

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

*Paix – Travail – Patrie*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

FACULTE DES SCIENCES

\*\*\*\*\*

CENTRE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE EN  
SCIENCES, TECHNOLOGIE ET  
GEOSCIENCES

\*\*\*\*\*

UNITE DE RECHERCHE ET DE  
FORMATION DOCTORALE PHYSIQUE  
ET APPLICATIONS

\*\*\*\*\*

B.P. 812 Yaoundé

Email: crfd\_stg@uy1.uninet.cm



REPUBLIC OF CAMEROON

*Peace – Work – Fatherland*

\*\*\*\*\*

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

\*\*\*\*\*

FACULTY OF SCIENCE

\*\*\*\*\*

POSTGRADUATE SCHOOL OF  
SCIENCE, TECHNOLOGY AND  
GEOSCIENCES

\*\*\*\*\*

RESEARCH AND POSTGRADUATE  
TRAINING UNIT FOR PHYSIC AND  
APPLICATIONS

\*\*\*\*\*

P.O. Box 812 Yaoundé

Email: crfd\_stg@uy1.uninet.cm

LABORATOIRE DE PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE

*LABORATORY OF PHYSICS OF EARTH'S ENVIRONMENT*

MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN ET APPLICATION  
DANS LA RECHERCHE DE LA CASSITERITE DANS LE  
MAYO-DARLE (ADAMAOUA-CAMEROUN)

*Mémoire présenté en vue de l'obtention du diplôme de Master of Sciences en Physique*

Option : Géophysique et Géoexploration

Par :

ANDRE MARIE MBASSI OMBE

*Licencié en Physique*

Matricule : 16I2785

Sous la co-direction de

MANGUELLE-DICOUM Eliézer, U.Y.I

*Professeur Emérite*

GOUET HERVE Daniel, U.Ma

*Maitre de Conférences*



Année académique 2024

## DÉDICACE

*À mon défunt père Ombé Mbassi Christophe*

*À ma maman Zobo Alima Delphine*

*À mes frères et sœurs.*

*« Si l'Université n'apprend pas à un homme à concevoir sa propre pensée et à dire ce qu'il pense, elle ne lui apprend rien de première importance. Il peut amasser n'importe quelle quantité de savoir livresque ; il peut parler couramment dix-sept langues y compris l'étrusque. Mais s'il quitte l'Université sans acquérir la capacité de concevoir une opinion à lui sur la manière dont le monde évolue, et le courage de soutenir cette opinion contre vents et marées, il reste un ignoramus, même si ses titres universitaires s'emparent de la moitié des lettres de l'alphabet. »*

*Gerald W. Johnson*

## REMERCIEMENTS

L'exercice que constitue un mémoire de Master II peut laisser croire et penser à une tâche personnelle, pourtant ce travail a été mené grâce au soutien et aux encouragements de beaucoup de personnes. Qu'il nous soit permis en ce moment de leur exprimer nos remerciements.

Au DIEU Tout-Puissant pour la force, le courage, l'intelligence, la sagesse, la santé et la volonté pour achever ce travail.

Nos remerciements vont également à l'endroit des personnes ayant de loin ou de près contribué à la réalisation de ce mémoire de Master. Nous leur exprimons notre gratitude et sincère reconnaissance, notamment :

Au Pr. SOSSO Maurice Aurélien, Recteur de l'Université de Yaoundé I, qui par ses services administratifs et bienveillant a bien voulu que je sois sélectionné parmi les étudiants de Master 2 ;

Au Pr. TCHOUANKEU Jean Claude, Doyen de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, pour sa rigueur au travail et la bonne marche de notre Faculté ;

Au Pr. PEGNYEMB Dieudonné, Coordonnateur du Centre de Recherche et de Formation Doctorale en Sciences, Technologies et Géosciences ainsi que toute son équipe pour la gestion des activités académiques et la recherche au sein de l'Université de Yaoundé I ;

Au Pr. NDJAKA Jean Marie Bienvenue, Chef du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, pour ses enseignements ;

Au Pr. MANGUELLE-DICOUM Eliézer, Directeur de ce mémoire, pour sa patience, sa disponibilité, ses conseils, ses encouragements et sa rigueur scientifique ;

Au Pr. GOUET HERVE Daniel Co-Directeur de ce mémoire, pour sa disponibilité, son sens de l'écoute, sa patience et sa rigueur dans le travail ;

Au Pr. NJANDJOCK NOUCK Philippe ; Chef du Laboratoire de Géophysique et Géoexploration pour son encadrement, ses enseignements et ses multiples conseils.

À tout le personnel enseignant du Laboratoire de Géophysique et Géoexploration, particulièrement Pr. NOUAYOU Robert, Pr. ENYEGUE A NYAM Françoise, Pr. NDOUGSA MBARGA Théophile, Pr. TABOD Charles TABOD, Pr. OWONA ANGUE Marie Louise, Pr. MELI'I JORELLE LARISSA, Dr NGATCHOU, pour les conseils et tous les enseignements reçus ;

À tout le personnel enseignant et administratif du Département de physique, à l'instar de Pr. BEN-BOLIE Germain Hubert, Pr. HONA Jacques, Pr. ELIE SIMO, Pr. NANA ENGO Serge Guy, Pr. TCHAWOUA Clément.

Aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer ce travail de mémoire.

Au Dr NGEMHE Fils pour son soutien, ses conseils et encouragements.

Au Dr. YVONNE POUFONE Koffi en service à l'INC pour son soutien documentaire, son assistance, ses multiples conseils et encouragements lors des différents échanges dans ses services.

Au doctorant OHANDZA ATHANASE pour son soutien multiforme ses conseils et encouragements, son sens de l'écoute et sa disponibilité pour la bonne marche de ce travail de recherche.

Aux aînés académiques du Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, particulièrement aux doctorants FANKEM Tchoute et MELDEKE Raphaël, aux maîtres ETIENNE Mandjeck et WELBA Moïse à l'ingénieur-géomaticien TCHINDA TSOPTIE Cédric de l'EGEM de Meiganga pour leur disponibilité, soutien, conseils et encouragements durant cet exercice.

À tous mes camarades de promotion pour leur esprit d'équipe durant tout le cycle de Master.

À Mme NNANGA CELESTINE Anastasie épouse Ayissi présidente fondatrice de l'ONG OMAF avec toutes ses collaboratrices, À Mme MPON Agnès, A Mme et Mr SANDJO Astread, À Mr ESSENG TIMOTHEE, À Mr KENE PENE Ghislain, À Mr MELI Hamidou et à mon oncle NKOMO ALEXANDRE François pour leurs conseils et ses encouragements.

# TABLE DES MATIÈRES

DÉDICACE .....	i
REMERCIEMENTS .....	iii
TABLE DES MATIÈRES .....	v
LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS .....	vii
LISTE DES FIGURES .....	viii
LISTE DES TABLEAUX .....	x
RÉSUMÉ .....	xi
ABSTRACT .....	xii
INTRODUCTION GENERALE .....	1
CHAPITRE 1: GENERALITES .....	4
1.1 Revue de littérature .....	4
1.1.1 Modèle numérique de terrain .....	4
1.1.2 Généralités sur la télédétection .....	9
1.1.3 Généralités et structuration des SIG .....	14
1.1.4 Généralités sur les cassitérites .....	15
1.2 Présentation de la zone d'étude .....	18
1.2.1 Cadre géographique .....	18
1.2.2 Potentiel minier au Cameroun et au Mayo-Darlé .....	25
1.2.3 Travaux en télédétection .....	26
1.2.4 Géologie .....	27
CHAPITRE 2: MATÉRIEL ET MÉTHODE .....	29
2.1 Données .....	29
2.1.1 Donnés cartographiques .....	29
2.1.2 Logiciels .....	31
2.2 Méthode .....	32
2.2.1 Prétraitements des données .....	33
2.2.2 Traitement et extraction des paramètres .....	34
2.2.3 Classification et pondération des paramètres .....	39
2.2.4 Validation .....	40
CHAPITRE 3: RESULTATS ET INTERPRETATIONS .....	44

3.1	Prétraitement des images .....	44
3.1.1	Prétraitement des image Aster .....	44
3.1.2	Prétraitement du SRTM.....	44
3.2	Traitement et extraction des paramètres .....	46
3.2.1	Extraction des paramètres morphométriques de terrain .....	46
3.2.2	Extraction des paramètres structuraux.....	50
3.3	Classification et pondération des résultats .....	61
3.4	Cartographie de la favorabilité à la cassitérite .....	63
3.5	Validation de la carte de favorabilité en cassitérite .....	64
3.6	Discussion .....	67
3.6.1	Facteurs contrôlant la potentialité.....	67
3.6.2	Apport de la télédétection et des SIG .....	68
CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES .....		71
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES .....		73

## LISTE DES SYMBOLES ET ABRÉVIATIONS

ACP : Analyse en Composantes Principales

AMC: Analyse multicritère

ASTER: Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer

C : la vitesse de propagation la lumière dans le vide ou célérité

Cm: Centimètre

DTM: digital Terrain Model

FLAASH: Fast Line of Sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercube

INC : Institut national de Cartographie

Km: Kilomètre

Km<sup>2</sup>: Kilomètre carré

MD : Mayo-Darlé

MNE : Modèle Numérique d'Élévation

MNT : Modèle numérique de terrain

O: oxygène

PCD : Projet communal de développement

REM : rayonnement électromagnétique

SIG : Système d'Information Géographique

Sn: étain

SnO<sub>2</sub>: dioxyde d'étain

SRTM: Shutter Radar Topographic Mission

USGS: United State Geological Survey

## LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1 :</b> Modèle numérique de terrain de la zone d'étude (extrait du SRTM Cameroun 2014). .....	5
<b>Figure 2 :</b> Principe de la télédétection (Centre Canadien de Télédétection ,2015) .....	10
<b>Figure 3 :</b> Représentation de l'onde électromagnétique (Born et Ronchon,1992).....	11
<b>Figure 4 :</b> Spectre électromagnétique (Bonn et Ronchon, 1992).....	12
<b>Figure 5 :</b> Signature spectrales de quelques roches et minéraux (Bonn et Ronchon ,1992). ...	13
<b>Figure 6 :</b> Grains de cassitérite: A) éclat noir ; B) éclat brun-caramel (source : wikibis.com). .....	16
<b>Figure 7 :</b> Carte de localisation de la zone d'étude et ses environs (source: fond topographique de Mayo-Banyo). .....	19
<b>Figure 8 :</b> Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gaussens (1957) appliqué aux données recueillies à la station de Ngaoundéré. ....	20
<b>Figure 9 :</b> Carte hydrographique de la zone d'étude (source :Image SRTM du Cameroun 2014). .....	21
<b>Figure 10 :</b> Carte orographique de la zone d'étude (extrait de l'image Radar SRTM Cameroun 2014). .....	23
<b>Figure 11 :</b> Vue de la végétation de la zone d'étude (source : PCD Mayo-Darlé 2021)). .....	23
<b>Figure 12 :</b> Carte géologique de la zone d'étude (source : PRECASSEM, 2021) .....	25
<b>Figure 13.</b> Digramme de la démarche utilisée pour la cartographie de la potentialité en cassitérite. ....	33
<b>Figure 14</b> .....	41
<b>Figure 15 :</b> Image ASTER 321 avant correction (A) et image ASTER 321 après correction (B) .....	44
<b>Figure 16 :</b> Correction des aberrations sur l'image SRTM. A) image avant correction ; B) image après correction. ....	45
<b>Figure 17 :</b> Carte des altitudes de la zone d'étude .....	47
<b>Figure 18 :</b> Carte de pente de la zone d'étude.....	48
<b>Figure 19 :</b> Carte de densité de drainage de la zone d'étude.....	49
<b>Figure 20 :</b> Carte de courbure-relief de la zone étudiée .....	50

<b>Figure 21:</b> Image ASTER 321 corrigée avant (A) et après (B) l'ACP .....	51
<b>Figure 22 :</b> Filtre N-S (A) ;E-W (B) ;NE-SW (C) ;NW-SE (D).....	53
<b>Figure 23 :</b> Extraction des linéaments sur les filtres NS, EW, NESW, SENW (A : extraction automatique, B : extraction automatique + manuelle).....	58
<b>Figure 24 :</b> Carte finale des linéaments de la zone d'étude et la rosace des directions .....	59
<b>Figure 25 :</b> Carte de densité de fracturation.....	60
<b>Figure 26 :</b> Pourcentage d'impact de chaque facteur.....	63
<b>Figure 27 :</b> Carte de favorabilité en cassitérite de la zone d'étude .....	64
<b>Figure 28 :</b> Carte de favorabilité en cassitérite d'un site minier dans la zone d'étude .....	65
<b>Figure 29 :</b> Graphe de la courbe de tendance des classes de sensibilité de la carte de potentialité en cassitérite .....	66
<b>Figure 30 :</b> Carte des zones potentielles minéralisées dans la zone d'étude .....	67

## LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1.</b> Relévés climatiques de la station de Ngaoundéré sur la période de 30ans (1991 - 2021).....	20
<b>Tableau 2:</b> Caractéristiques de l'image ASTER .....	31
<b>Tableau 3:</b> Codification des classes matrice (7X7) des filtres directionnels de Sobel.....	37
<b>Tableau 4:</b> Codification des classes.....	40
<b>Tableau 5 :</b> Interdépendance entre paramètres .....	61
<b>Tableau 6 :</b> Influence des paramètres vis à vis des autres .....	62

## RÉSUMÉ

La cassitérite est un minéral incontournable dans les nouvelles technologies car, elle contient l'étain qui est très utilisé dans l'industrie moderne pour la fabrication des composants électroniques des véhicules et de la robotique. Au Cameroun, la cassitérite est exploitée dans le Mayo-Darlé et la localisation de nouveaux sites potentiellement riches reste encore un véritable problème. L'objectif de ce travail est de localiser et cartographier les zones qui disposent un fort potentiel en cassitérite dans la zone d'étude. Pour se faire, les données utilisées dans le cadre de ce mémoire sont essentiellement les données cartographiques (carte topographique, carte géologique) et des images satellitaires (SRTM, ASTER) issues de la télédétection. Le modèle de prédiction utilisé est la méthode d'analyse multicritère (AMC) développée par Shaban et al. (2001). Ce modèle est basé sur l'étude des relations entre les facteurs spatiaux contrôlant la potentialité en cassitérite. Parmi ces facteurs, cinq (05) ont été retenus sur la base des travaux antérieurs : ce sont la pente, l'altitude, la densité de fracturation, la densité de drainage et la courbure du relief. L'intégration de la répartition spatiale des différents facteurs dans un SIG a permis de modéliser la distribution spatiale de la potentialité en cassitérite. L'AMC a permis, sur la base des connaissances connues, d'attribuer des poids à chaque facteur contrôlant la potentialité en cassitérite. Ces cinq classes de potentialités en cassitérite ont été identifiées en : très faibles, faibles, moyenne, fortes et très fortes. Les classes très faibles représentent 27,24% ; faibles 24,77% ; moyennes 24,26% ; fortes 18,25% et très fortes 5,47%. Les résultats obtenus ont été validés en superposant les sites potentiellement riches avec les coordonnées des sites d'exploitation en cours dans la zone d'étude. L'AMC offre une bonne précision. La carte obtenue peut aider ainsi les décideurs à choisir les sites appropriés pour la réalisation des travaux d'exploitation de la cassitérite.

**Mots clés** : Modèle Numérique de Terrain, cassitérites, Analyse multicritère, Mayo-Darlé, Adamaoua-Cameroun, télédétection, SIG.

## ABSTRACT

Cassiterite is an essential mineral for new technologies, as it contains tin, which is widely used in modern industry to manufacture electronic components for vehicles and robotics. In Cameroon, cassiterite is mined in the Mayo-Darlé region, but locating new potentially rich sites remains a real problem. The aim of this work is to locate and map areas with high cassiterite potential in the study area. To achieve this, the data used in this are essentially cartographic data (topographic map, geological map) and satellite images (SRTM, ASTER) derived from remote sensing. The prediction model use is the multicriteria (MCA) method developed by Shaban et al. (2001). This model is based on a study of the relationships between the spatial factors controlling cassiterite potentiality. Five (05) of these factors were selected on the basis previous work: slope, altitude, drainage density, fracturing density and relief curvature. Integrating the spatial distribution of the various factors into the GIS enable us to model the spatial distribution of cassiterite potential. The MCA allowed us to assign weights to each factor controlling cassiterite potentiality, based on know knowledge. Five classes of cassiterite potential have been identified: very low, low, medium, high and very high. The very weak classes represent 27.24%; weak 24.77%; average 24.26%; strong 18.25% and very strong 5.47%. The results obtained were validated by overlaying the potentially rich sites with the coordinates of current mining sites in the study area. MCA offers good accuracy. The resulting map can help decision-makers choose suitable sites for cassiterite mining operations.

**Keywords:** Digital Terrain Model, cassiterite, MCA, Mayo-Darlé, Adamaoua-Cameroon, remote sensing, GIS.

# INTRODUCTION GENERALE

## INTRODUCTION GENERALE

La cassitérite ( $\text{SnO}_2$ ) est un minerai indispensable dans les nouvelles technologies car contient l'étain qui est un métal le plus utilisé dans le secteur des composants électroniques des véhicules, la robotique ou encore des énergies renouvelables (Kibange, 2021). L'étain (Sn) arrive même à la tête des métaux incontournables pour la croissance des technologies du futur (kibange,2021). La cassitérite est extraite des gisements primaires ou des gisements de placers associés à des roches granitiques, tels que des granites et leurs équivalents volcaniques et subvolcaniques (Linnen et al., 2012 ; Tchunte et al., 2021 ; Konopelko et al., 2022). La localisation géographique de certains pays africain tels que la RCA, la RDC, le Soudan, le Nigéria et le Cameroun fait d'eux des véritables réservoirs à cassitérite (Girei et al., 2019 ; Lehmann, 2020 ; Oyediran et al., 2020). Depuis un certain temps ces pays font l'objet d'une attention particulière en raison d'une augmentation de la demande mondiale de Sn en raison de sa large gamme d'applications dans les industries électroniques pour la production d'écrans LED, de cellules solaires, de placage de fer ou d'acier et d'aimants supraconducteurs (Girei et al., 2019 ; Lehmann, 2020 ; Oyediran et al., 2020). Cependant, la minéralisation de la cassitérite au Cameroun reste inexplorée (Nwamba et al.,2023).

Le Mayo Darlé est une localité dont le revenu économique repose d'une part sur l'exploitation minière en particulier celle de la cassitérite alluviale, qui a commencée au début des années 1930 et se poursuit jusqu'à nos jours. Bien qu'elle ne soit pas réellement documentée dans la littérature scientifique elle a un intérêt croissant du fait de la forte demande mondiale de Sn. L'exploration des cassitérites connaît des difficultés dans la localité (Fulvia,2021). La localisation des gisements de cassitérite reste un véritable défi et nécessite l'utilisation des nouvelles technologies. Les travaux de cartographie au Cameroun se sont plus penchés dans la recherche des aquifères dans les localités de Batcham, les Hauts Plateaux de l'Ouest (Tchinda ,2022 ; Jofack, 2016) et la recherche de la bauxite, l'or dans les régions de l'Est et de l'Ouest-Cameroun (Bidzang et al.,2015, Mamdem,2009) utilisant la télédétection comme méthode d'acquisition des informations. La pondération et la combinaison des couches par techniques d'analyses multicritères facilitent la cartographie de potentialité en cassitérite. Dans la zone de Mayo-Darlé, aucun travail ne s'est basé sur la recherche de la cassitérite à partir du modèle numérique de terrain. L'utilisation de la télédétection et des systèmes

d'informations géographiques (SIG) devient donc incontournable. Dès lors, il sera question de faire une prospection de la cassitérite à partir du modèle numérique de terrain et des images ASTER en utilisant la méthode multicritère. Plus spécifiquement, il sera question de localiser, d'évaluer et de modéliser spatialement les zones potentiellement riches en cassitérite.

Cette étude a pour objectif principal, d'identifier les zones de fortes potentialités en cassitérites pour faciliter la gestion de la ressource en cassitérite et améliorer ses conditions d'exploitation dans la commune de Mayo-Darlé.

De façon spécifique, il s'agit de :

Déterminer les paramètres contrôlant la favorabilité en cassitérite à partir des images ASTER et SRTM ;

-Faire une spatialisation de ces paramètres géomorphologiques et structuraux à partir du traitement du SRTM et de l'image ASTER ;

-Faire une pondération des paramètres ;

- Établir la carte de favorabilité en cassitérite de la zone d'étude.

Ce mémoire se subdivise en 03 chapitres :

-Le premier chapitre porte sur les généralités. Il fait une revue de la littérature sur les termes clés, il présente également la commune de Mayo-Darlé dans son ensemble et enfin certains travaux antérieurs.

-Le deuxième chapitre quant à lui présente les données, le matériel et la méthodologie.

-Le troisième chapitre est consacré aux résultats obtenus, l'interprétation et à la discussion desdits résultats.

## CHAPITRE I : GENERALITES

# **CHAPITRE 1: GENERALITES**

## **Introduction**

Ce chapitre est consacré aux généralités. Celles-ci portent essentiellement sur la revue de la littérature, la présentation de la zone d'étude et de certains travaux antérieurs.

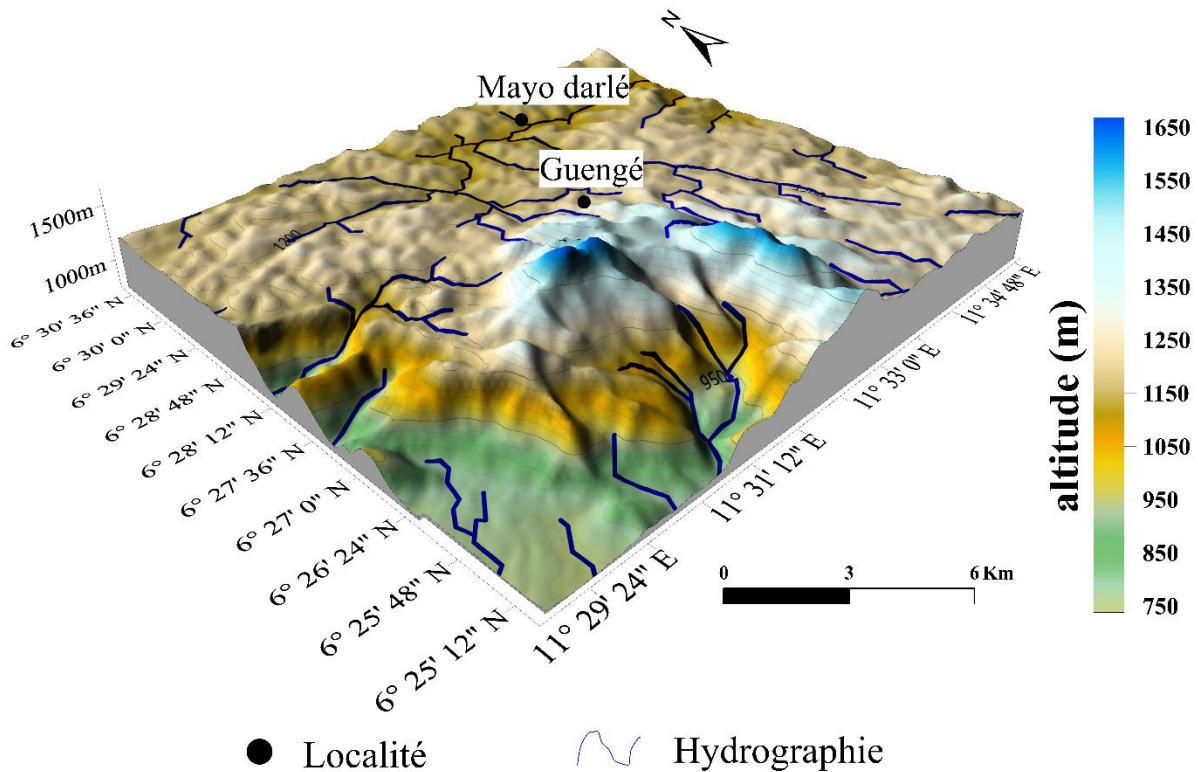
### **1.1 Revue de littérature**

#### **1.1.1 Modèle numérique de terrain**

##### **1.1.1.1 Définition**

Un modèle numérique de terrain encore appelé MNT (en anglais DTM), est une carte qui indique la forme brute du terrain à l'état naturel. Il représente aussi la donnée numérique et mathématique de l'altitude d'un point quelconque de la surface terrestre d'une zone géographique, dans un système référentiel bien défini (Puech, 2000 ; Craig, 2008).

