C., Assembe, S. P., Ngoh, J.D. and Owono-Amougou, O. U. I., **2017**. Combination of Tilt-Angle and Euler Deconvolution Approaches to Determine Structural Features from Aeromagnetic Data Modeling over Akonolinga-Loum Area (Centre-East, Cameroon). International Journal of Geosciences 8, 925-947.

PUBLICATION ISSUE DES TRAVAUX DE THESE

Tchato, S.C.; *Gounou Pokam, B.P.; Ariane Gweth, M.M.; Kayo Pokam, E.F.; Pouth Nkoma, A.M.; Mbouombouo Ngapouth, I.; Poufone Koffi, Y.; Manguelle-Dicoum,E.; Njandjock Nouck, P. Possible Influence of Brittle Tectonics on the Main Road Network Built in the Central African Environment Using Remote Sensing and GIS. Sustainability 2023, 15, 15551. https://doi.org/10.3390/ su152115551. IF: 4.39*