L'ensemble des points de la carte établie, correspond à une altitude permettant de travailler sur un modèle surfacique numérique. Il donne des informations sur la pente, l'indice topographique (ou altimétrie) d'une zone géographique adaptée aux traitements informatiques (Pouderoux, 2009).



**Figure 1:** Modèle numérique de terrain de la zone d'étude (extrait du SRTM Cameroun 2014).

### 1.1.1.2 Acquisition et traitement du MNT

Le MNT peut être acquis de manière directe ou indirecte. La manière directe se fait par des capteurs de signal embarqué sur plusieurs vecteurs (avion, drone, hélicoptère, ballon, bateaux). On distingue ainsi le MNT terrestre qui fournit des informations sur la variation d'altitude à la surface terrestre et le MNT maritime qui donne les informations sur les variations du relief des fonds marins. La digitalisation des cartes existantes permet également d'obtenir des modèles numériques de terrain. La méthode directe est la collecte des données sur le terrain à l'aide du GPS, stations totales.

Pour ce qui est du MNT terrestre, l'évolution technologique a permis de développer plusieurs méthodes qui permettent de modéliser un MNT parmi lesquelles :

- **Les satellites** mesurent l'information de surface selon différents principes : les capteurs optiques mesurent le rayonnement solaire rétrodiffusé par la surface terrestre (même principe qu'une photographie) tandis que les capteurs radar émettent eux-mêmes un signal (indépendant des conditions extérieures de luminosité et atmosphériques) et enregistrent l'onde réfléchi par le sol (information de rugosité).
- **L'interférométrie** exploite la différence de phases entre deux images radar préalablement recalées et prises dans les mêmes conditions géométriques. Celle-ci informe seulement sur la distance entre le capteur et la cible aux deux instants de prise de vue. C'est pourquoi la construction du MNT requiert de connaître précisément le positionnement du capteur lors des prises de vues (Adragna, 1997).
- **La photogrammétrie** ainsi que la radargrammétrie exploitent la vision stéréoscopique d'un couple d'images optiques (numériques ou non) ou radar pour reconstituer le relief. L'information topographique (relief du terrain) est déterminée à partir du calcul de la parallaxe d'un couple de points homologues. La parallaxe représente la variation apparente de la position d'un objet résultant d'un changement du point de vue de l'observation. L'appariement des points est réalisé avec des stéréo-restituteurs analytiques ou numériques ou par corrélation automatique (Charleux-demargne, 2001 ; Dupont et al., 1998).
- **Le Lidar (Light Detection And Ranging)** mesure la distance sol/capteur via une onde électromagnétique cohérente (laser) émise dans une longueur d'onde donnée (le plus souvent l'infrarouge) et enregistrée à l'aide d'un capteur embarqué dans un vecteur aéroporté (avion, hélicoptère). Il se présente comme un système actif émetteur d'ondes laser réfléchies par les points d'impact. L'utilisation de miroirs réflecteurs permet d'orienter et de balayer le signal au sol avec une fréquence modulable (principe du laser scanning). L'altimètre laser déduit du temps de parcours du signal rétrodiffusé la distance entre la plate-forme et le point d'impact du laser.

Le Lidar, le Radar, les satellites sont des outils de la télédétection ; ce dernier fera l'objet d'un développement dans la suite de ce travail.

### 1.1.1.3 Formats du MNT

Une fois l'acquisition effectuée et les traitements appliqués afin d'extraire l'information de relief, les modèles numériques doivent être stockés dans un format facilement réutilisable par la suite au sein d'un SIG. Les formats de MNT les plus couramment employés sont : nuage ou grille de points, courbes de niveau, profils, TIN (Triangular Irregular Network), et grille régulière ou non (Mascaret, 2010).

- **Les profils :** Les modèles de profils représentent l'altitude à l'aide de points disposés le long de tracés horizontaux. L'intervalle entre deux points côtés d'un même profil est variable et peut s'adapter à la morphologie locale. La précision intrinsèque de ces modèles peut être très bonne, néanmoins dans le cas de profils successifs très distants entre eux, le relief peut être décrit de façon non homogène dans toutes ses directions. C'est le cas par exemple de certaines acquisitions avec un sondeur mono faisceau, qui donne un espacement entre profils d'environ 200m (Oliveira et al., 2006).
- **Les courbes de niveau :** Les courbes de niveaux sont des isolignes avec une altitude constante, chacune représentée par un ensemble de points qui constituent une polyligne fermée ou ouverte. On parle d'isohypse pour des courbes topographiques et d'isobathes pour des cartes marines. Ces courbes sont généralement tracées de façon à avoir le même pas d'altitude entre deux courbes successives. L'information d'altitude est présente uniquement au niveau des polygones.
- **Les nuages et grilles de points :** Les nuages de points sont la forme la plus brute d'un MNT : chaque point, disposé de façon non régulière, représente une position géographique donnée dotée d'une valeur d'altitude. Ils sont issus en général de levés topographiques ou de sondes bathymétriques. La grille de points est obtenue grâce à un rééchantillonnage à un pas régulier d'un autre modèle (nuage de points par exemple). Il s'agit d'appliquer une redistribution des valeurs régulièrement au sein du modèle en interpolant celles qui n'existent pas à partir des données d'origine. Au final, au lieu d'avoir des points avec une disposition aléatoire, chaque point sera disposé au centre d'une cellule à un intervalle constant sur tout le modèle.
- **La Grille raster :** Le format raster est un maillage (ou une grille) qui représente l'espace continu de manière discrète à l'aide d'unités de base finies, régulières, dont la

longueur est souvent égale à la largeur : les cellules. Pour les grilles régulières (coordonnées X et Y à un delta constant entre X/X+1 et Y/Y+1), l'altitude est donnée par la valeur de chaque pixel considéré.

- **Triangular Irregular Network (TIN)** : Dans ce type de modèle, la surface topographique est constituée d'une multitude de facettes triangulaires adjacentes : les facettes relient les points de référence. Elles sont de formes et de tailles variables. Cette représentation retransmet globalement une bonne idée du relief car le TIN peut être construit à partir des points caractéristiques du terrain représenté (sommets, cols, cuvettes). (Dakowicz et Gold, 2003) proposent une amélioration conséquente de ce format en réutilisant la méthode présentée par (Amenta et al., 1998) sur la squelettisation des courbes de niveau.

#### 1.1.1.4 Domaines d'applications du MNT

En ce qui concerne le MNT, il est utilisé dans plusieurs domaines dont les plus importants sont:

- **Agriculture, élevage et sylviculture** : le MNT intervient pour surveiller, estimer et planifier la production suivent les deux paramètres principaux du relief que sont la pente et l'altitude (El Hage et al., 2010).
- **En topographie** : le MNT sert à présenter les résultats d'une étude ayant pour objet les variations d'altitudes. La schématisation 3D de la surface du sol, sans construction ni végétation, aboutit à la création d'un référentiel topographique très précis (Craig, 2008).
- **En géologie minière** : le MNT permet de suivre l'évolution des zones géologiques à ciel ouvert telles que les carrières, les zones minières. L'analyse des données topographiques permet aux exploitants de calculer les volumes d'extraction (évaluation précise des cubatures) et de prévoir l'aménagement futur de ces zones (définition viable des bassins versants et réhabilitation des sites après exploitation) (Polidori, 1991).

#### 1.1.1.5 Modèle numérique de terrain et prospection minière

Le MNT est un élément clé des SIG dans la recherche minière car il offre des informations détaillées sur les conditions topographiques d'un site minier (Mamdem, 2009). Son utilisation dans la recherche minière permet de réaliser des analyses précises de

l'emplacement des minéraux d'une part et d'autre part d'estimer le volume des granulats (Noarijaona, 2010). Les données de MNT permettent aux chercheurs et géologues miniers de réaliser une cartographie des différentes formations géologiques et des minerais dans une région donnée (Saeidi et al.,2020).

## **1.1.2 Généralités sur la télédétection**

### **1.1.2.1 Définition, origine et évolution de la télédétection**

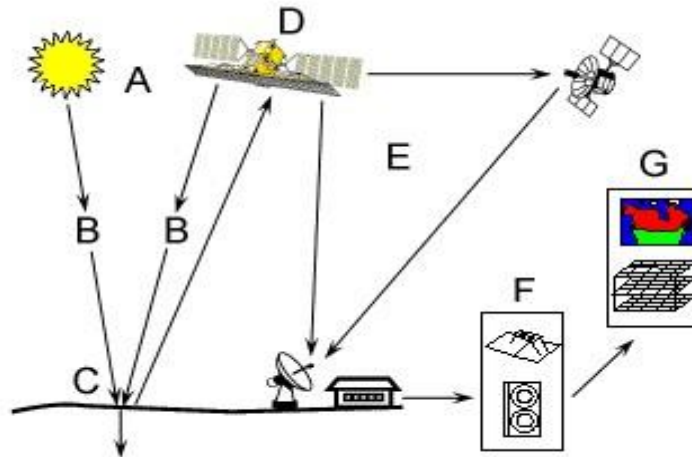
La télédétection est une technique qui permet à l'aide d'un capteur, d'observer et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique (REM), émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci (Soudani, 2005). Le traitement et l'analyse des informations véhiculées par le rayonnement enregistré permettent d'accéder à certaines propriétés de la cible : géométriques (position, forme et dimensions), optiques (réflexion, transmission, absorption, etc.) et physico-chimiques (température, teneur en eau, chlorophylle foliaire, phyto-masse, matière organique du sol).

Les linéaments sont des objets rectilignes ou curvilignes identifiables sur les images satellitaires qui traduisent des phénomènes géologiques profonds tels que les fractures, les failles. Elle est issue de deux inventions anciennes, telles que la montgolfière (1783) et la photographie (1827). Cette technique a l'avantage d'offrir une vue synoptique sur de grandes surfaces, en plus les données existantes en nombre important et sous forme numérique facilitent le stockage et permettent le croisement de plusieurs sources. À ces avantages s'ajoute l'existence d'images libres d'accès.

L'utilisation des images satellitaires peut dès lors constituer l'un des tous premiers moyens d'étude minière avant la mise en œuvre des autres méthodes telles que la prospection géophysique ou les essais de carottage pour confirmer et/ou compléter éventuellement les résultats (Ouattara, 2016).

### **1.1.2.2 Principe de base de la télédétection**

Le principe de base de la télédétection est apparenté à la notion de la vision humaine. La télédétection est le résultat de l'interaction entre trois éléments fondamentaux : la source d'énergie, la cible et le vecteur (fig.2).



**Figure 2 :** Principe de la télédétection (Centre Canadien de Télédétection ,2015)

➤ **Source d'énergie (A).**

L'origine de tout processus de télédétection se trouve nécessairement une source d'énergie pour illuminer la cible.

➤ **Rayonnement et atmosphère (B) :**

Durant son parcours entre la source d'énergie et la cible, le rayonnement interagit avec l'atmosphère. Une seconde interaction se produit lors du trajet entre la cible et le capteur.

➤ **Interaction avec la cible (C) :**

Une fois parvenue à la cible, l'énergie interagit avec la surface de celle-ci, la nature de cette interaction dépend des caractéristiques du rayonnement et des propriétés de la surface.

➤ **Enregistrement de l'énergie par le capteur (D) :**

Une fois l'énergie diffusée ou émise par la cible, elle doit être captée à distance pour être enfin enregistrée.

➤ **Transmission, réception et traitement (E) :**

L'énergie enregistrée par le capteur est transmise souvent par des moyens électroniques à une station de réception où l'information est transformée en images (numériques ou photographiques).

➤ **Interprétation et analyse (F) :**

Une interprétation visuelle et/ou numérique de l'image traitée est ensuite nécessaire pour extraire l'information que l'on désire obtenir sur la cible.

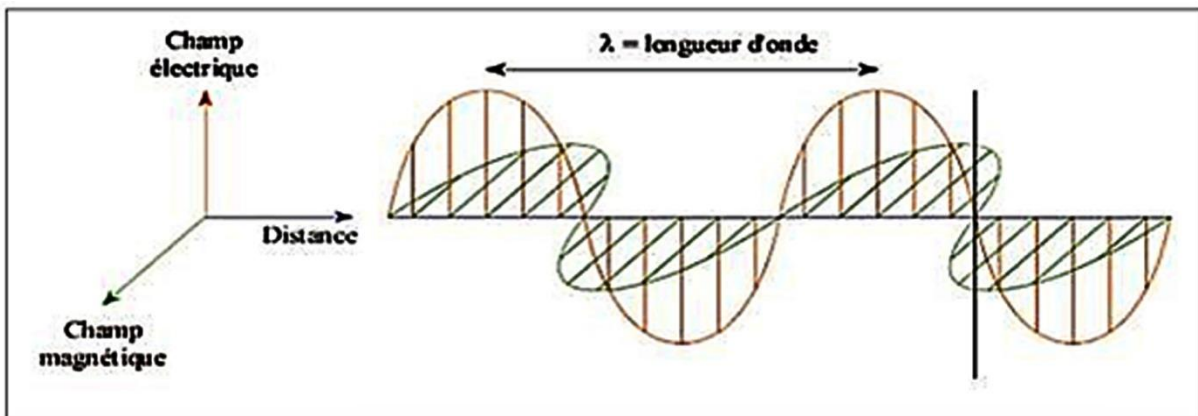
➤ **Application (G) :**

La dernière étape du processus consiste à utiliser l'information extraite de l'image pour mieux comprendre la cible, pour nous faire découvrir de nouveaux aspects ou pour aider à résoudre un problème particulier.

### 1.1.2.3 Base physique de la télédétection

#### 1.1.2.3.1 Rayonnement électromagnétique

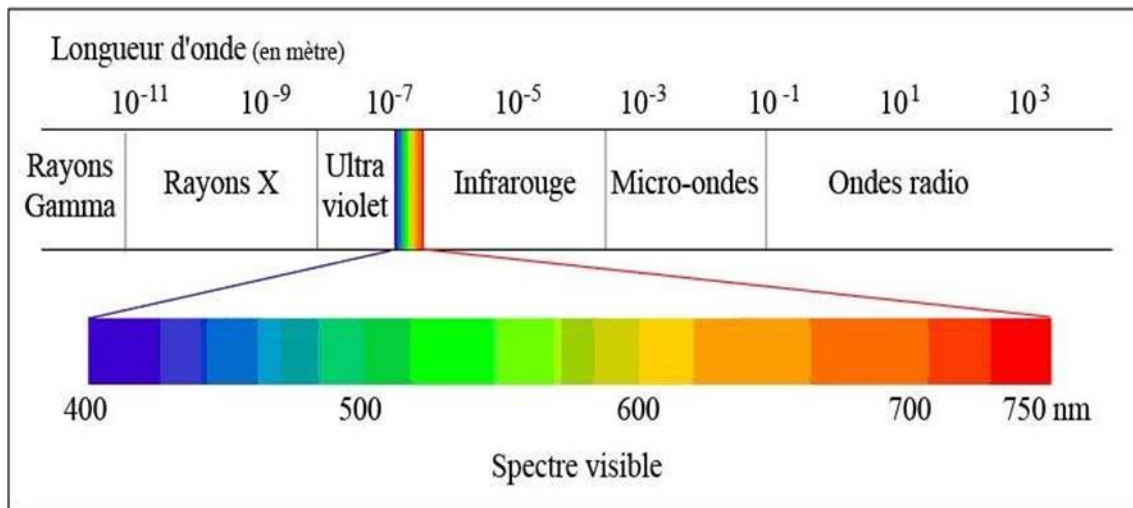
Selon la théorie corpusculaire et ondulatoire de la lumière, le rayonnement électromagnétique (REM) peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelés photons composé de deux vecteurs champ électrique et magnétique perpendiculaires et se déplaçant à la vitesse de la lumière. Deux propriétés principales caractérisent une onde électromagnétique : sa longueur d'onde et sa fréquence (fig.3).



**Figure 3 :** Représentation de l'onde électromagnétique (Born et Ronchon, 1992).

#### 1.1.2.3.2 Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est une représentation des composantes du rayonnement électromagnétique selon sa longueur d'onde sa fréquence et l'énergie de ses photons (Bonn et Ronchon, 1992). Il s'étend des courtes longueurs d'ondes (rayons gamma et rayons X) aux grandes longueurs d'ondes (micro-ondes et ondes radio) comme l'indique-la (fig.4) ci-dessous.



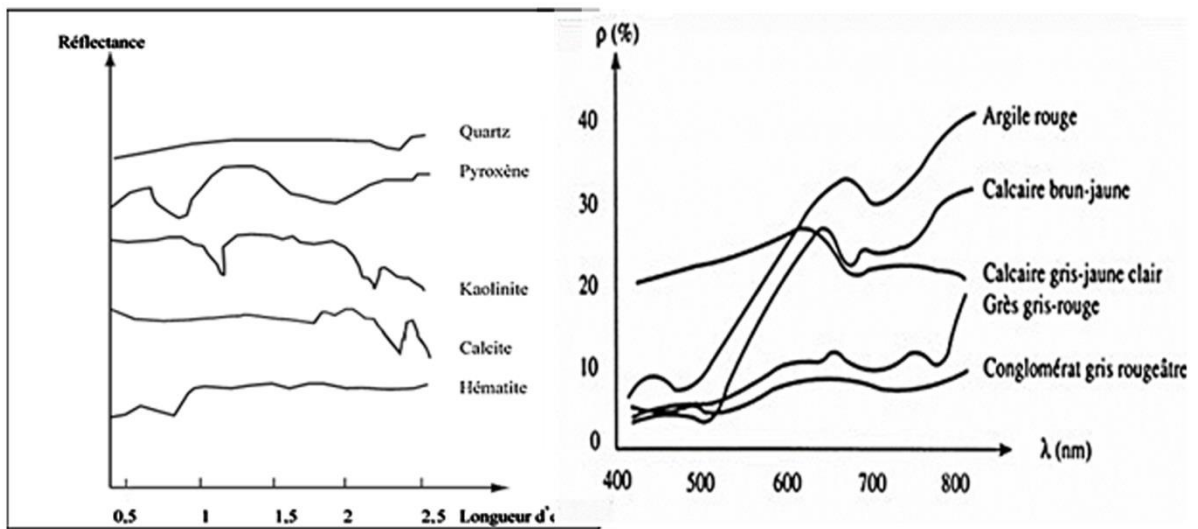
**Figure 4** : Spectre électromagnétique (Bonn et Ronchon, 1992)

En télédétection, les capteurs embarqués sur les satellites et avions mesurent la quantité de REM renvoyée par une portion d'espace terrestre. Mais seuls les capteurs présents sur les satellites peuvent enregistrer les ultraviolets (rares), le visible, le proche-infrarouge, l'infrarouge moyen, l'infrarouge thermique, l'infrarouge lointain et les hyperfréquences.

### 1.1.2.3.3 Signatures spectrales

En mesurant l'énergie réfléchie ou émise par la cible avec une variété de longueurs d'ondes, nous pouvons construire la signature spectrale pour un objet. Les signatures spectrales sont donc la réponse radiométrique des objets dans une succession de longueurs d'ondes (fig.5). Elles sont représentées par des courbes comportant la réflectance en ordonnée et la longueur d'onde en abscisse :

- La structure des minéraux est telle qu'il existe de nombreuses bandes d'absorption dues aux transitions électroniques et aux vibrations moléculaires.
- La réflectance des roches dépend de leur composition physico-chimique mais également de leur degré d'altération. La signature spectrale d'une roche n'est donc pas uniquement une combinaison de signatures spectrales des minéraux qui la compose.



**Figure 5** : Signature spectrales de quelques roches et minéraux (Bonn et Ronchon ,1992).

#### 1.1.2.4 Télédétection et prospection minière

La télédétection est un outil indirect de prospection de la surface terrestre. Elle est très performante surtout dans des applications liées au domaine de la géologie notamment la cartographie géologique, l'exploration pétrolière et minière. Elle permet ainsi de réduire considérablement le coût d'exploration, en orientant la recherche minière vers les régions favorables d'une grande surface, qui sont parfois inaccessibles (Abdessamad et al.,2018).

Des cartes de zones cibles peuvent être réalisées en se basant sur des données satellitaires. Ces cartes constituent une aide précieuse pour l'orientation des travaux (Hamzaoui, 2006). L'imagerie satellitaire quant à elle constitue pour le prospecteur un outil complémentaire et parfois indispensable pour optimiser le temps passé sur le terrain, tout en améliorant d'une façon très sensible la précision des ressources naturelles (Souleye et al., 2002). Il existe plusieurs méthodes de prospection à savoir : la prospection géologique, la prospection au marteau, la prospection géochimique en sédiments de ruisseaux ou en sol, la prospection géophysique aéroportée et au sol.

### 1.1.3 Généralités et structuration des SIG

Un système information géographique (SIG) est un ensemble de structures, de méthodes, d'outils et de données constitués pour rendre compte des phénomènes localisées dans un espace spécifique et faciliter les décisions à prendre sur cet espace (Joliveau, 2013). La structuration se fait de façon ordonnée à l'aide de 02 types de données (Anonyme, 2009) :

- **Données spatiales ou graphiques :** Les données spatiales sont stockées soit en sous format vectoriel soit en sous format raster : le format vectoriel gère les points, les lignes et les polygones. Les vecteurs sont complétés par des données alphanumériques et le format raster dans lequel les données sont stockées sous forme de grilles ou de cellules formant une maille. Ces données ont comme unité de base le pixel.
- **Les données alphanumériques :** C'est l'ensemble des données qualitatives et quantitatives associées à chaque entité du fichier de forme shp.

#### 1.1.3.1 Rôle d'un SIG

Les SIG sont des outils incontournables à l'heure actuelle dans la réalisation et l'interprétation des cartes. Ils ont plusieurs rôles, parmi lesquels : l'abstraction, qui est la modélisation, l'intellectualisation du monde réel suivant différents prismes ; l'acquisition : récupération de l'information existante ; et l'alimentation du système de données ; l'archivage, permet de stocker les données de façon à les retrouver et les interroger facilement ; l'analyse, qui donne des réponses aux requêtes au cours même des SIG ; l'affichage, qui a pour but de permettre à l'utilisateur d'appréhender des phénomènes spatiaux dans la mesure où la représentation graphique respecte les règles de la cartographie.

#### 1.1.3.2 Cartographie

La cartographie est la réalisation et l'étude des cartes géographiques et géologiques. Elle a pour but la représentation des données sur un support réduit (espace généralement tenu pour réel) et de visualiser des phénomènes complexes afin de permettre une compréhension rapide (Foucault et Raoult, 2001). Une carte est une représentation géométrique, plane, simplifiée et conventionnelle de toute ou la partie de la surface terrestre et cela dans un rapport de similitude convenable qu'on appelle échelle. Une carte peut être conçue à la main ou par machine.

#### **1.1.4 Généralités sur les cassitérites**

La cassitérite est un minéral incontournable dans les nouvelles technologies car, elle contient de l'étain qui est le métal le plus utilisé dans l'industrie moderne, il est crucial pour le secteur des composants électroniques des véhicules, de la robotique ou encore des énergies renouvelables. L'étain arrive même à la tête des métaux indispensables à la croissance de ces technologies du futur.

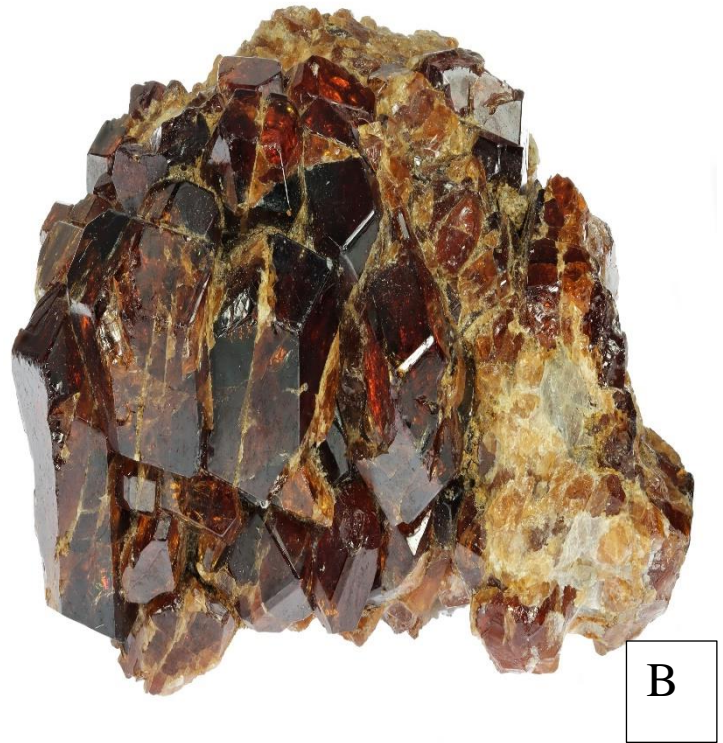
##### **1.1.4.1 Aperçu historique**

La cassitérite fut citée par Bergman en 1780, ces premières analyses furent réalisées en 1797 par le chimiste Martin Heinrich Klaproth et fut décrite par François Sulpice Bendant en 1832 ; le nom choisi dérive du grec Kassiteros (kassiteros=étain) qui est le principal élément constituant. Les propriétés morphologie géométriques et optiques furent étudiées par Friedrich Becke. L'étain connu depuis l'antiquité, l'apogée de son utilisation a eu lieu lors de l'âge de bronze, utilisé en alliage il se retrouve également dans des nombreux matériaux et pièces de monnaie (Kibange, 2021).

Composée de **SnO<sub>2</sub>** et de trace de métaux divers. La cassitérite est généralement opaque mais se présente sous forme de cristaux fins. Ces derniers, de couleur et de lustre variables sont très prisés. Les pierres de cassitérites de qualité bijoutière sont cependant rares. Elle se développe dans les veines hydrothermales de moyenne à haute température.

##### **1.1.4.2 Description physique et chimique des grains de cassitérite**

En ce qui concerne la description physique des grains de cassitérite, il est à noter que ses grains se présentent sous forme de cristaux prismatiques allongés sur (001) ou en masses, souvent maclés, avec des faces striées. Ces grains peuvent présenter des éclats variés (fig.6) : noir, jaunâtre, marron, brun-rouge ou brun-caramel et blanc.



**Figure 6** : Grains de cassitérite: A) éclat noir ; B) éclat brun-caramel (source : wikibis.com).

➤ **Propriétés chimiques**

Considérée comme une Oxyde, elle a pour formule brute  $\text{SnO}_2$  dans laquelle sont répertoriés les éléments (O) et (Sn), elle cristallise dans un système quadratique ; de dureté : 6-7 ; de poids spécifique : 6,8-7,1, d'éclat submétallique à adamantin avec des cassures suconchoïdales.

➤ **Usages**

Les minéralogistes apprécient les beaux spécimens de cassitérites des collections. Ils portent au pinacle les macles multiples originales ou les formes définies. Les gemmologues recherchent les pierres dures de cassitérite de belle couleur translucide, que les orfèvres peuvent tailler en gemme ou ovale brillant, tantôt d'un beau jaune, tantôt d'un bel orangé ou brun miellé. Elle sert au polissage optique. La cassitérite ou bioxyde d'étain est un agent

opalisant pour fabriquer des pâtes de verre, ainsi que pour les émaux et les vernis minéraux. C'est aussi un pigment pour céramiques, par exemple sous forme de pigment albâtre et rouge rubis en peinture sur céramique. Il s'agit d'un mordant ancien pour les teintures et impressions de tissus. En chimie, le dioxyde d'étain est un agent de catalyse pour réaction d'oxydation. C'est surtout le principal minéral des gîtes d'étain, très recherché depuis l'Antiquité.

#### ➤ **Formation de gisements de cassitérite**

De nos jours la plupart des sources de cassitérites se trouvent aujourd'hui dans des dépôts alluviaux ou placers contenant des grains résistants aux intempéries et dans les gisements primaires.

D'autre part, perçue comme source courante d'étain, est extraite de gisements primaires ou de gisements de placers (secondaires) associés à des roches granitiques, tels que des granites et leurs équivalents volcaniques et subvolcaniques (Linnen et al., 2012 ; Tchunte et al., 2021 ; Konopelko et al., 2022). Plus de 99 % de la production de cassitérite provient de gisements primaires et de placers, avec seulement un très faible pourcentage récupéré comme sous-produit de l'extraction de métaux de base (USGS, 2020).

#### ➤ **Gisements primaires**

#### ➤ **Gisements placers**

Le placer fait référence à une source minérale qui se forme suite à des processus d'érosion et de transport. En ce qui concerne les gisements de placers tels que la cassitérite alluviale dans les sédiments de surface sont des produits de la désintégration des corps minéralisés et des roches et sont pertinents pour les efforts d'exploration plus larges de la cassitérite (Sinclair et al., 2014). La confirmation visuelle de la présence de cassitérite alluviale concentre l'intérêt et permet un suivi immédiat du panoramique et de la prospection. Cela peut parfois conduire à la découverte d'une minéralisation de cassitérite in situ à proximité, mais la source du substratum rocheux est souvent cachée en raison d'une mauvaise exposition. La résistance mécanique et chimique élevée et la stabilité de la cassitérite pendant les intempéries, le transport et l'accumulation font de la cassitérite un outil important pour la caractérisation de la roche mère dans les études de provenance (Fletcher et Loh, 1996 ; Romer et Kroner, 2015 ; Zack et Gahtani, 2015 ; Edima et al., 2022). Des paramètres tels que le

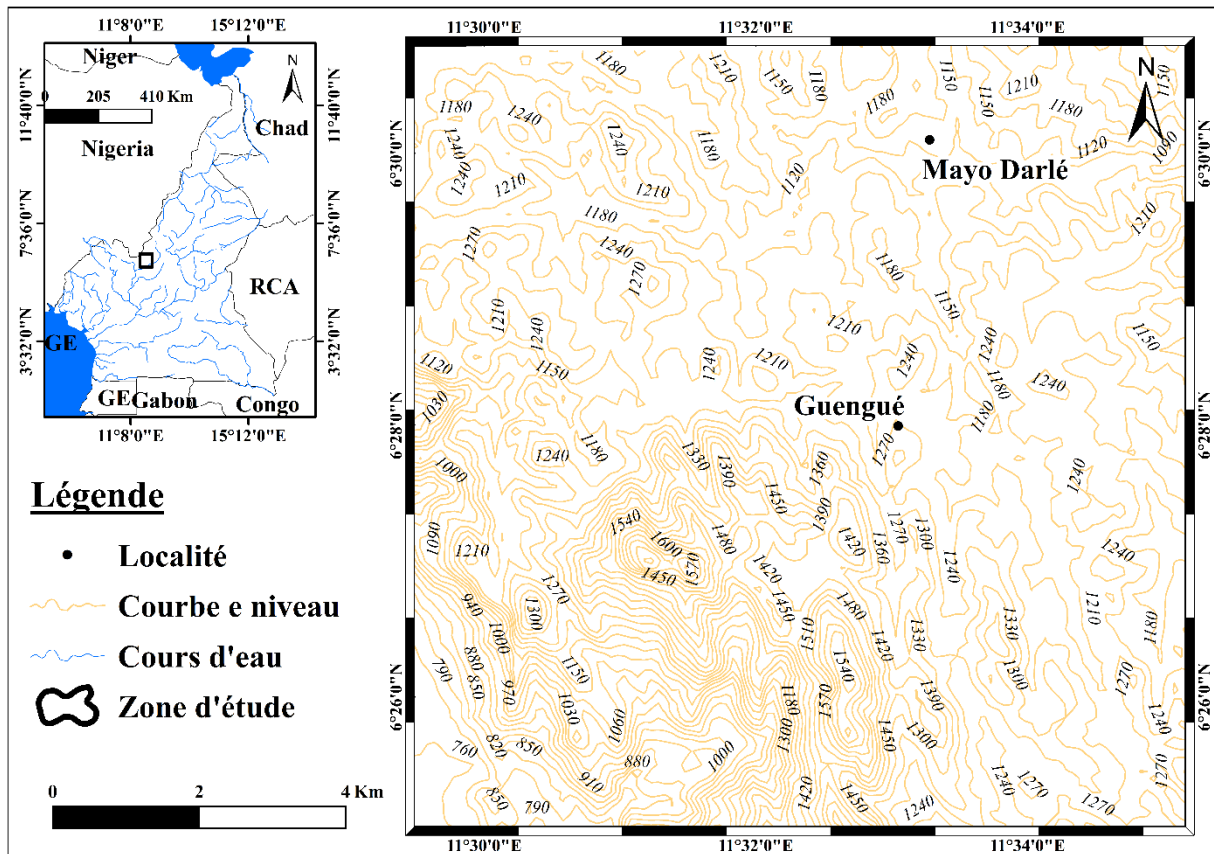
transport, le dépôt et la diagenèse peuvent modifier physiquement les grains de cassitérite (généralement abrasés, arrondis et aplatis). Pendant le transport, la morphologie des grains de cassitérite alluvionnaires peut fournir un vecteur pour l'emplacement des sources de substratum rocheux, tandis que les inclusions minérales dans les grains de cassitérite reflètent la minéralogie de la source primaire de cassitérite (Morton et Hallsworth, 1999). Les inclusions peuvent également être utilisées pour déduire les conditions chimiques du milieu minéralisateur (Moles et Chapman, 2011).

## **1.2 Présentation de la zone d'étude**

### **1.2.1 Cadre géographique**

#### **1.2.1.1 Localisation de la zone d'étude**

La commune de Mayo-Darlé est située dans la région de l'Adamaoua-Cameroun et le département de Mayo-Banyo. Elle est le chef-lieu de l'arrondissement de Mayo-Darlé et couvre une superficie de 1920 km<sup>2</sup>. Elle est limitée au nord par la commune de Banyo, au sud par la commune de Bankim, à l'ouest par la République Fédérale du Nigéria et à l'est par la commune de Ngambé Tikar (région du Centre). Sur le plan géographique, la zone d'étude est comprise entre la latitude 6°26- 6°30 N et la longitude 11°30-11°34 E (fig.7).



**Figure 7 :** Carte de localisation de la zone d'étude et ses environs (source: fond topographique de Mayo-Banyo).

### 1.2.1.2 Climat

Le climat tropical qui règne dans la région de l'Adamaoua appartient au domaine humide qualifié de type soudano-guinéen (Olivry, 1986). Les données climatiques enregistrées par la station météorologique de Ngaoundéré sur une période de 30ans (1991-2021) sont consignées dans le tableau 1 ci-dessous. D'après ces données, les précipitations moyennes annuelles s'élèvent à 1532mm et la température oscille entre 21,3 et 26°C. La température moyenne annuelle est de 23°C. Ces variations de températures sont influencées par l'absence de la mer. L'analyse du diagramme ombrothermique (fig.8) montre que la région est soumise à un régime à deux saisons :

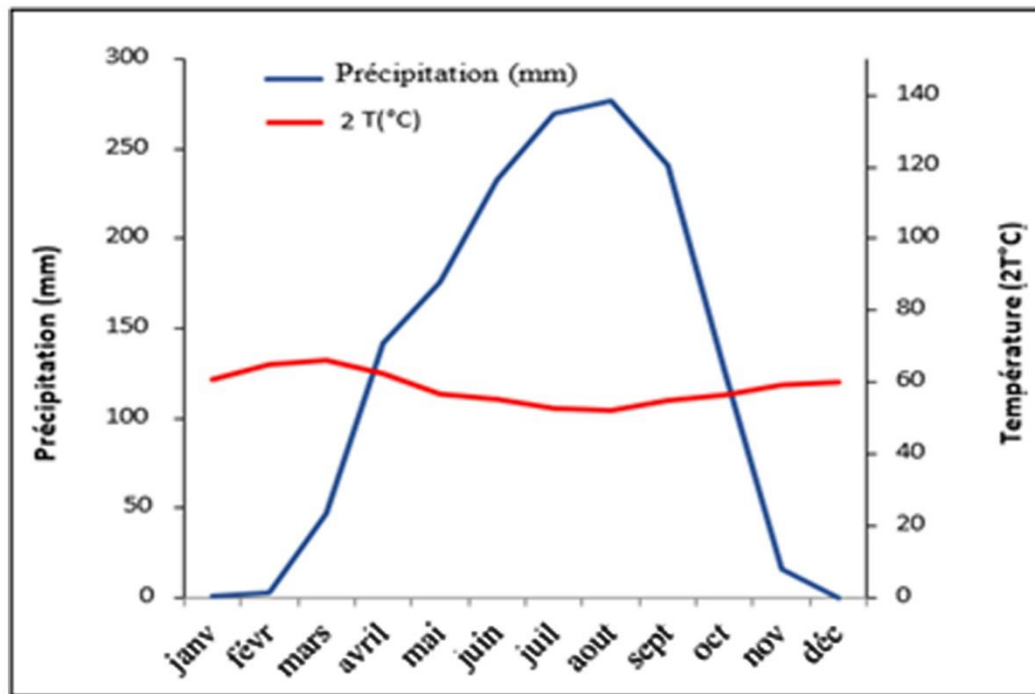
- une saison sèche (Novembre-Mars) ;
- une saison de pluie (Avril-Octobre).

**Tableau 1.** Relévés climatiques de la station de Ngaoundéré sur la période de 30ans (1991 - 2021)

Mois	Janv	Fév	Mars	Avril	Mai	Juin	Juil	Août	sept	Oct	Nov	Déc	Moy	Total
Pm(mm)	1	3	47	142	176	233	270	277	241	126	16	0	-	1532
T (°C )	21,3	25,4	26	24,2	22,9	22,1	21,5	21,6	22	22,9	23,8	22	23	-

Pm (mm) : précipitations moyennes en millimètre

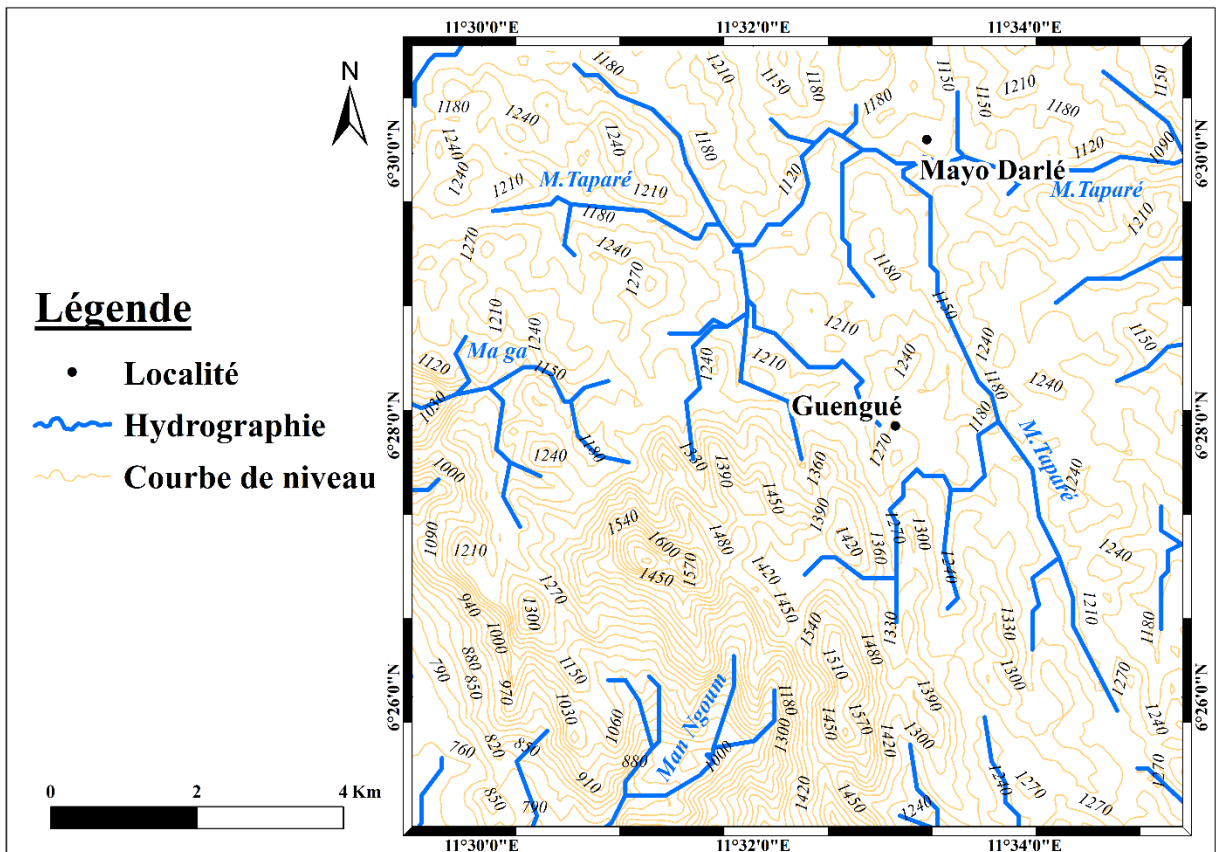
Tm (°C) : températures moyennes en degré Celsius



**Figure 8 :** Diagramme ombrothermique de Bagnouls et Gausson (1957) appliqué aux données recueillies à la station de Ngaoundéré.

### 1.2.1.3 Hydrographie

La zone d'étude se trouve dans le bassin versant de la Sanaga, et appartient au sous bassin du Mbam. La commune est parsemée de plusieurs petits ruisseaux à usage domestique dont la rivière Mayo-Darlé qui coule suivant la direction Ouest-Est. De manière générale, ce secteur est majoritairement constitué de nombreux cours d'eau contributifs qui sont entre autres Fada qui coule suivant la direction sud-nord, la rivière Man-ngoum, Na-nda et Tayap coulant suivant la direction est-ouest. Ces cours d'eau se rejoignent ensuite dans les affluents des principales rivières formant une vallée en forme de V comme on peut le voir sur (fig. 9). Il s'agit d'un schéma de drainage dendritique qui se justifie par la nature peu perméable et non poreuse des roches de ce secteur. Le réseau hydrographique, déterminé par les cassures de la roche, a une configuration alvéolaire (Olivry,1986).

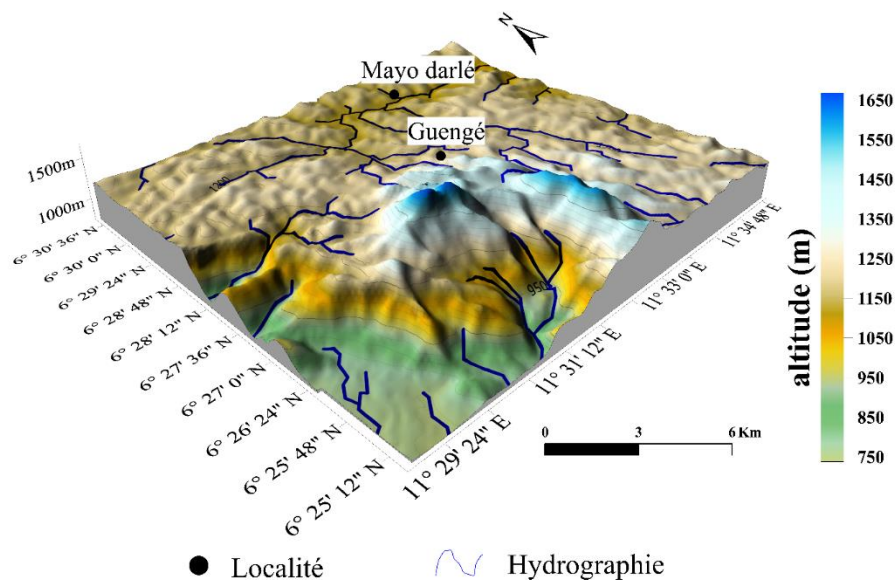


**Figure 9 :** Carte hydrographique de la zone d'étude (source :Image SRTM du Cameroun 2014).

#### 1.2.1.4 Orographie

La zone d'étude présente un relief accidenté avec des altitudes variant entre 738 m et 1668 m (fig. 9) du fait des accumulations volcaniques du Tchabal Mbabo. Il s'agit d'un plateau accidenté formé de roches métamorphiques et de cuirasses ferrugineuses. Plusieurs zones d'éboulement et d'affaissement de terrain se rencontrent. La commune de Mayo-Darlé appartient à la surface d'érosion comprise entre 738 – 1029 m sur le plan orographique. Cette surface d'érosion est la deuxième en extension au Cameroun. Elle s'étale comme une large bande orientée Ouest-Est du pays Bamoun jusqu'au-delà de Bouar en Centrafrique, couvrant l'ensemble du plateau de l'Adamaoua. Elle a été datée du Crétacé et appelée Post-Gondwanienne (Olivry, 1986). La carte des unités morphologiques permet de subdiviser la zone d'étude en 03 unités géomorphologiques :

- Au Sud- l'Ouest, les altitudes comprises entre 738 m et 1029 m qui corresponde aux basses altitudes.
- Les zones où les altitudes sont comprises entre 1029 m et 1293 m occupent presque les 80 % de la zone d'étude.
- Alors que les zones de fortes altitudes supérieures à 1293 m occupent une petite partie Centre-Sud de la zone d'étude.



**Figure 10** : Carte orographique de la zone d'étude (extrait de l'image Radar SRTM Cameroun 2014).

### 1.2.1.5 Végétation

La zone d'étude présente un paysage de forêts claires sèches et de savanes, toutes de type soudanien. La végétation est très contrastée (Letouzey et Combroux, 1959). Sur les plateaux, elle est essentiellement constituée de la savane arbustive et arborée à savoir *Annona senegalensis*, *Harungana madagascariensis*, *Piliostigma thonningii*, *Hymenocardia acida*, *Entanda africana*, *Ficus* spp. La savane herbeuse existe par endroit notamment au sommet des montagnes. Dans les vallées, une galerie forêts est observée avec la présence de grands arbres (Letouzey, 1985). Actuellement, cette végétation est fortement influencée par les activités et



Pratiques humaines. En plus de la savane arbustive et des forêts galeries, il y est retrouvé aussi Des cultures agricoles telles que les mangues, maïs, haricots, manioc, Arachide (PCD, 2021).

**Figure 11** : Vue de la végétation de la zone d'étude (source : PCD Mayo-Darlé 2021)).

### 1.2.1.6 Population et activités économiques

La population de la commune de Mayo Darlé est estimée à 23137 habitants répartis sur 1920 km<sup>2</sup>, pour une densité de 12 habitants/Km<sup>2</sup>. Ces habitants sont constitués d'une multitude

d'ethnies différentes : Foulbé (Foulani) ; Tikar ; Baya ; Bamoun ; Mambila ; Yamba ; Kwandja ; Bansa ; Mbororos et Haoussa (Anonyme A, 2011).

L'économie repose presque entièrement sur une seule chose : le bétail, un monopole Foulbé. La faible population, l'humidité élevée et le vaste champ d'herbe font de cette localité un idéal pour le pâturage. Ces bovins sont transportés vers le grand marché de Yaoundé, Douala et certains arrivent même au Gabon. Ainsi en plus de l'élevage, il y'est pratiqué l'agriculture, la pisciculture, la pêche, l'apiculture, l'artisanat, et l'exploitation artisanale. En minorité, certaines ethnies du pays pratiquent l'exploitation artisanale des matières résiduelles et des placers, à des fins économiques locales (Anonyme B, 2021).

#### **1.2.1.7 Sols**

La lithologie et le relief sont les facteurs les plus importants qui contrôlent en grande partie les principales formations pédologiques. La différenciation climatologique joue seulement un rôle mineur bien qu'il y ait une augmentation de l'humidité du Nord-Est vers le Sud-Ouest (Martin et Ségalen, 1966). Les roches qui constituent l'ensemble de la région sont variées, mais elles ne donnent pas toujours des sols différents. Inversement, par les actions de l'érosion et des influences climatiques anciennes, une même roche porte fréquemment des sols différents (Humbel, 1971). Les sols sont ferralitiques de couleur brune, argileux limoneux et limono sablonneux. Ici, les terres agricoles se retrouvent en contrebas des montagnes aux abords des cours d'eau (PCD, 2021).

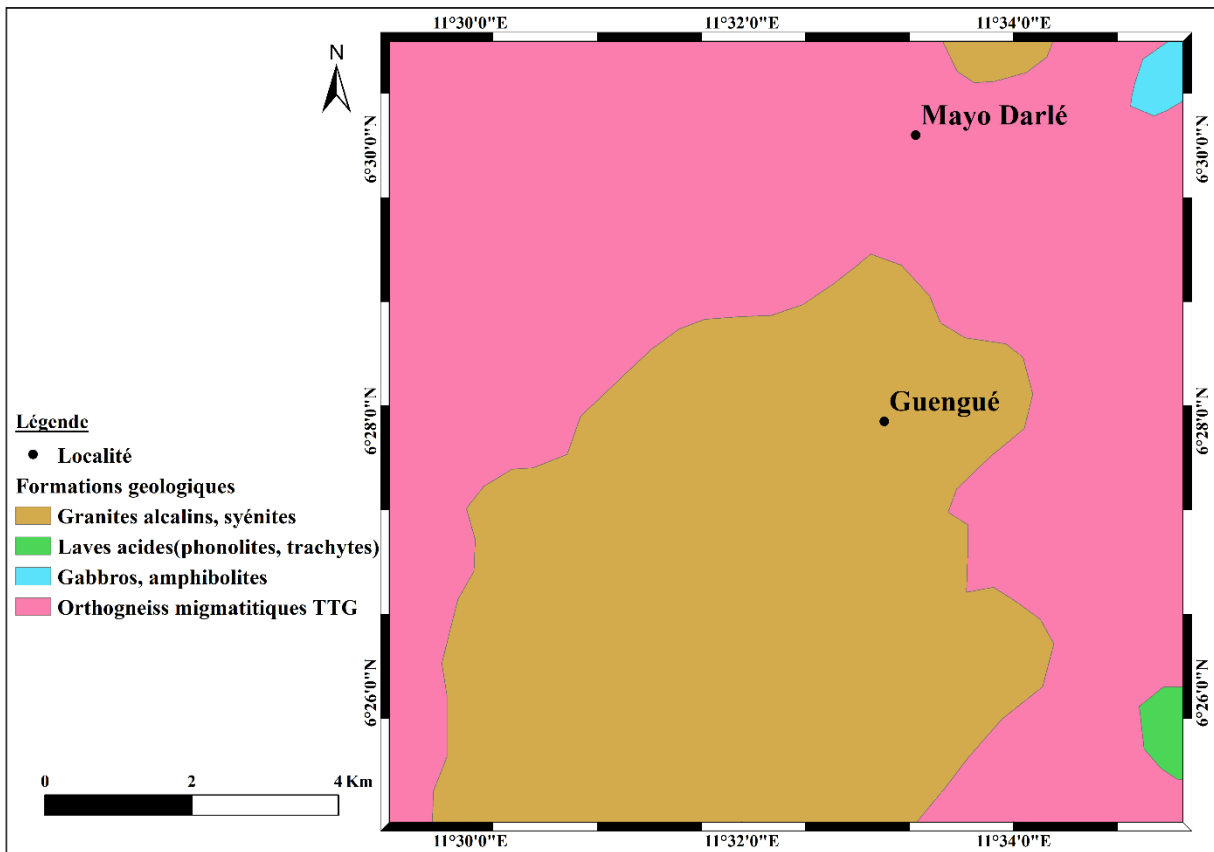
#### **1.2.1.8 Contexte structural et géologique**

Selon Nguene (1982), le complexe Mayo-Darlé se trouve le long de la ligne du Cameroun et fait intrusion dans les métasédiments et métavolcaniques de la ceinture orogénique panafricaine. Il est composé d'une série de roches alcalines différenciées parmi lesquelles la bemmorieite, la syénite (nordmarkite), le granite à biotite et le porphyre granitique.

La géologie de Mayo Darlé est constituée de granites alcalins, syénites, phonolites, trachytes, gabbros, amphibolites ainsi que des orthogneiss migmatiques (Leroy, 1955) (fig. 12).

Les grandes fractures du socle panafricain se regroupent en deux principales directions (Toteu et al., 2000) :

- La première orientée N30°E plus fréquente, est celle de la ligne volcanique du Cameroun,
- La seconde dirigée N70°E, correspond à la ligne de l'Adamaoua ou la Shear zone de l'Adamaoua.



**Figure 12** : Carte géologique de la zone d'étude (source : PRECASSEM, 2021)

### 1.2.2 Potentiel minier au Cameroun et au Mayo-Darlé

Les ressources minières du Cameroun (Afrique centrale) font de lui depuis longtemps un pays attractif avec des ressources qui se répartiraient sur plus des deux tiers de sa superficie. Malgré l'identification de nombreuses occurrences minérales, la production minière reste essentiellement sur l'or, la bauxite, le saphir, le Coltan et l'étain (Anonyme A,2011). La

région de l'Adamaoua est reconnue pour son potentiel minier en bauxite et saphir principalement. La commune de Mayo-Darlé est née grâce à l'extraction des mines. L'arrondissement a un gros potentiel minier. Dans les années 1930-1960, le Mayo-Darlé était réputé et convoité pour sa richesse en cassitérite. Cependant, l'activité minière tourne au ralenti car une seule société minière est présente. Il s'agit d'une entreprise sud-coréenne qui possède un permis de recherche de l'étain (Anonyme C, 2017).

L'exploitation de la cassitérite dans le Mayo-Darlé a débutée dans les années 1930. Elle a connu un maximum pendant la seconde guerre mondiale et un déclin plus ou moins rapide dans les années 1960. L'exploitation de la cassitérite se fait à ciel ouvert. Après l'échec de la tentative de modernisation par la SOFIMEC (Société de Fibre et de Mécanique), au début des années 1960, la production de cassitérite a décliné, le personnel s'est réduit et les techniques d'exploitation sont devenues purement artisanales (Fulvia, 2022). Ce tableau d'abandon n'est peut-être pas irrémédiable. Le gisement du Mayo-Darlé est loin d'être épuisé même si les meilleurs sites ont été écrémés (Roupsard, 1985).

## **Synthèse des travaux antérieurs**

### **1.2.3 Travaux en télédétection**

Les travaux de Nguemhe (2020) réalisés sur l'analyse spatiale basée sur le SIG des structures à l'échelle régionale et sur le contrôle de la minéralisation de l'or le long de la zone de cisaillement de Bétaré-oya, ont montré que, les linéaments étaient facilement reconnaissables et facilement extraits manuellement. Ceux-ci sont une série de plus de 384 petits segments principalement orientés dans quatre directions (N – S, NE – SW, E – W et SE – NW).

Akame et al., (2014) ont utilisés les modèles numériques de terrain SRTM pour la cartographie des linéaments structuraux à l'Est de Sangmélina au Sud du Cameroun. Ils ont pu obtenir une bonne discrimination des discontinuités images (linéaments) ainsi que la réalisation des cartes linéamentaires.

Les travaux de Mamdem (2009) réalisés sur la prospection de la bauxite dans la région de l'Ouest-Cameroun ont utilisés des images satellites (LANDSAT8) couplées au SRTM ont

permis de réaliser une cartographie des différents gisements de bauxitiques de ses Arrondissements.

Abdessamad et al., (2019) ont utilisé l'image multispectrale Landsat 7 et 8 pour l'exploration minière dans la boutonnière de Bou-Azzer-El Graara, Maroc.

#### **1.2.4 Géologie**

Les travaux de Tchami Fulvia (2022) réalisés dans le cadre de l'analyse statistique, la modélisation numérique et l'estimation des ressources de la minéralisation de Coltan-Etain sur la recherche des cassitérites dans la zone de Mayo-Darlé ont révélés la présence de sept formations géologiques à savoir : les granites, greisens, porphyres, schistes, lamprophyres, gneiss et les pegmatites en relation avec la minéralisation des cassitérites. Au cours de ces travaux, il en ressort une prédominance des granites avec un pourcentage de 42,40 %.

#### **Conclusion**

Ce chapitre portait sur la revue de la littérature, la présentation physique de la zone d'étude dans son grand ensemble et certains travaux antérieurs en relation avec la thématique. Les travaux consultés ont adopté plusieurs approches, parmi lesquelles la télédétection. Il nous revient de souligner que l'approche de cette méthode en vue de la caractérisation des ressources en cassitérite n'a pas été suffisamment approfondie dans la littérature consultée, encore moins les informations sur la commune de Mayo-Darlé. Le chapitre suivant s'attarde sur la méthode utilisée dans la présente étude.

## CHAPITRE II : MATERIEL ET METHODE

## CHAPITRE 2: MATÉRIEL ET MÉTHODE

### Introduction

Les travaux exposés dans ce mémoire portent sur la recherche de la cassitérite dans le Mayo-Darlé. Pour se faire, ils ont été conduits suivant une approche méthodologique indiquant la méthode de télédétection décrite au chapitre précédent, des données de natures différentes, outils et matériels ont également été associés.

### 2.1 Données

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont constituées essentiellement de cartes et des images satellitaires.

#### 2.1.1 Donnés cartographiques

La carte topographique (feuille Mayo- Banyo) au 1/200 000 provenant de l'Institut National de Cartographie du Cameroun. En plus des unités administratives, cette carte a servi à l'extraction et la validation du réseau hydrographique et de la carte linéamentaires.

La carte géologique de la zone d'étude provient de la carte géologique du Cameroun réalisée par le PRECASEM publiée en 2021. Cette carte géologique a également permis de trouver les corrélations entre les formations géologiques et les gisements de cassitérites.

La carte réalisée par Daniel Essapo et Marcel Eked (2020) dans le cadre de l'évaluation des politiques vertes pour la réhabilitation et la restauration durable des sites miniers dans le Mayo-Darlé (Adamaoua-Cameroun) a servie à l'extraction des coordonnées des sites d'exploitation (en cours ou déjà exploités) qui ont servi à la validation de nos résultats (carte de favorabilité en cassitérite).

La conversion de ces cartes en format numérique, puis leur géoréférencement nous a permis de les utiliser dans un espace de travail à coordonnées spatiales exprimées en mètres (x, y) dans le système de coordonnées « Universal Transverse Mercator » (UTM).

### **2.1.1.1 Données satellitaires**

#### **➤ Images SRTM**

L'image Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) avec une résolution de 30m, est un Modèle Numérique d'Élévation (MNE ou DEM) provenant du satellite SRTM. Elle est disponible sur le site <http://earthexplorer.usgs.gov/> ; elle a été acquise en février 2000 et mise en ligne depuis le 23 septembre 2014. La zone d'étude est couverte par une scène de cette image, ont été extraites l'altitude du relief, les pentes, le réseau hydrographique, la courbure du relief et d'autres paramètres jugés pertinents dans la cartographie de potentialité en cassitérite.

#### **➤ Image multispectrales ASTER**

Le satellite ASTER fournis des images multispectrales sur 14 bandes spectrales en lumière visible et infrarouge avec des résolutions de 15 et 90 m. Une seule scène couvre la zone d'étude. Elle a été acquise le 5 Septembre 2007 et publiées le 17 Mai 2015, une période où le ciel est dégagé permettant aux capteurs une bonne prise d'images. Elle provient de la base de données images de la NASA et téléchargeable gratuitement sur le site <http://www.earthexplorer.com>. Ces images ont servi à l'obtention de la carte linéamentaires de la zone d'étude.

**Tableau 2:** Caractéristiques de l'image ASTER

<b>Sensor</b>	<b>Band N</b>	<b>Spectral Interval (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Spatial résolution(m)</b>
<b>VNIR</b>	1	0.52-0.60	15
	2	0.63-0.69	
	3N	0.78-0.86	
		0.78-0.86	
<b>SWIR</b>	4	1.600-1.700	30
	5	2.145-2.185	
	6	2.185-2.225	
	7	2.235-2.285	
	8	2.295-2.2.365	
	9	2.360-2.240	
<b>TIR</b>	10	8.125-8.475	90
	11	8.475-8.825	
	12	8.925-9.275	
	13	10.25-10.95	
	14	10.95-11.65	

### 2.1.2 Logiciels

Le traitement des données et la production des cartes thématiques ont nécessité l'utilisation des logiciels tels que :

- ENVI 5.3 : pour la correction atmosphérique et radiométrique des images ASTER, et pour l'extraction des linéaments de la commune ;
- PCI GEOMATICA 2016 : pour extraire de manière automatique les linéaments des images satellitaires à l'aide de son l'algorithme LINE (Lineament-Extraction) ;
- ARCGIS Desktop version 10.8 : pour créer, organiser et présenter les données alphanumériques géoréférencées, produire des cartes d'aide à la décision à travers les techniques de l'analyse multicritère ;
- Surfer 11.64bits pour la réalisation de la carte orographique 3D de la zone d'étude ;

- RockWorks 2016 : pour la réalisation des rosaces directionnelles des linéaments et fractures concernant les statistiques liées aux fractures ;
- MS Excel 2016 : pour stoker et traiter les différentes données récoltées, la réalisation des graphes ;
- MS Word 2016 : pour la rédaction de ce travail.

### **2.1.2.1 Matériel**

La réalisation de ce travail a nécessité l'utilisation d'un matériel constitué de :

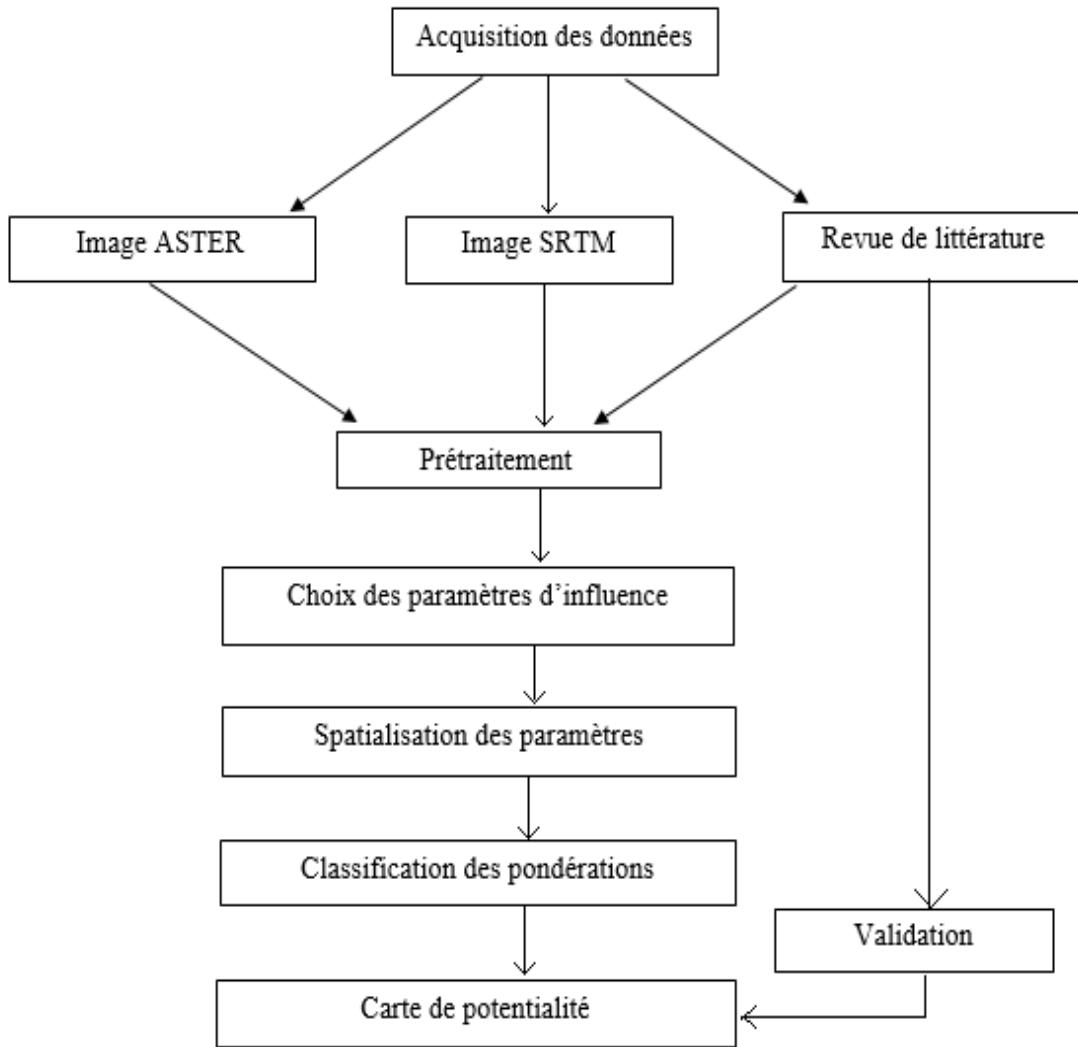
- d'un modem Camtel pour la connexion qui a permis l'acquisition des images satellitaires ;
- d'une clé USB de capacité 16Go pour stocker les travaux et une imprimante laser pour les impressions ;
- et un ordinateur portable pour le stockage et le traitement des différentes données.

## **2.2 Méthode**

Suite aux objectifs initialement fixés, ce volet tourne autour des points suivants : acquisition des données, ensuite prétraitement des données, après la cartographie des différents paramètres contrôlant la potentialité de la ressource en cassitérite à savoir les unités morphologiques (altitude, pente, densité de drainage, courbure du relief), structurales (densité de fracturation ...etc.). Cette section se clôture par la cartographie de la potentialité en cassitérite par AM.

La carte de potentialité en cassitérite est définie comme une carte qui donne l'estimation du potentiel en en cassitérite dans une région ou un territoire donné(e). Cette estimation est basée sur la répartition spatiale des facteurs de potentialité en cassitérite sans implication temporelle. Les méthodes d'analyse multicritère procèdent par comparaison des différents facteurs pris deux à deux pour établir une matrice carrée, cette matrice permet de déterminer les coefficients de pondération de chaque facteur. Parmi les méthodes d'analyses multicritères, l'Analyse multicritère de Shaban (AM) a été utilisé. La détermination des poids est la tâche la

plus difficile car la pondération des facteurs varie d'une étude à une autre et dépend de l'analyse et du jugement de l'expert (Lee et al., 2012).



**Figure 13 :** Digramme de la démarche utilisée pour la cartographie de la potentialité en cassitérite.

### 2.2.1 Prétraitements des données

Le prétraitement des données a permis d'explorer les données afin de les transformer dans un format plus utile et efficace. Les données acquises ont été transformées (conversion et classification) et stockés sous format Excel, afin d'être utilisées dans le logiciel SIG. Les

cartes géologiques et topographiques disponibles sur format analogique ont été numérisées et géoréférencées. Le géoréférencement de toutes les données a été fait dans le système de coordonnées projeté WGS 84 UTM Zone 33N et toutes les données rasters ont été ramenées à une résolution de 30m.

#### ➤ **Image SRTM**

L'image SRTM brute contient plusieurs défauts qui peuvent perturber les calculs des produits dérivés lors de son traitement. C'est le cas de la présence de dépression généralement due à des aberrations de mesures ou artefacts. Ainsi, avant l'extraction des paramètres morphométriques le prétraitement effectué sur l'image SRTM a visé à corriger les dépressions identifiées afin d'améliorer la qualité des résultats.

#### ➤ **Image ASTER**

La correction atmosphérique a été entreprise sur chaque bande de l'image ASTER. Les principaux effets atmosphériques, notamment l'absorption par vapeur d'eau, le dioxyde de carbone, l'oxygène et l'ozone, la diffusion par les molécules, la visibilité de la scène et les aérosols ont été pris en compte. La correction est faite en 03 étapes :

- Calibration des comptes numériques de chaque bande. Les comptes numériques ont été convertis en valeurs de luminance captées par le satellite à l'aide des paramètres fournis par le métadate de l'image.
- Les valeurs de luminescence sont ensuite transformées en réflectance exo-atmosphérique ;
- En appliquant l'outil FLAASH, on obtient une image de réflectance réelle des objets du sol.

## **2.2.2 Traitement et extraction des paramètres**

### **2.2.2.1 Traitement des images SRTM et extraction des paramètres morphométriques de terrain**

La topographie influe la disponibilité des ressources en cassitérite. Pour faire une description du relief, les données SRTM ont ainsi été utilisées pour l'extraction et l'interprétation des paramètres morphométriques. Plusieurs paramètres sont calculables à partir du SRTM (Speigth, 1974 cité par Hassein, 2012). Wilson et Gallant (2000) distinguent

cinq attributs topographiques fondamentaux quantitatifs de la surface du sol : l'altitude, la pente, le drainage et sa densité, la courbure du relief et l'exposition du relief.

➤ **Réalisation de la carte d'altitude**

L'altitude est un paramètre important dans la potentialité en cassitérite. Les zones basses sont généralement considérées comme des milieux par excellence pour les dépôts par rapport aux zones élevées. Pour la réaliser, l'analyse statistique de la fréquence de distribution des pixels d'altitude sur l'image SRTM a été faite sur la base des travaux de Jenks (1977) et l'affichage du résultat suivant l'algorithme « **Neighbourhood method** ». Dans ces travaux, les bornes de classes sont identifiées parmi celles qui regroupent le mieux les valeurs similaires et optimisent les différences entre les classes. Celle-ci a permis d'établir 05 classes altitudes.

➤ **Réalisation de la carte des pentes**

La pente du terrain est un paramètre qui renseigne sur la dynamique des écoulements. En géologie, une variation brusque de celle-ci peut traduire une variation de la lithologie ou un accident tectonique. Pour mieux représenter la variation de pente, le choix de l'échelle adapté est aussi basé sur les travaux de Jenks (1977). 05 classes ont été distinguées.

➤ **Réalisation de la carte du réseau hydrographique et densité de drainage**

C'est un ensemble hiérarchisé et structuré de cours d'eaux qui assurent le drainage d'une région donnée. Il est d'autant plus dense que le climat est humide, les pluies abondantes, les pentes fortes et les roches moins perméables. La densité de drainage, en milieu de socle comme le Mayo-Darlé est en relation avec les dépôts de cassitérites alluvionnaires, surtout si les formations ne sont pas fracturées. Pour obtenir un réseau hydrographique détaillé et objectif de la zone d'étude trois méthodes ont été utilisées :

- la digitalisation des cours d'eau sur la carte topographique 1/200.000 ;
- la digitalisation sur l'image ASTER et une extraction automatique par segmentation;
- l'extraction automatique sur l'image SRTM à partir des logiciels SIG.

➤ **Calcul de la densité de drainage**

Elle représente la longueur totale des drains par unité de surface (Horton, 1945) et s'exprime en km/km<sup>2</sup>: **équation 1**

$$D_d = \frac{\sum L_i}{A} \quad (1)$$

$L_i$  est la longueur de drains en (km) et  $A$  est la surface (km<sup>2</sup>).

Cette densité de drainage a été extraite à partir du réseau hydrographique extrait de l'image. Pour se faire l'algorithme « Density Line » implémenté dans ArcGIS a été utilisé puis établi en 05 classes. Cet algorithme considère que la densité de drainage est la longueur totale des drains par une unité de surface au sein d'un rayon défini.

➤ **Réalisation de la carte de courbure du Relief**

C'est un paramètre important car il définit la concavité ou convexité du relief. Les zones concaves sont les plus favorables à la sédimentation et propices aux dépôts alluvionnaires. La courbure du relief montre la divergence et la convergence durant l'écoulement des eaux affectant ainsi le processus d'érosion. Ce facteur est extrait à partir du logiciel ArcGIS.

### 2.2.2.2 Cartographie structurale appliquée à l'image ASTER

➤ **Analyse en Composantes Principales (ACP)**

Pour la cartographie des fractures de notre zone d'étude, une Analyse en composante principale a été effectués sur notre image. Ceci dans le but de rehausser les structures, les contours et les arrêtes. L'ACP 1 a été retenue pour la suite des traitements. Celles-ci condensent le maximum d'informations contenu dans les différentes bandes. Dans le traitement d'images satellites, la variable est représentée par la valeur de réflectance des pixels. Ces nouvelles variables sont nommées "composantes principales", ou axes principaux. Elle propose à partir d'un tableau rectangulaire de données comportant les valeurs de  $p$  variables quantitatives pour  $n$  unités et de ces variables (Duby & Robin, 2004). L'ACP permet de réduire le nombre de variables et de rendre l'information moins redondante (Mitassona k, 2022). Travailler sur les ACP a l'énorme avantage de réduire le nombre de bandes utilisées et

offre la garantie de travailler sur trois bandes qui contiennent plus de 90% de la totalité d'information des bandes en entrée en éliminant la répétition de l'information sur chaque pixel par décorrélation.

➤ **Filtrage spatial**

Après les ACP, les filtres directionnels de Sobel de taille matricielle 7 x 7 (Tableau 3) ont été appliqués afin de discriminer et cartographier l'essentiel des linéaments dans la zone d'étude. Ces filtres accentuent les discontinuités lithologiques et structurales dans les quatre directions N-S, NE-SW, NW-SE, E-W (Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008 ; Jofack, 2016). Ces filtres sont des excellents outils de discrimination d'objets rectilignes et plus ou moins curvilignes de grande taille et facilitent l'extraction des linéaments sur les images qu'ils traitent.

En utilisant un processus de convolution par application de cette matrice sur la meilleure combinaison des CP1. Ce procédé a permis d'établir à terme, une carte de synthèse des linéaments de la localité de Mayo-Darlé. La carte ainsi obtenue a été superposée à la carte géologique de la zone d'étude à l'aide des SIG (ArcGIS 10.8) pour corrélation et interprétation.

**Tableau 3:** Codification des classes matrice (7X7) des filtres directionnels de Sobel

N-S							E-W						
1	1	1	2	1	1	1	-1	-1	-1	0	1	1	1
1	1	2	3	2	1	1	-1	-1	-2	0	2	1	1
1	2	3	4	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
0	0	0	0	0	0	0	-2	-3	-4	0	4	3	2
-1	-2	-3	-4	-3	-2	-1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-1	-2	-3	-2	-1	-1	-1	-1	-2	0	2	1	1
-1	-1	-1	-2	-1	-1	-1	-1	-1	-1	0	1	1	1
NE-SW							NW-SE						
0	1	1	1	1	1	2	-2	-1	-1	-1	-1	-1	0
-1	0	2	2	2	3	1	-1	-3	-2	-2	-2	0	1
-1	-2	0	3	4	2	1	-1	-2	-4	-3	0	2	1
-1	-2	-3	0	3	2	1	-1	-2	-3	0	3	2	1
-1	-2	-4	-3	0	2	1	-1	-2	0	3	4	2	1
-1	-3	-2	-2	-2	0	1	-1	0	2	2	2	3	1
-2	-1	-1	-1	-1	-1	0	0	1	1	1	1	1	2

### ➤ **Extraction des linéaments**

Les linéaments sont des éléments rectilignes ou curvilignes qui expriment la présence des phénomènes plus profonds tels que les failles, les fractures et les contacts lithologiques. Ils apparaissent dans les images satellitaires. Au niveau des images numériques, un linéament correspond à un changement significatif dans le niveau de gris.

L'identification des linéaments sur les images satellitaires est tributaire de la capacité qu'a le capteur à détecter les légères variations de réflectance associées aux objets géologiques (Bonn et Rochon, 1997). À l'état actuel des connaissances, deux approches d'extraction des linéaments sur les images satellites existent :

Le module Line Extraction Algorithm (LINE) du logiciel PCI Géomtica très utilisé dans de nombreux travaux (Bishta et al., 2012, Hubbard et al., 2010 ; Abdullah et al., 2013 ; Moussa, 2020 ; Canny J., 1986) ; a permis l'extraction automatique des linéaments.

L'extraction manuelle qui se fait par digitalisation directe sur une image brute ou un néo-canal obtenu par filtrage, rapport de bandes, ACP ou fusion d'images. D'autre part, la technique d'extraction manuelle est très lente, laborieuses et aboutissent parfois à des résultats subjectifs. Par-rapport à l'extraction automatique (seuillages et morphologie mathématiques), bien qu'elle soit rapide, elle présente les linéaments en petits brins et sont sensibles aux problèmes d'occlusions (Lepage et al., 2000) dus au relief et à l'occupation du sol.

### ➤ **Validation de linéaments et réalisation de la carte structurale**

La validation La validation des linéaments après leur extraction est une étape critique pour garantir la qualité et la pertinence des données, ce qui permet une interprétation précise et fiable des structures géologiques ou géomorphologiques observées. La validation de la carte structurale obtenue est faite en 02 étapes :

- La superposition dans un SIG des informations auxiliaires et des résultats des travaux antérieurs ;
- L'interprétation multicritère.

➤ **Analyse statistique de la fracturation**

La direction des orientations des fractures s'apprécie mieux sur une rosace directionnelle. C'est un diagramme circulaire qui présente les fréquences en nombre ou en longueur cumulée en fonction des classes directionnelles avec un pas de 10 degré (Youan Ta et al.,2008 ; kouamé et al.,2013). L'étude des directions préférentielles des fractures d'une région est très importante, car elle révèle les classes directionnelles majeures (directions primaires) et celles dites secondaires.

Cette étude, réalisée avec le logiciel Rockwork 16, a permis d'avoir l'orientation des fractures constituant l'un des paramètres essentiel intervenant dans le réseau des fractures auront favorisé et faciliter le drainage des eaux souterraines.

➤ **Réalisation de la carte de densité de fracturation**

Le principe appliqué est le même que celui utilisé pour la densité de drainage. Ici, la densité de fracturation représente la longueur cumulée ou le nombre des fractures par unité de surface. Elle s'exprime en km/km<sup>2</sup> : **équation 2**

$$D_f = \frac{\sum L_{cf}}{A} \quad (2)$$

$L_{cf}$  est la longueur cumulée des fractures (km) A est la surface (km<sup>2</sup>).

### **2.2.3 Classification et pondération des paramètres**

Après avoir déterminé les différents paramètres qui influencent la recherche des cassitérites ceux-ci doivent être pondéré.

#### **2.2.3.1 Classification**

Chaque paramètre a été classifié en 05 et 03 classes. Chaque classe a été attribuée un code variant de 1à10. Plus une classe favorise le dépôt alluvionnaire, plus cette classe aura un code élevé.

**Tableau 4:** Codification des classes

<b>Impact de la classe sur le phénomène</b>	<b>Code</b>
Impact très faible	1
Impact faible	3
Impact moyen	5
Impact fort	8
Impact très fort	10

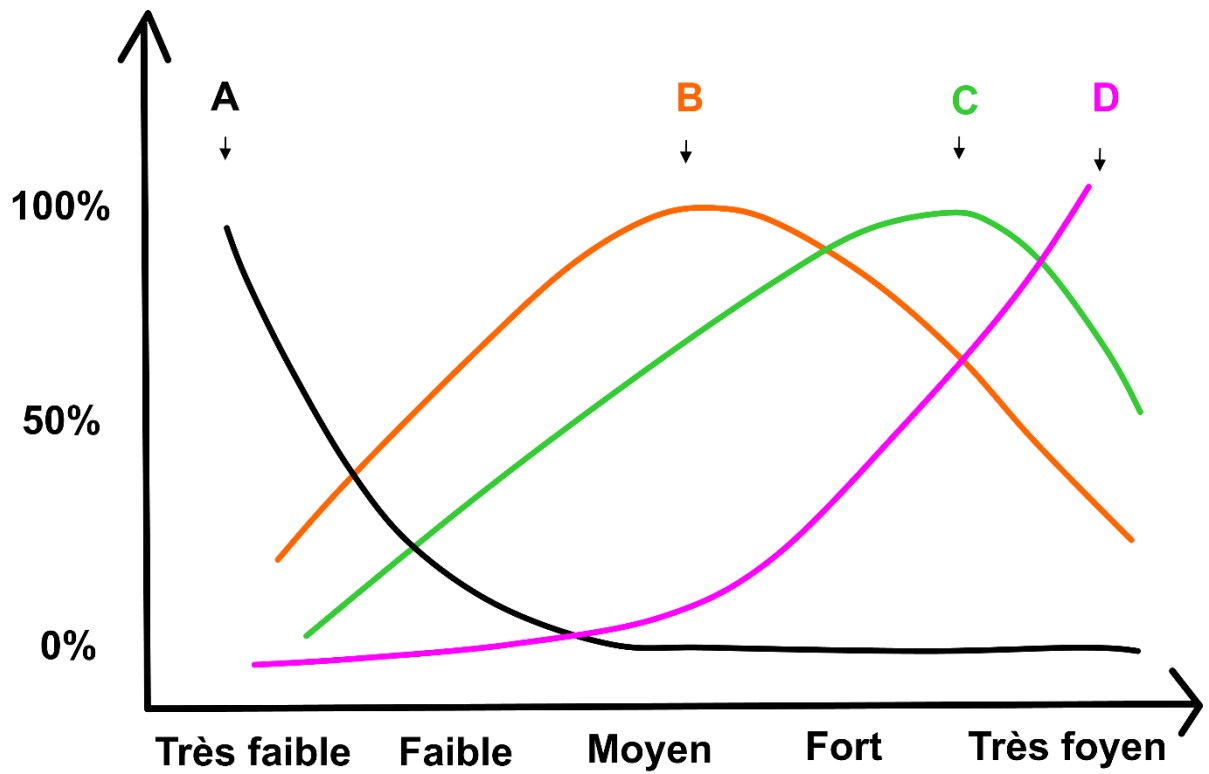
### **2.2.3.2 Pondération**

La pondération des critères décision a été effectuée suivant la méthode de comparaisons par paire. Le processus d'analyse multicritère développé par Saaty (2000) utilisé par Dibi (2008) et Youan Ta et al., (2011) a servi pour déterminer de façon cohérente les poids des critères de décision. Elle permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1. L'étude de la nature des relations entre les différents paramètres a été faite cependant, si un critère a une relation directe alors le poids de 1 lui sera attribué, si la relation est indirecte alors le poids 0,5 lui sera accordé.

### **2.2.4 Validation**

Les méthodes de validation utilisées sont la validation visuelle et la courbe de tendance. Pour l'analyse visuelle, les données géographiques des sites d'exploitation au Mayo Darlé ont été superposées à la carte de favorabilité en cassitérite obtenues.

La courbe de tendance développée par Jourda (2005) représente la variabilité du nombre de sites d'exploitation en fonction de la classe de sensibilité à la favorabilité en cassitérite. La validation de la carte thématique obtenue se fait par comparaison de la forme des courbes de tendances des classes de sensibilité de la carte à la forme des courbes théoriques.



**Figure 14**

A : courbe de tendance pour une prédiction mauvaise

B : courbe de tendance pour une prédiction médiocre

C : courbe de tendance pour une prédiction bonne

D : courbe de tendance pour une prédiction excellente

## **Conclusion**

Ce chapitre avait pour but de présenter les différentes données, outils et matériels utilisés pour atteindre les objectifs fixés. Ces données, présentées sous forme analogique et numérique à l'état brute ont subi des prétraitements et traitements. Les prétraitements ont concerné les géo-référencements, les traitements radiométriques-atmosphériques et les corrections géométriques. Les traitements ont rehaussé le contenu informatif des images SRTM et ASTER et facilité les analyses. Elles ont toutes abouti à la cartographie des potentialités en cassitérite de Mayo-Darlé. Les résultats obtenus à la suite de ces traitements et analyses sont présentés et interprétés dans le chapitre suivant.

## **CHAPITRE III : RESULTATS ET INTERPRETATIONS**

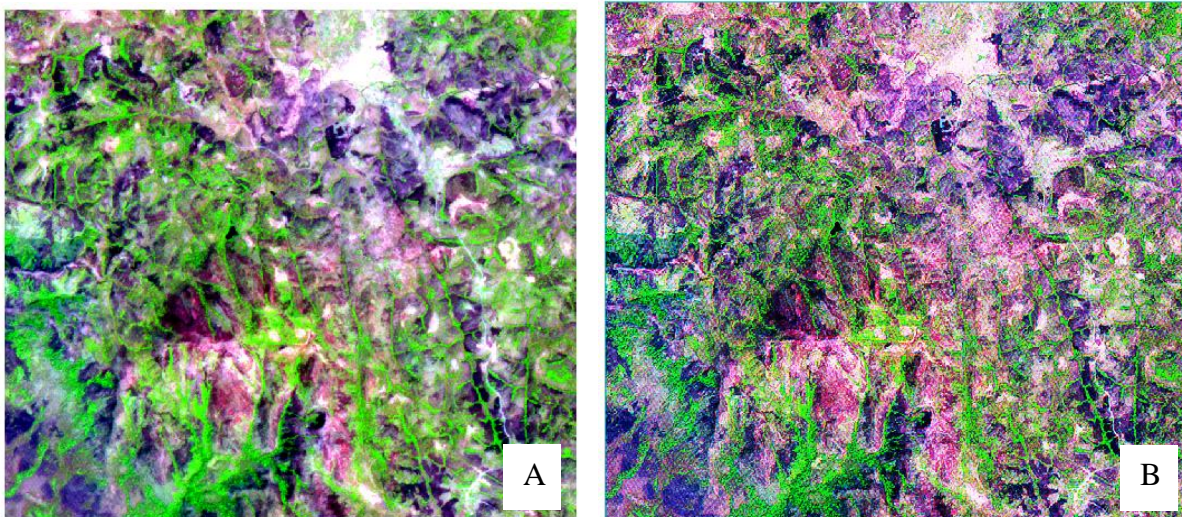
## CHAPITRE 3: RESULTATS ET INTERPRETATIONS

Pour une meilleure cartographie de la potentialité en cassitérite, les facteurs retenus doivent être opérationnels, non uniformes, fondamentaux et mesurables. Sur la base de ces critères que sont la pente, l'altitude, la densité de drainage, la densité de fracturation et de courbure du relief ont été retenus dans cette étude. Dans ce chapitre, il sera question d'analyser tour à tour ces 05 paramètres qui ont été utilisés dans la construction des modèles de la cartographie de la potentialité en cassitérite.

### 3.1 Prétraitement des images

#### 3.1.1 Prétraitement des image Aster

L'utilisation du module FLAASH a permis de corriger l'effet de contiguïté qui est ici, le mélange de pixel due à la diffusion du rayonnement de la surface réfléchi. Ce module a aussi pris en compte les conditions atmosphériques locales (aérosols et brumes) pour augmenter la visibilité des éléments de surface.

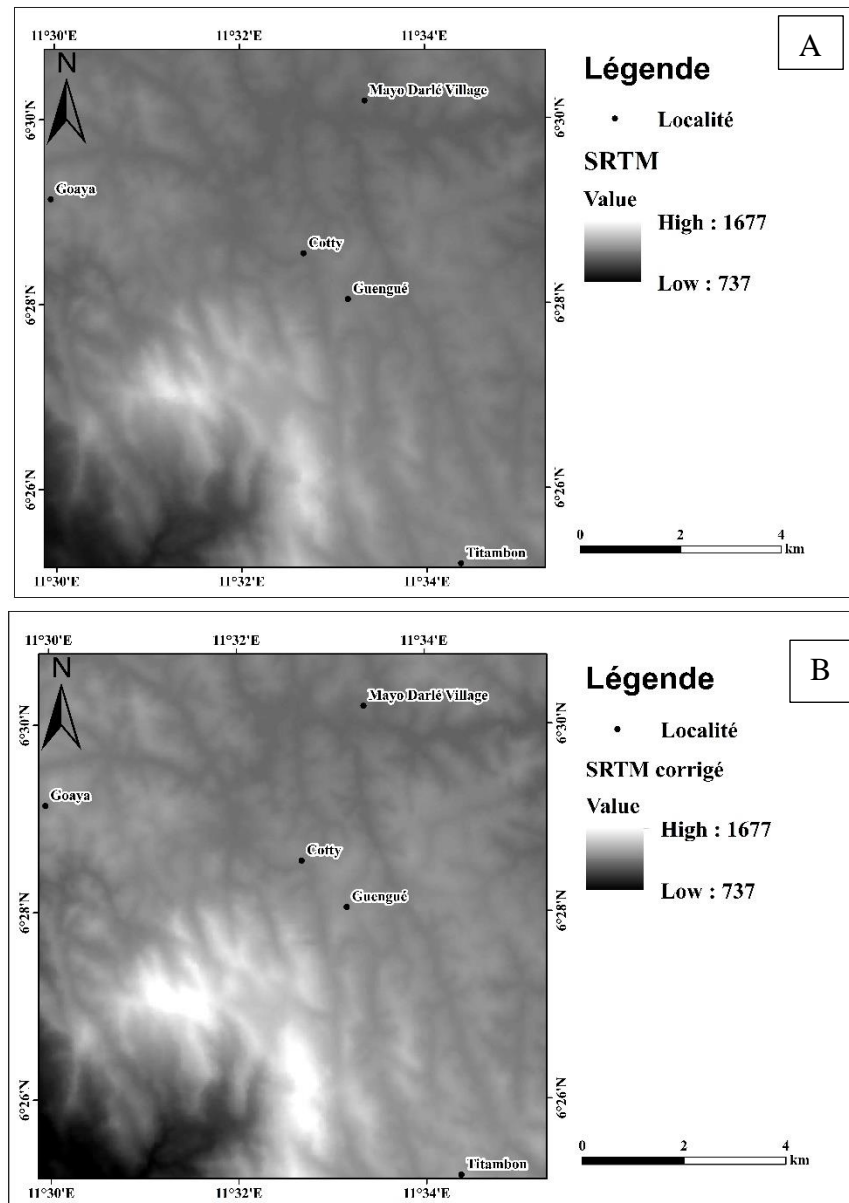


**Figure 15** : Image ASTER 321 avant correction (A) et image ASTER 321 après correction (B)

#### 3.1.2 Prétraitement du SRTM

La présence des dépressions (fig.16A) généralement due à des aberrations de mesures peuvent perturber les résultats lors du calcul de ses produits dérivés (pentes, altitudes,

drainage, etc.). L'analyse visuelle (fig.16.B) montre une différence significative, l'algorithme de correction a parfaitement comblés des vides, les altitudes élevées ont été rehaussées et la profondeur réelle des vallées a été révélée. Après que l'image soit corrigée, les informations relatives à la zone d'étude ont été extraites telles que les points de hautes altitudes (sommets clairs) et de basses altitudes (sombres) apparaissent plus nettement



**Figure 16 :** Correction des aberrations sur l'image SRTM. A) image avant correction ; B) image après correction.

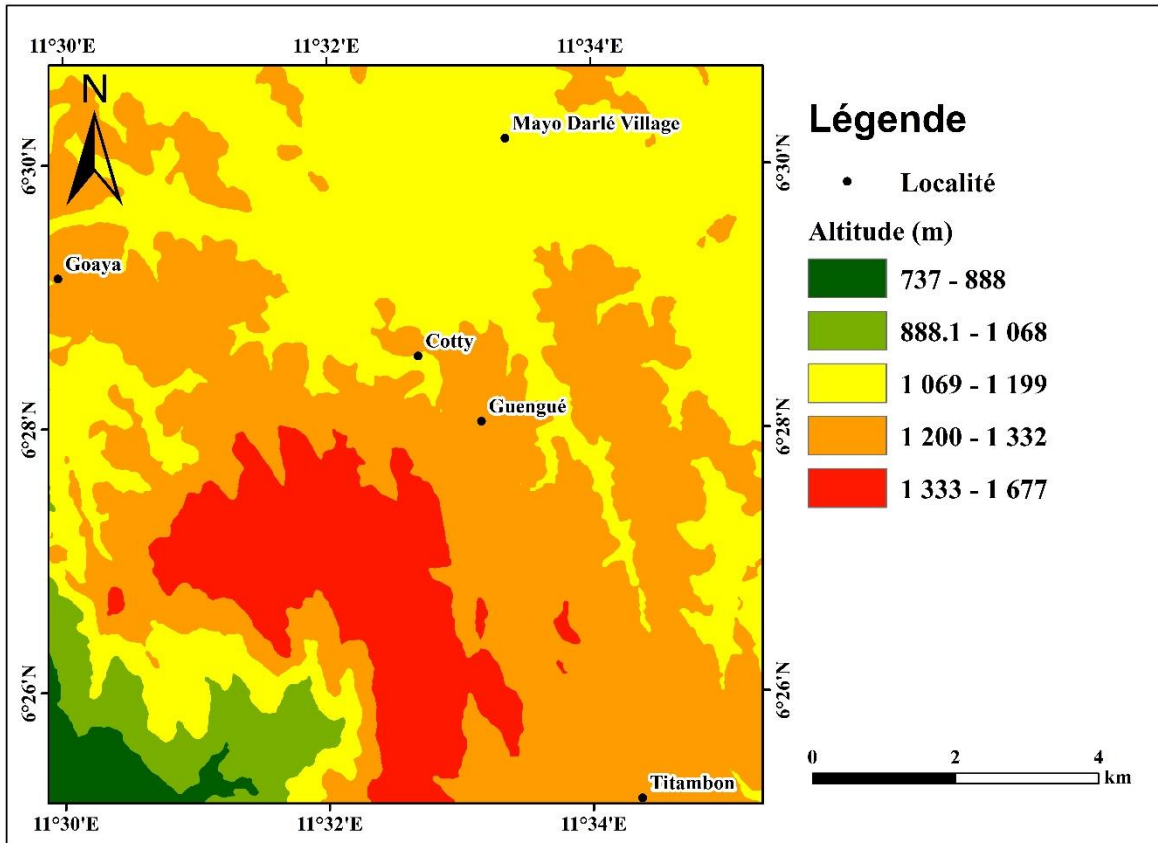
## **3.2 Traitement et extraction des paramètres**

### **3.2.1 Extraction des paramètres morphométriques de terrain**

Plusieurs indices géomorphologiques (altitude, pente, exposition et courbure du relief densité de drainage) ont été extraits des images SRTM et sont liés aussi bien à la géologie qu'aux potentialités en cassitérite de la région de Mayo-Darlé.

#### **3.2.1.1 L'altitude**

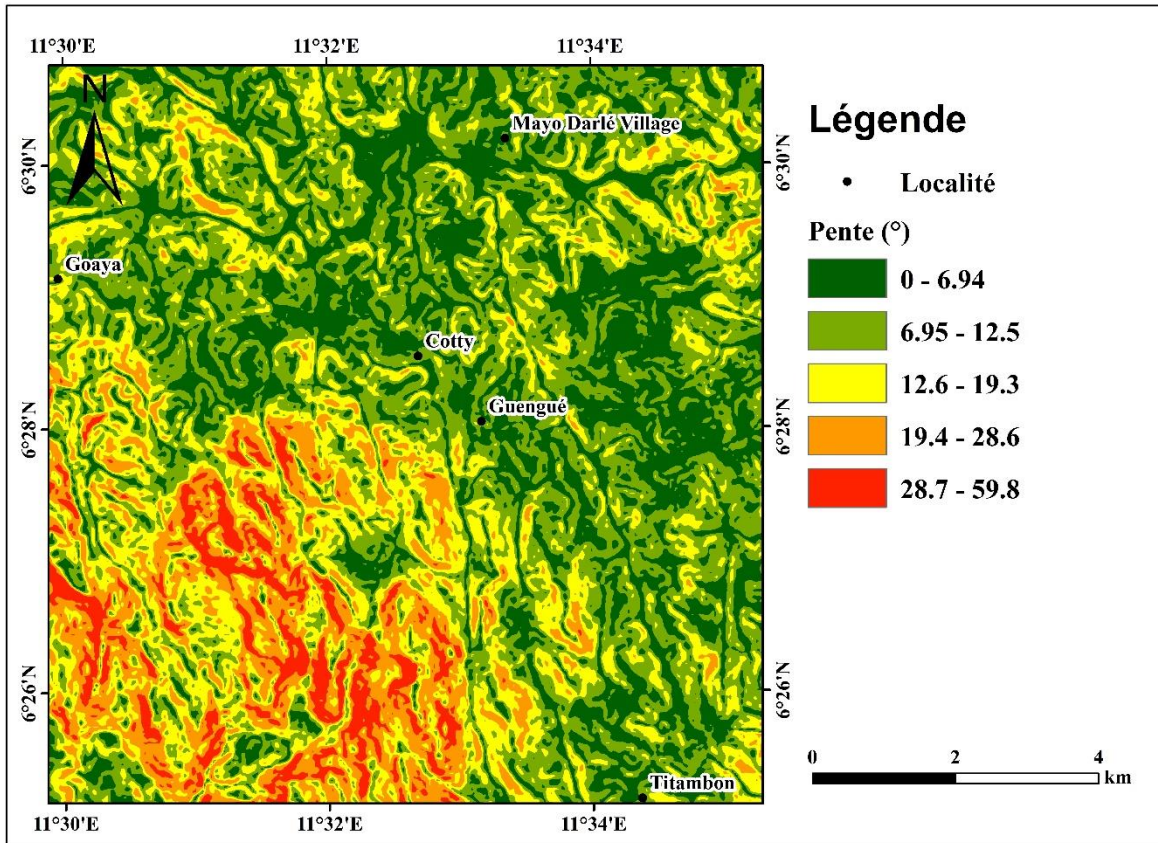
La carte d'élévation obtenue (fig.17) montre la répartition en 05 classes sur la zone d'étude. Ici, l'altitude varie entre 737 et 1677 m. Les très faibles, faibles et moyennes altitudes couvrent respectivement 6,75% ; 6,18% et 39,22% de la zone d'étude ce qui présente tour à tour des atouts très favorables, favorables et plus ou moins favorables pour la présence des cassitérites alluvionnaires. Les fortes et très fortes altitudes quant à elles couvrent respectivement 38.26% et 9.59% de la zone d'étude et ne présentent aucun atout favorable pour les dépôts de cassitérites alluvionnaires.



**Figure 17 :** Carte des altitudes de la zone d'étude (extrait de l'image SRTM de Mayo-Darlé).

### 3.2.1.2 Pente

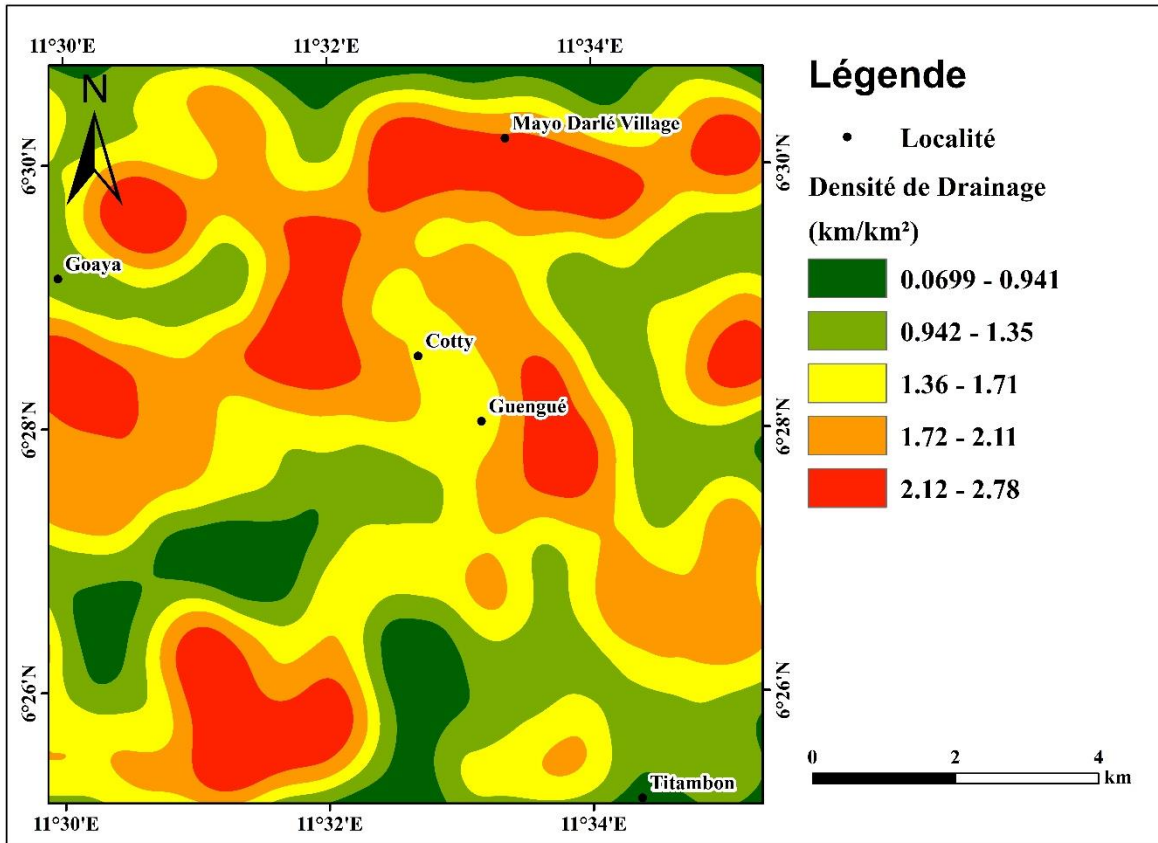
La répartition spatiale **montre** après examen que les pentes varient de  $0^{\circ}$  à  $59.77^{\circ}$  (fig.18). Elles ont été aussi classifiées en cinq (05) classes ; les pentes très faibles (30,10 %), faibles (34,95 %), moyennes (20,19 %), fortes (10,75 %) et très fortes (20,19 %). Les zones de très faibles (et faibles) et moyennes pentes se rencontrent dans les basses et moyennes altitudes et les fortes (et très fortes) pentes se trouvent vers les hautes (et très hautes) altitudes. En effet dans les zones de faibles (et très faibles) et moyennes pentes, le ruissellement des eaux étant faible, donne plus de temps à celles-ci de s'infiltrer. L'infiltration des eaux laisse place aux dépôts alluvionnaires qui ne sont autres que ceux des cassitérites. Par contre les pentes fortes (et très fortes) favorisent le ruissellement au détriment de l'infiltration ce qui empêche la sédimentation car les ruissellements à grande vitesse sont un facteur défavorisant les dépôts pour les cassitérites alluvionnaires.



**Figure 18** : Carte de pente de la zone d'étude (extrait de l'image SRTM de May-Darlé).

### 3.2.1.3 Densité de drainage

La densité de drainage de la zone d'étude varie entre 0,06985 et 2,78 km/km<sup>2</sup> (fig.19). Les faibles valeurs de drainage correspondent aux zones dépourvues d'écoulement, alors que les fortes valeurs présentent une grande concentration des eaux. Les zones faiblement drainées sont dans les régions où le substratum est perméable. Ces dernières enregistrent un faible taux de ruissellement et constituent donc des zones par excellence d'infiltration des eaux qui favorisent les dépôts de cassitérites alluvionnaires. Les zones très faibles, faibles, moyennes couvrent respectivement 8,88%, 29,93% et 20,19% alors que fortes et très fortes couvrent respectivement 10,75% et 4,01% qui n'offrent presque pas d'atouts favorables pour les dépôts de cassitérites alluvionnaires.

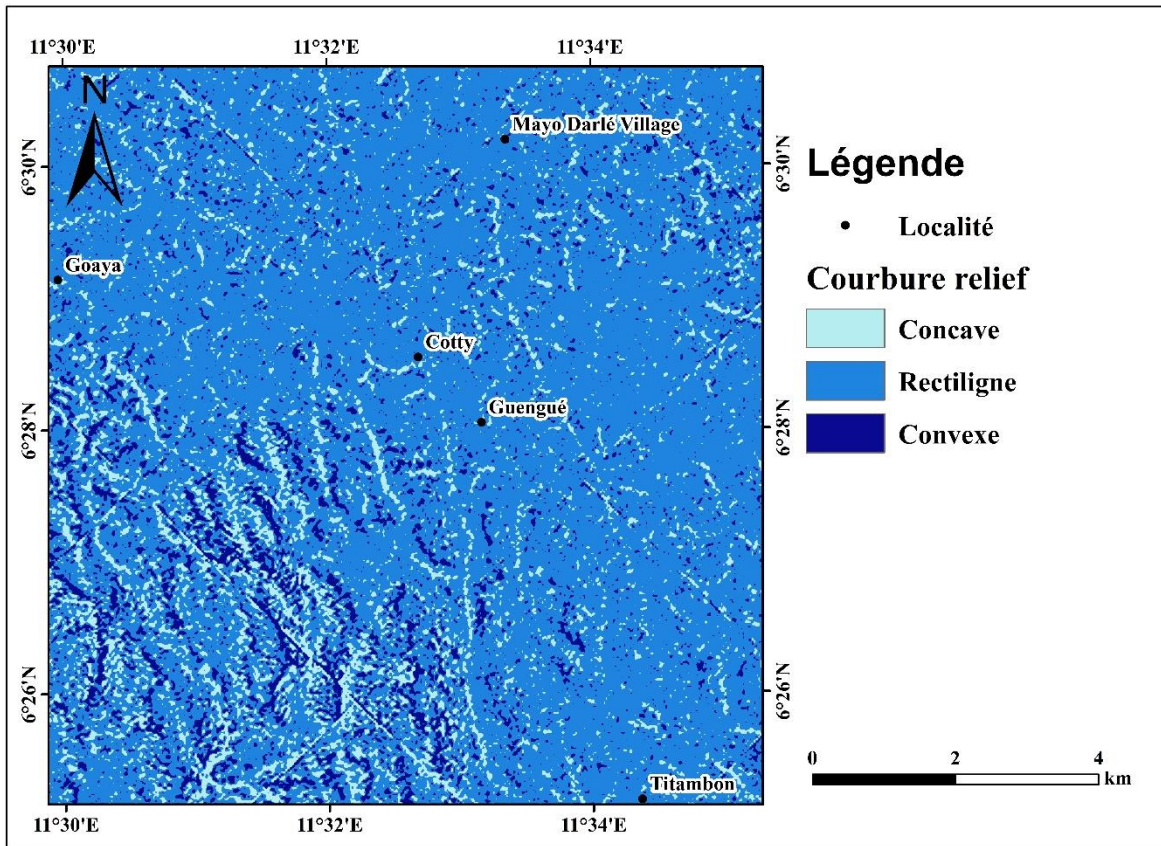


**Figure 19 :** Carte de densité de drainage de la zone d'étude (extrait de l'image SRTM de Mayo-Darlé).

### 3.2.1.4. Courbure du relief

La courbure (fig.20) est aussi un paramètre important dans la potentialité de la ressource en cassitérite car elle définit la concavité ou convexité du relief. Les zones concaves sont les plus favorables à la rétention des cassitérites alluvionnaires et propices au dépôt. La courbure du relief montre la divergence et la convergence durant l'écoulement des eaux affectant ainsi le processus d'érosion. Ce facteur est extrait à partir de ArcGIS. La courbure a été classifiée en trois (03) catégories. Les zones concaves couvrent 13,80% de la zone d'étude par contre les zones rectilignes et convexes qui couvrent respectivement 71,74% et 14,45% de la zone d'étude et ne présentent que des atouts plus ou moins et presque pas favorables pour les dépôts de cassitérites alluvionnaires respectivement. Les valeurs négatives renvoient aux

zones convexes, les valeurs nulles sont rectilignes et les valeurs positives correspondent aux zones concaves.



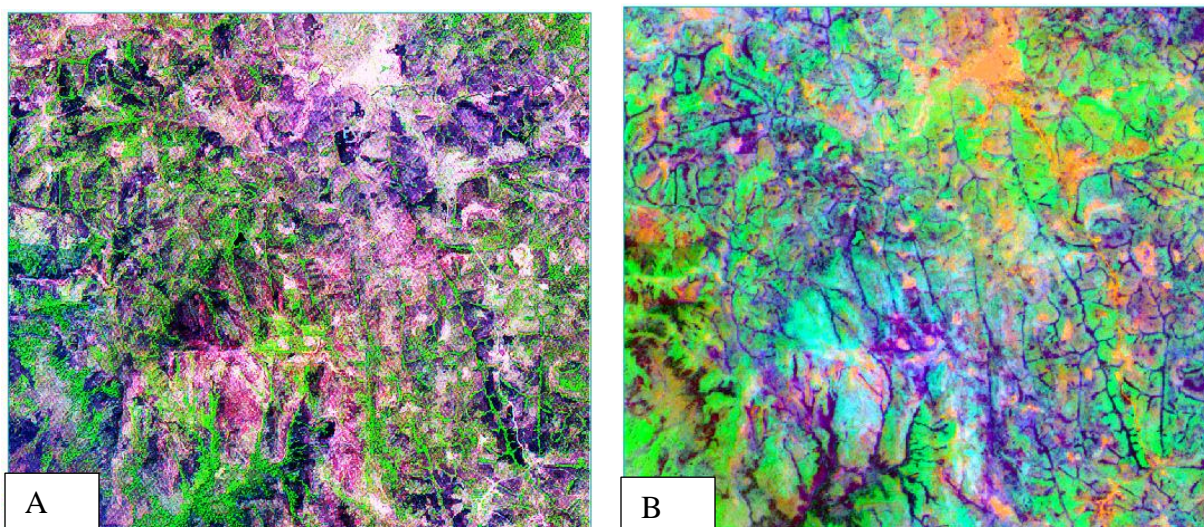
**Figure 20** : Carte de courbure-relief de la zone étudiée (extrait de l'image SRTM de Mayo-Darlé).

### 3.2.2 Extraction des paramètres structuraux

#### 3.2.2.1 Analyse en composante principale (ACP)

Dans le souci de rechercher les informations structurales les techniques d'ACP ont été appliquées à l'image ASTER. L'ACP a permis de regrouper le maximum d'informations car l'image présente des détails absents d'image corrigée. Les informations cachées par la végétation et les bâtis sont apparues (fig.21).

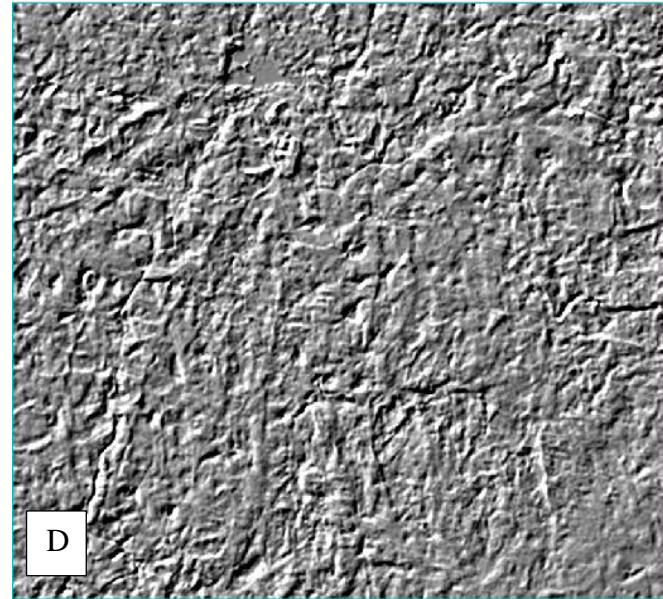
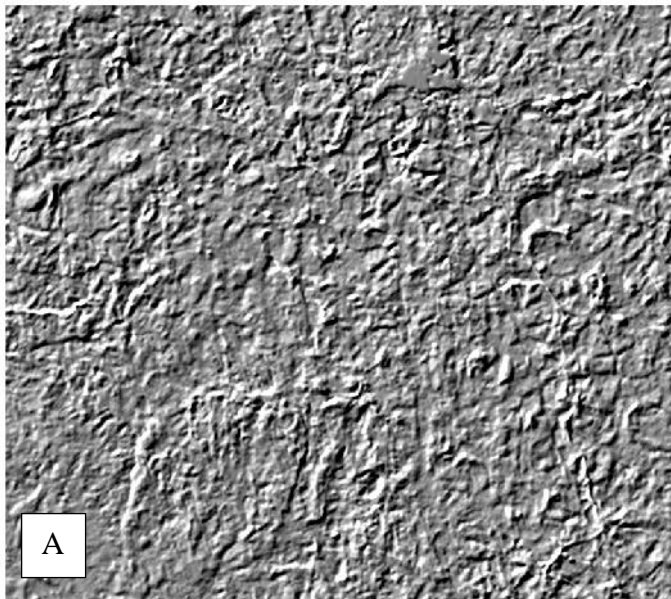
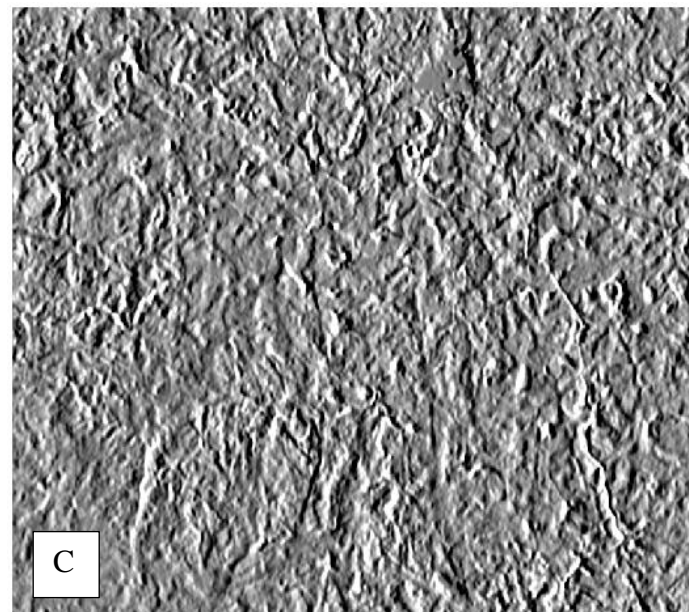
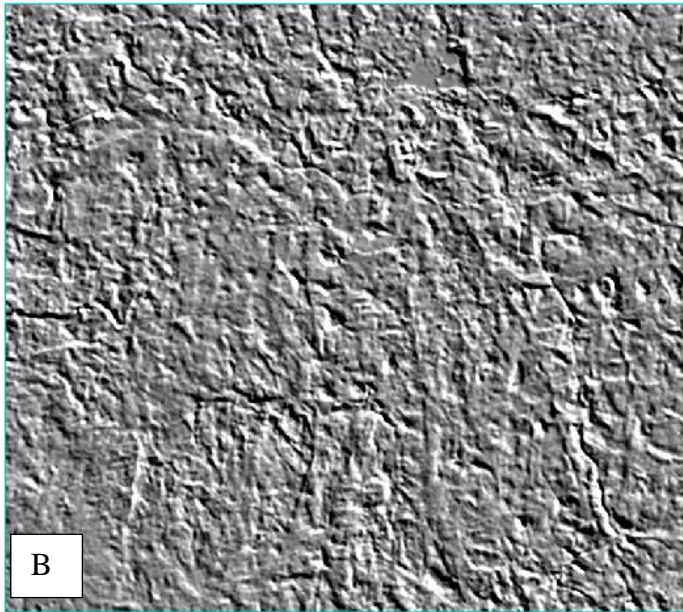
À la suite de l'ACP, les techniques de filtrage spatial ont été également appliquées. Ceci a permis de rehausser les structures linéaires. Ces filtres (Sobel) rehaussent les linéaments ou les contours perpendiculaires à leur direction de convolution.



**Figure 21:** Image ASTER 321 corrigée avant (A) et après (B) l'ACP

### 3.2.2.2 Filtre de Sobel

Après les ACP, les filtres directionnels de Sobel de taille  $7 \times 7$  (fig.22), ont été appliqués afin de discriminer et cartographier l'essentiel des linéaments dans la zone d'étude. Ces filtres accentuent les discontinuités lithologiques et structurales dans les quatre directions N-S, NESW, NW-SE, E-W (Jourda, 2005 ; Youan Ta, 2008 ; Jofack, 2016). Ces filtres sont des excellents outils de discrimination d'objets rectilignes et plus ou moins curvilignes de grande taille et facilitent l'extraction des linéaments sur les images qu'ils traitent.

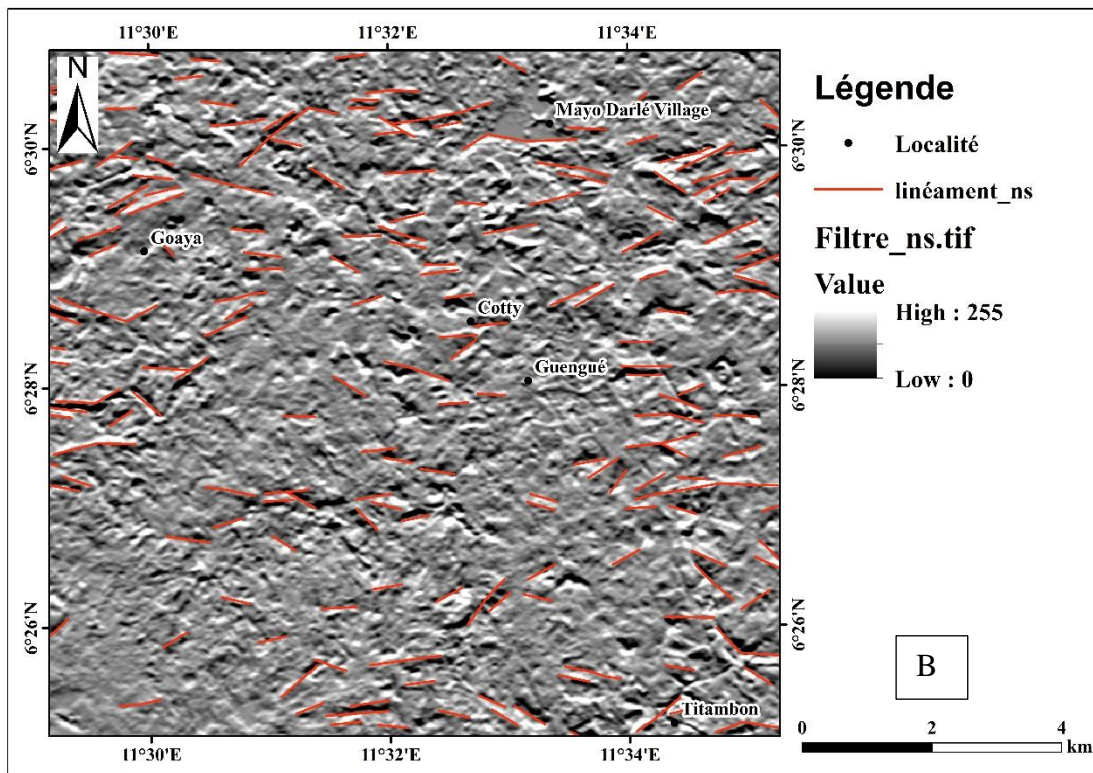
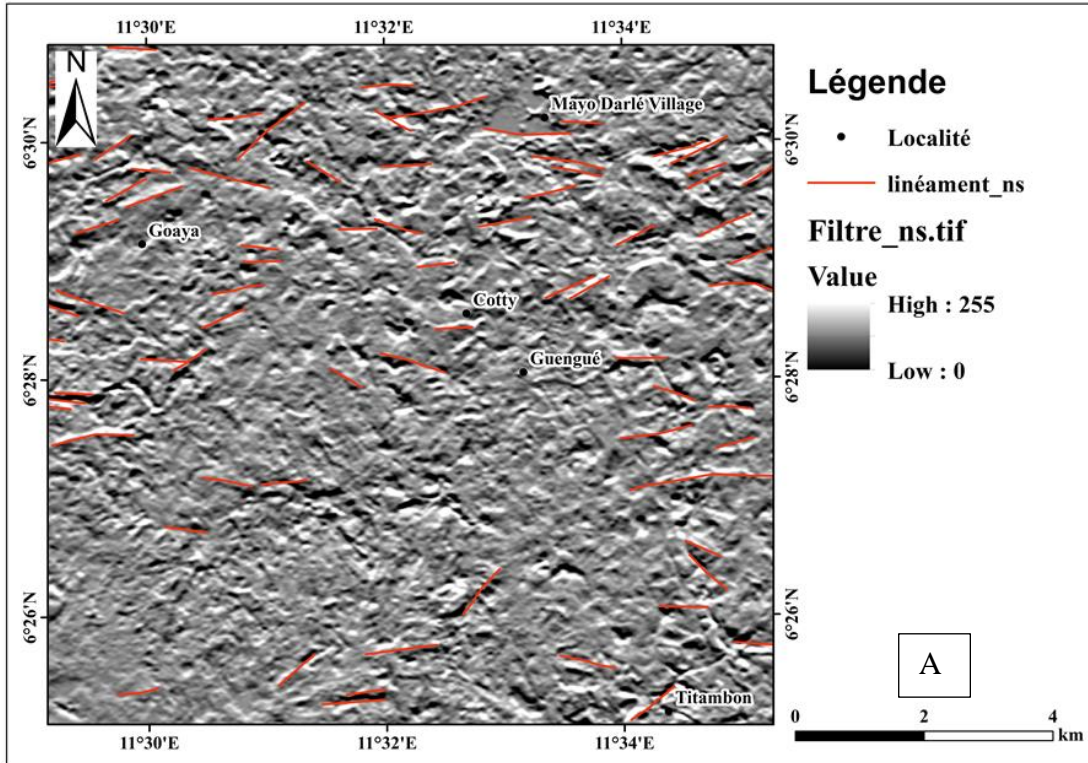


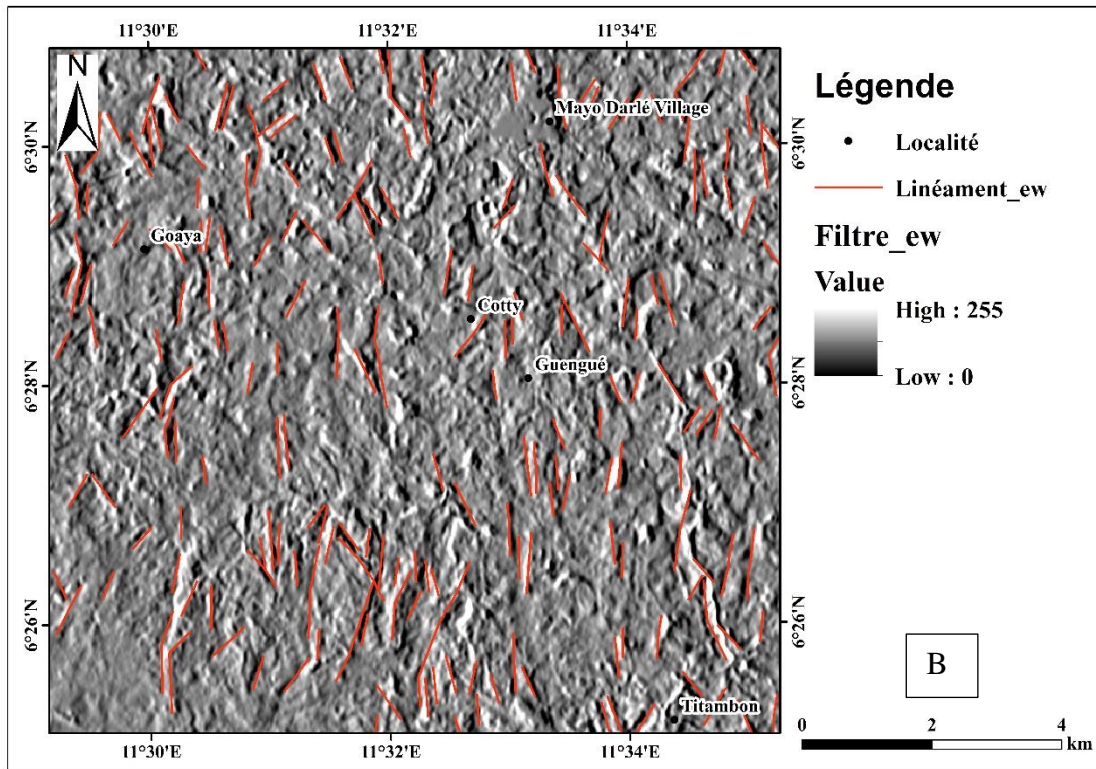
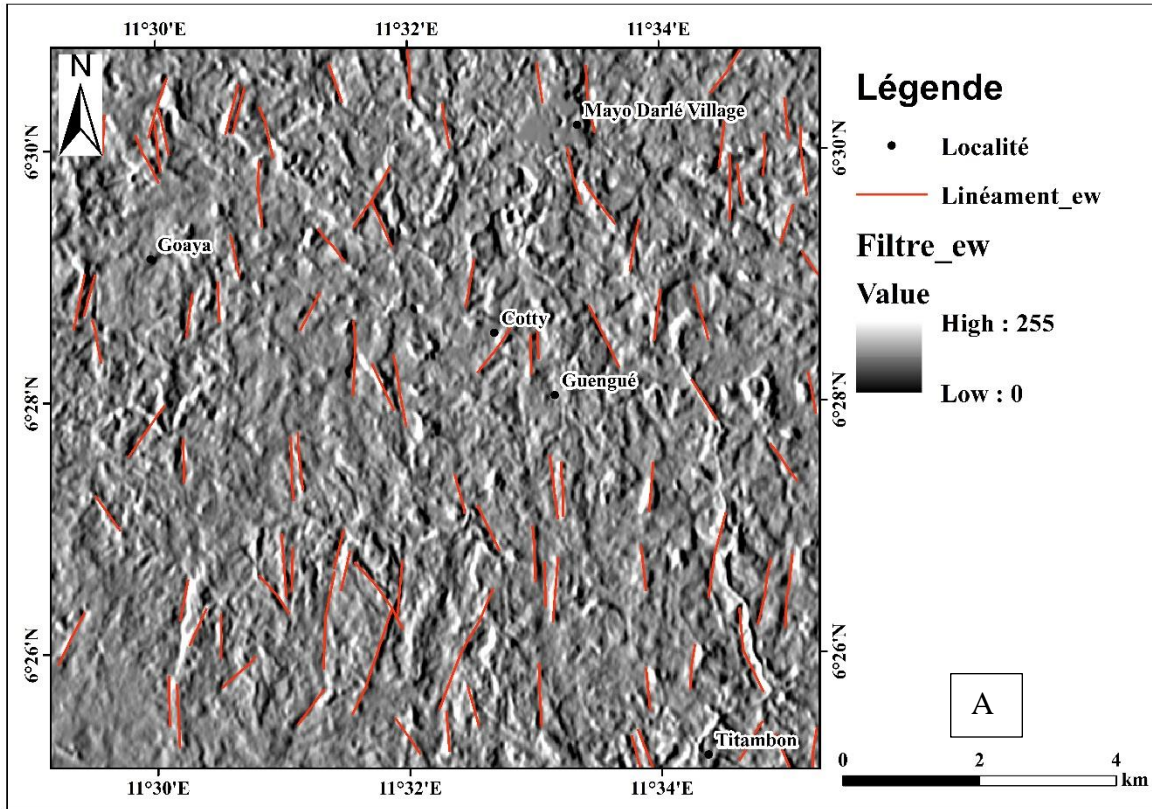
**Figure 22** : Filtre N-S (A) ; E-W (B) ; NE-SW (C) ; NW-SE (D)

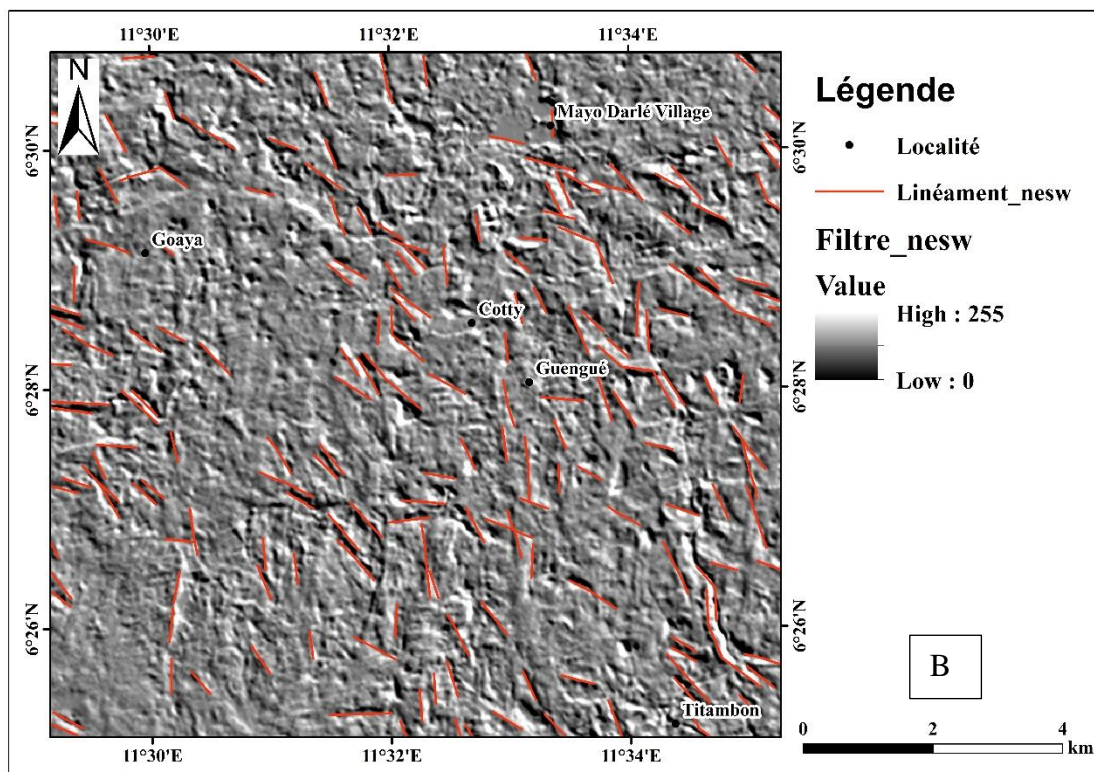
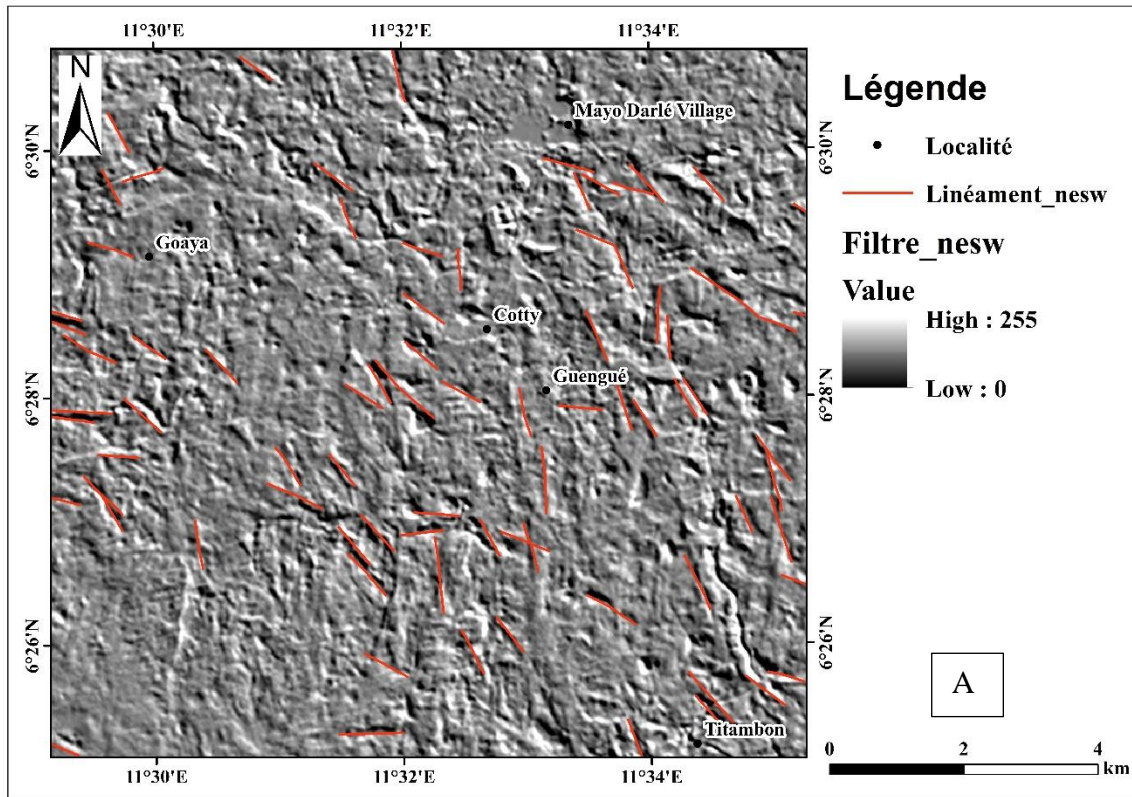
### 3.2.2.3 Extraction et validation des linéaments

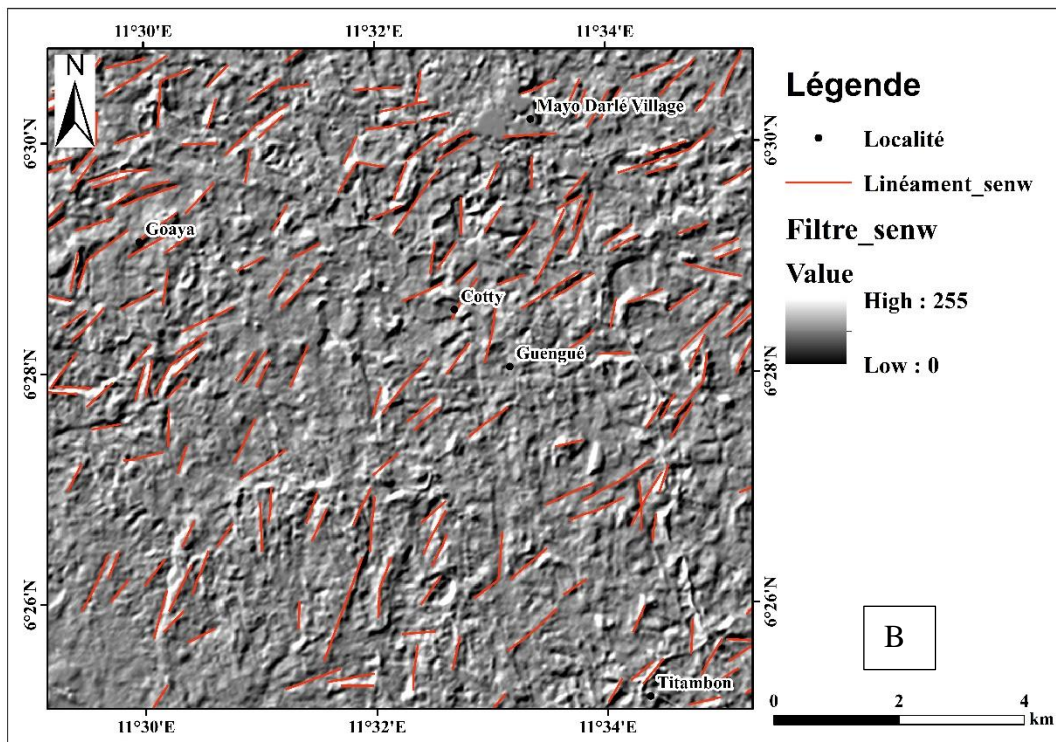
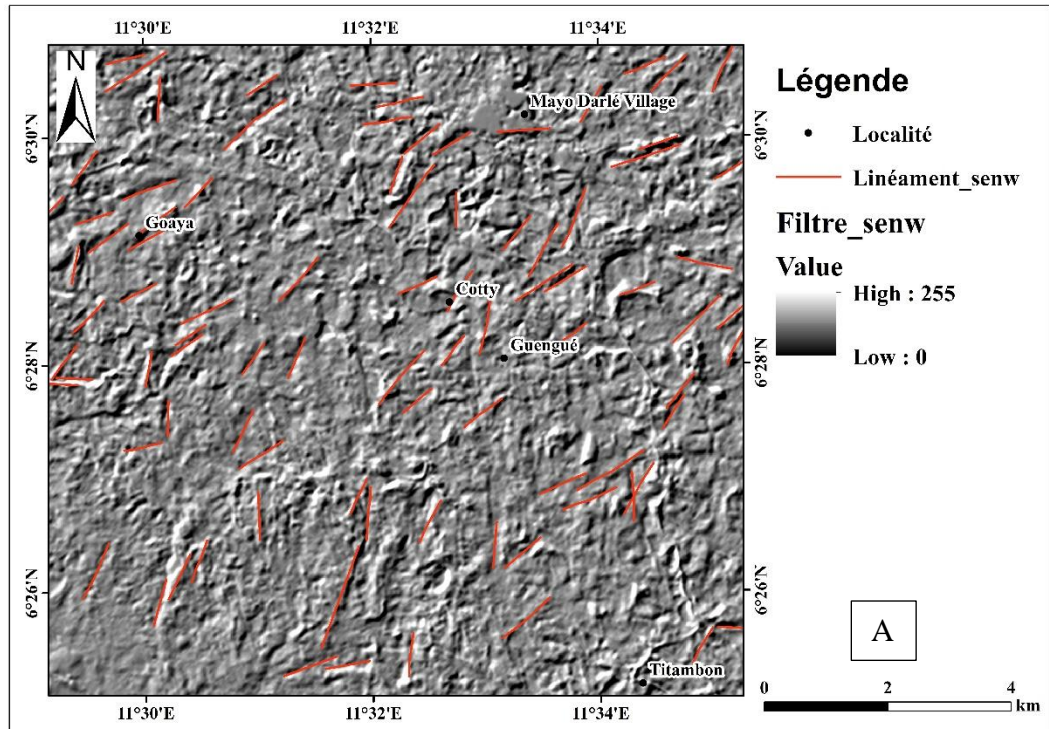
L'extraction des linéaments est la dernière étape du traitement. L'identification des linéaments dans les images satellitaires est tributaire de la capacité qu'à l'utilisateur à détecter les légères variations de la réflectance associée à ces phénomènes géologiques. Les images des filtres obtenus ont été importées dans le logiciel ArcGIS. Les linéaments ont été extraits automatiquement, corrigés manuellement sur chaque filtre et ont été combinés à la fin de l'extraction. Les éléments linéaires d'origines anthropiques (routes et pistes) ont été superposés aux linéaments afin d'éviter de les considérer. Les linéaments extraits sur chaque filtre ont une direction perpendiculaire à celle de la direction de convolution du filtre. Les linéaments de longueurs inférieures à 100 m ont été supprimés pour éviter de biaiser les résultats. De ces images ont été extraits les linéaments. Plus de 853 segments de droites correspondant à des fractures potentielles ou contacts géologiques. L'aspect fracturé de la zone témoigne de l'intensité des mouvements tectoniques qui ont eu lieu dans la zone. L'utilisation de la carte géologique, la carte topographique et la carte hydrographique ont permis de valider les résultats des linéaments obtenus.

Les linéaments extraits automatiquement puis corrigés, ont été par la suite complétés par l'extraction manuelle. Les structures linéaires négligées par le logiciel ont été par numérisation manuelle.



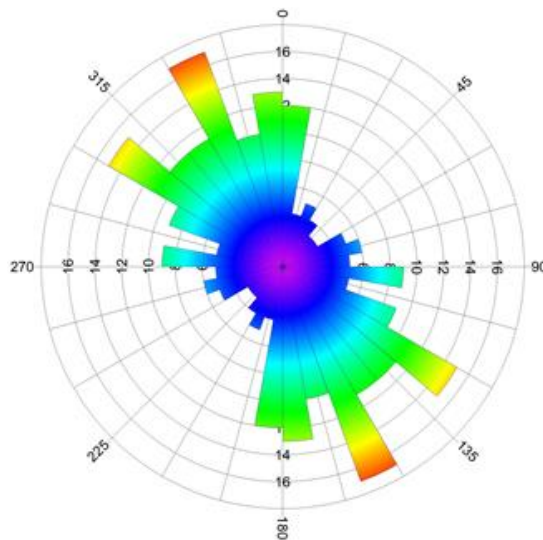
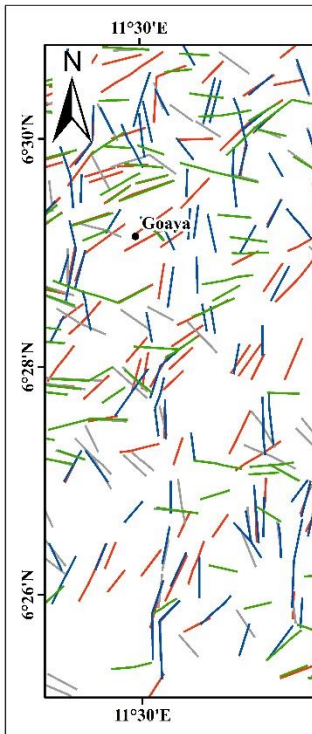






**Figure 23 :** Extraction des linéaments sur les filtres NS, EW, NESW, SENW (A : extraction automatique, B : extraction automatique + manuelle)

Les linéaments extraits des différents filtres ont servi à l'établissement de la carte finale des linéaments de la zone d'étude ci-dessous. L'analyse de la rosace de direction obtenue montre une direction majeure des linéaments dans le sens SSE-NNW. Des directions secondaires sont orientés dans le sens SE-NW et N-S.



**Figure 24 :** Carte finale des linéaments de la zone d'étude et la rosace des directions (extrait de l'image ASTER).

### 3.2.2.4 Densité fracturation

La densité de fracturation (fig.25) issue de cette carte varie de 0 et 6,202 km/km<sup>2</sup> et est également classifiée en cinq (05) classes. Les zones très fortement (et fortement) fracturées couvrent respectivement 1,35% et 12,23% de la zone d'étude et se situent principalement au niveau des hautes altitudes ce qui est un atout favorable pour les filons de cassitérites. Les zones moyennement, faiblement (et très faiblement) fracturées couvrent respectivement 33,03% ; 36,10% et 17,28% de la zone d'étude et ne présentent pas d'atouts favorables pour les filons de cassitérites car pour la conception structurale plus les linéaments sont présents plus il y a des fortes chances d'avoir les cassitérites filoniennes.

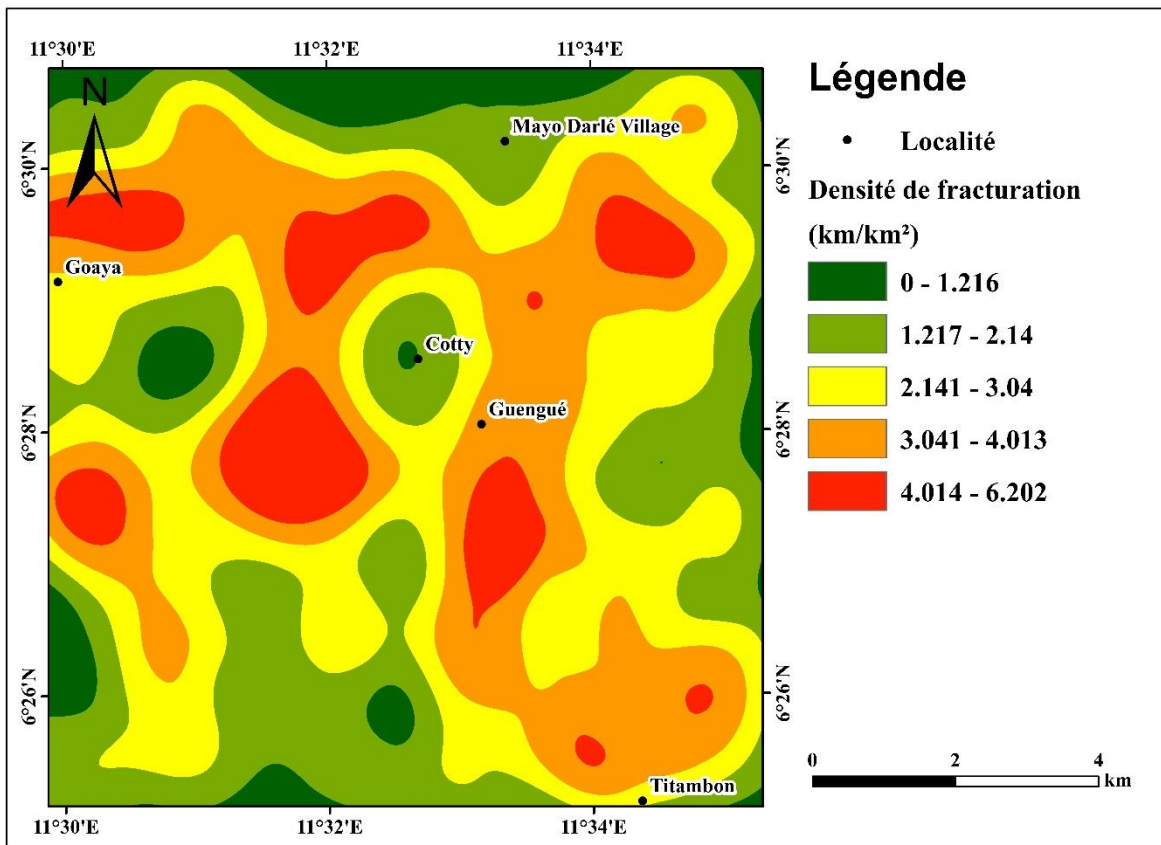


Figure 25 : Carte de densité de fracturation (extrait de l'image ASTER de Mayo-Darlé).

### 3.3 Classification et pondération des résultats

La classification des critères de pondération est une phase tout aussi délicate et doit être minutieusement menée. Le choix de ces classes doit tenir compte de la variance des données et s'inspirer de la classification adoptée lors des travaux antérieurs (Youan Ta, 2008 ; Youan Ta et al., 2006 ; Adon, 2015). Pour l'importance de chaque paramètre et de son interdépendance avec les autres paramètres dans la favorabilité en cassitérite par rapport aux différentes classes, il leur a été affecté un poids et un code. Ainsi le poids de 1 est attribué à un paramètre lorsqu'il présente une interdépendance majeure avec un autre paramètre tandis que pour une interdépendance mineure, le poids est équivalent à 0,5. Le poids final de chaque paramètre correspond à la somme des poids déterminés sur la base des interdépendances (Sarah et al., 2006).

**Tableau 5** : Interdépendance entre paramètres

	<b>Pente</b>	<b>Altitude</b>	<b>Drainage</b>	<b>Courbure</b>	<b>Fracturation</b>
Pente	/	1	1	0.5	0.5
Altitude	1	/	0.5	0.5	0.5
Drainage	1	0.5	/	1	0.5
Courbure	0.5	0.5	0.5	/	0.5
Fracturation	0.5	0.5	1	0.5	/
<b>Poids</b>	<b>3</b>	<b>2.5</b>	<b>3</b>	<b>2.5</b>	<b>2</b>

#### **Pondération des critères**

La pondération des critères de décision a été effectuée suivant la méthode de comparaisons par paire. La méthode d'analyse multicritère utilisée est celle développée par Shaban (2001) pour l'exploration des ressources. Elle a été utilisée par plusieurs auteurs notamment Dibi (2008) et Youan Ta et al. (2011) pour déterminer de façon cohérente les poids des critères de décision. Elle permet de produire des coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1. La matrice générée par la comparaison par paire sur l'échelle proposée par Sarah.

À partir de cette échelle descriptive et de son poids, on calcule donc les indices et les pourcentages d'influence de chaque paramètre dans sa part de contribution à la formation des

gisements de cassitérite. Ces indices et ces pourcentages traduisent ainsi le degré d'influence de chacun des paramètres sur la favorabilité en cassitérite.

**Tableau 6 : Influence des paramètres vis à vis des autres**

<b>Paramètre</b>	<b>Valeurs</b>	<b>Échelle descriptive</b>	<b>Code</b>	<b>Poids</b>	<b>Indice</b>	<b>Pourcentage</b>
Pente	0 - 7.032	Très faible	10	3	30	<b>25.84</b>
	7.033 – 12.89	faible	8		24	
	12.9 – 20.16	moyenne	5		15	
	20.17 – 29.53	forte	3		9	
	29.54 - 59.77	Très forte	1		3	
	<b>Total</b>				<b>81</b>	
Altitude	737 -888	Très faible	10	2.5	25	<b>21.53</b>
	888 - 1068	faible	8		20	
	1068 - 1199	moyenne	5		12.5	
	1200 - 1332	forte	3		7.5	
	1333 - 1677	Très forte	1		2.5	
	<b>Total</b>				<b>67.5</b>	
Drainage	0.06985 – 0.612	Très faible	1	3	3	<b>22.64</b>
	0.6121 – 1.154	faible	3		9	
	1.155 - 1696	moyenne	5		15	
	1.697 – 2.238	forte	8		24	
	2.239 – 2.78	Très forte	10		30	
	<b>Total</b>				<b>71</b>	
Courbure	(+)	Concave	10	2.5	25	<b>12.76</b>
	0	Rectiligne	5		12.5	
	(-)	Convexe	1		2.5	
	<b>Total</b>				<b>40</b>	
Fracturation	0 – 1.24	Très faible	1	2	2	<b>17.22</b>
	1.241 – 2.481	faible	3		6	
	2.482 – 3.721	moyenne	5		10	
	3.722 – 4.962	forte	8		16	
	4.963 – 6.202	Très forte	10		20	
	<b>Total</b>				<b>54</b>	
<b>Total</b>					<b>313.5</b>	<b>100</b>

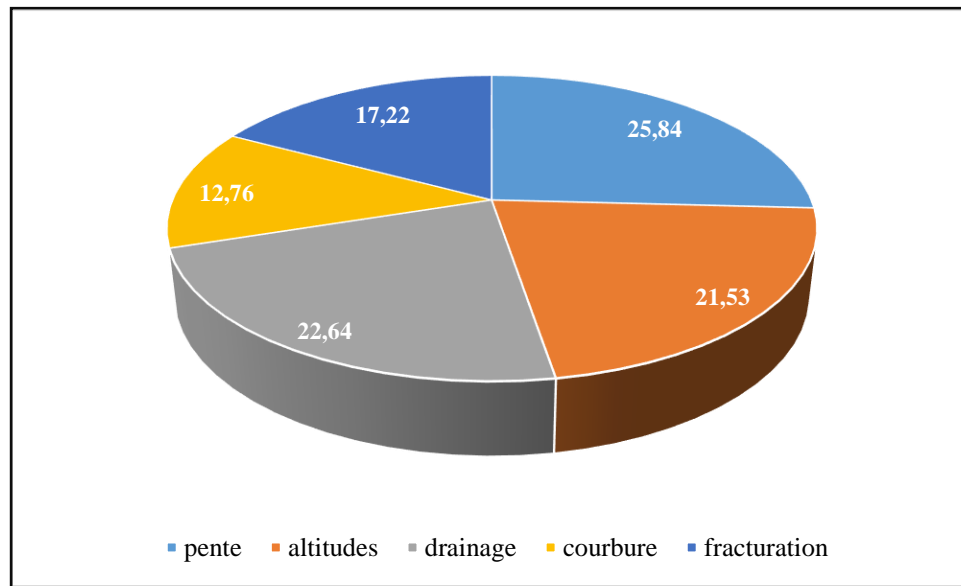
Le tableau ci-dessus présente les valeurs des coefficients des différents paramètres qui indiquent les zones influençant grandement la potentialité en cassitérite. Ainsi la relation entre Densité de fracturation et les fortes potentialités montre que ces dernières sont à la fois

moyennes, fortes et très fortes densité de fracturation. Les zones de moyennes altitudes sont potentiellement riches en cassitérite, de même que pour des densités de drainages allant de très faibles à moyennes. L'analyse montre que les pentes moyennes, faibles et très faibles suffisent pour qu'une zone soit qualifiée de potentiellement riche. Pour obtenir la carte de potentialité en cassitérite l'équation 3 a été intégrée dans le SIG :

$$PC = 25.84Pt + 21.53Alt + 22.64Dd + 12.76Cb + 17.22Df \quad (3)$$

Avec PC= potentialité en cassitérite ; Pt = pente ; Alt =altitude ; Dd =densité de drainage ; Cb = courbure du terrain ; Df = densité de fracturation.

D'après cette étude il en ressort que certains paramètres ont plus d'impact par rapport aux autres d'où le diagramme suivant.

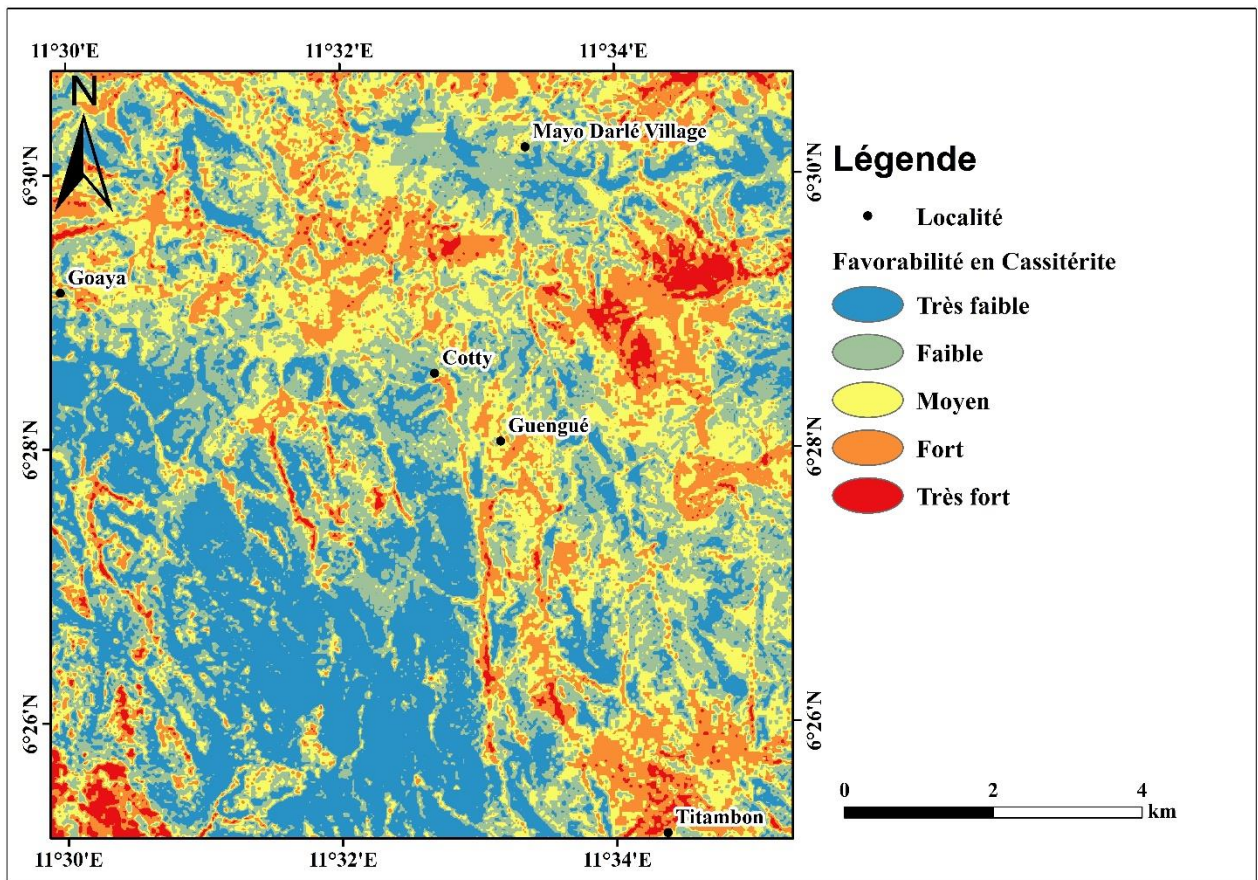


**Figure 26 :** Pourcentage d'impact de chaque facteur

### 3.4 Cartographie de la favorabilité à la cassitérite

La cartographie de la favorabilité à la cassitérite de Mayo-Darlé présentée à la (fig.27) montre 05 classes (très faible, faible, moyenne, forte, très forte), la distribution spatiale des zones potentiellement riche en cassitérite dans la Mayo-Darlé. L'examen de la carte de favorabilité à la cassitérite montre que les classes très faibles, faibles et moyennes sont dominantes. Ces zones dominantes représentent 76.27% de la zone d'étude. Les classes fortes et très fortes ne représentent que 23.72% de Mayo-Darlé. Ce qui montre que la localisation de

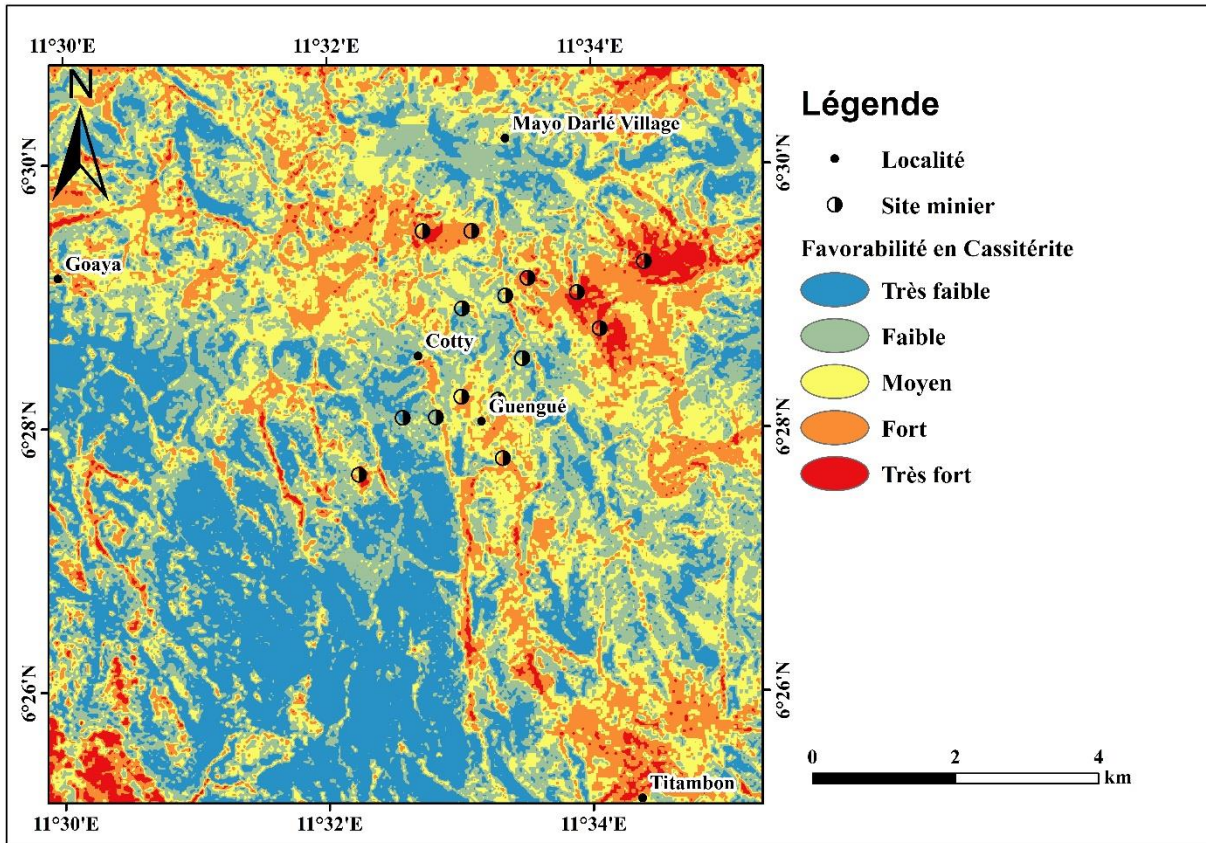
la cassitérite des sites riches en cassitérites reste un défi. Les sites potentiellement riches sont localisés au SE de la localité de Mayo Darlé, au SW et NW de la zone d'étude.



**Figure 27 :** Carte de favorabilité en cassitérite de la zone d'étude

### 3.5 Validation de la carte de favorabilité en cassitérite

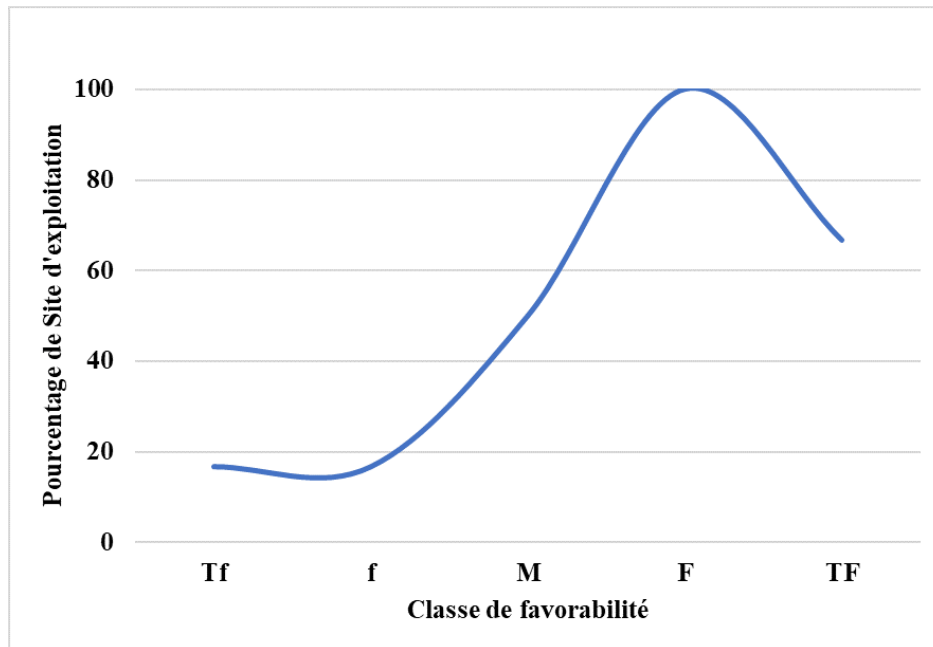
La cartographie de la favorabilité en cassitérite de Mayo-Darlé présentée à la figure 28, montre en cinq classe (très faible, faible, moyenne, forte, très forte), la distribution spatiale des zones potentiellement riches et exploitées en cassitérite dans le Mayo-Darlé.



**Figure 28 :** Carte de favorabilité en cassitérite d'un site minier dans la zone d'étude

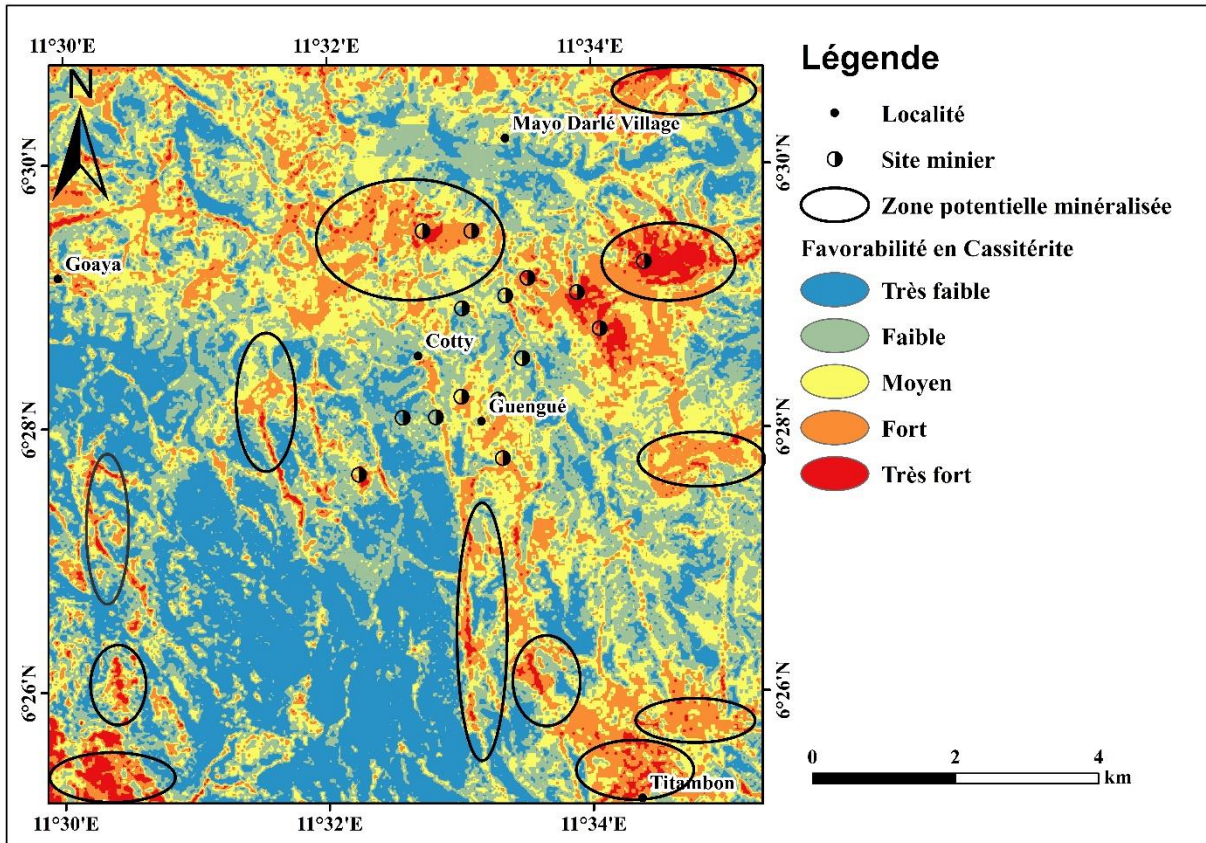
La courbe de tendance obtenue montre une courbe proche de la courbe théorique pour une bonne prédiction. Sur les 15 sites identifiés, 01 site tombe sur les classes très faibles (Tf), 01 site tombe sur les classes faibles (f), 03 sites tombent sur les classes moyennes (M), 06 sites tombent sur les classes fortes (F) et 04 sites tombent sur les classes très fortes (TF). Ceci montre une bonne prédiction du modèle pour la recherche de la cassitérite dans la zone d'étude.

Ces résultats montrent qu'il existe une forte confusion entre les classes moyennes, fortes et très fortes. Malgré cela la prédiction obtenue est jugée bonne, reflète la réalité du terrain et respecte la logique des conditions environnementales de zone d'étude.



**Figure 29** : Graphe de la courbe de tendance des classes de sensibilité de la carte de potentialité en cassitérite

La bonne capacité du modèle à prédire la potentialité en cassitérite permet d'identifier plusieurs autres sites propices à l'exploitation de la cassitérite dans la zone d'étude telle que montre la figure 28.



**Figure 30** : Carte des zones potentielles minéralisées dans la zone d'étude

### 3.6 Discussion

#### 3.6.1 Facteurs contrôlant la potentialité

L'analyse et la bonne cartographie de chaque variable (contrôlant la potentialité en cassitérite dans la commune) sont indispensables dans la cartographie thématique des zones de fortes potentialités en cassitérite. Ces critères (pente, altitude, densité de drainage, densité de fracturation, courbure du relief) ont été choisis dans plusieurs études pour la cartographie thématique des potentialités en cassitérite. L'importance de ces critères pour la compréhension du fonctionnement des cassitérites a été étudiée. L'utilisation de l'AM a permis de déterminer le poids des différents facteurs contrôlant la potentialité en cassitérite, sur la base des travaux antérieurs. Malgré que cette méthode soit subjective, elle a fourni de bon résultat.

### **3.6.2 Apport de la télédétection et des SIG**

La télédétection et les SIG ont été d'une aide précieuse à la caractérisation des phénomènes géospatiaux faisant intervenir plusieurs paramètres. La méthode utilisée AM a apporté une contribution incontestable dans la gestion des ressources en cassitérite et les prises de décision en vue du développement durable. Ces outils ont assuré la parfaite synthèse de plusieurs paramètres environnementaux et hydrogéologiques. Les résultats obtenus dans la présente étude s'apparentent à ceux obtenus par plusieurs études dans le monde. Ces résultats démontrent l'apport indéniable de la télédétection et des SIG dans la prise de décision. Aussi, cette étude apportera une contribution aux succès des prochaines campagnes d'exploration minière dans la commune de Mayo-Darlé.

Cependant, la qualité parfois médiocre et la quantité insuffisante des données dans la réalisation de l'analyse multicritère conduisent à des résultats souvent erronés. En effet, pour l'élaboration des critères de décision, si les données sont peu nombreuses et mal réparties sur la zone d'étude, les interpolations produisent des estimations accompagnées d'erreurs. En dépit de toutes ces insuffisances, la méthode utilisée dans le cadre de cette étude a produit de bons résultats.

### **Conclusion**

Plusieurs paramètres influencent les potentialités en cassitérite dans le Mayo-Darlé. Dans cette étude cinq ont été distingués. Ce sont : l'altitude, la pente, la densité de drainage, la densité de fracturation et la courbure du relief. La pondération des critères montre que les paramètres les plus importants sont la densité de drainage et la densité de fracturation. La carte de favorabilité en cassitérite montre que les classes très faibles, faibles et moyennes couvrent 76.27% de la zone d'étude et dominent fortement sur les classes fortes et très fortes qui couvrent 23.72%. La validation montre une forte confusion entre les classes faibles et moyennes. Ce qui montre que la région de Mayo-Darlé est potentiellement riche en cassitérite.

L'application de l'analyse multicritères dans l'étude des ressources en cassitérites du Mayo-Darlé a montré son intérêt. Les techniques (télédétection et SIG) ont en effet permis de mieux connaître le potentiel des cassitérites dans le Mayo-Darlé. L'usage de cette carte

pourrait réduire considérablement les pertes de temps pour les futures prospections de la cassitérite dans le Mayo-Darlé où les taux d'exploitation sont encore limités.

## CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

## CONCLUSION GÉNÉRALE ET PERSPECTIVES

L'objectif visé dans le cadre de ce travail était de rechercher les minéralisations de cassitérite dans la localité de Mayo-Darlé (Adamaoua-Cameroun) par une approche cartographique et de la télédétection. La méthodologie utilisée dans ce travail est basée sur l'acquisition et traitement des images satellitaires (SRTM et ASTER). L'utilisation combinée des techniques de prétraitements et de traitements ont conduit au choix et à l'extraction des paramètres d'influence. La spatialisation de ces paramètres a permis de faire une classification des pondérations pour l'élaboration de la carte de potentialité en cassitérite.

Pour se faire le traitement des images SRTM a permis d'obtenir quatre paramètres à savoir, l'altitude, la pente, la densité de drainage et la courbure qui contrôlent la formation des minéralisations secondaire en cassitérite. Le traitement de l'image ASTER a permis d'obtenir un paramètre à savoir, la densité de fracturation qui contrôle la formation des minéralisations primaire en cassitérite dans les filons.

La méthode d'Analyse Multicritère adoptée dans ce travail est basée sur la méthode d'analyse multicritère développée par Shaban (2001). Cette dernière a permis de déterminer de façon cohérente les poids des critères de décision. Elle a permis de déterminer les coefficients de pondération standardisés dont la somme est égale à 1. La matrice générée par la comparaison par paire sur l'échelle est toujours proposée par shaban (2001). Chaque paramètre a été classifié et pondéré afin d'obtenir l'équation de favorabilité de la cassitérite. La pondération des paramètres a montré que les pentes et les altitudes faibles constituent des indices favorables pour les cassitérites alluvionnaires et occupent respectivement

La carte d'altitudes montre que toutes les zones dont les altitudes sont comprises entre 737 et 1068m présentent des indices de favorabilité en cassitérite et sont situées respectivement au Sud-Ouest et à l'Ouest et la carte de pente montre que les zones dont la pente varie de 0 à 12,89° présentent aussi des indices de favorabilité en cassitérite et se situent presque toutes au Sud-Ouest. L'observation de ces deux résultats met en évidence l'interdépendance entre altitude et pente. La réalisation des cartes de densité de drainage et de densité de fracturation et leurs différentes analyses montrent à partir des traitements faits sur les données de MNT /SRTM et ASTER (des ACP et filtrage de Sobel) que les zones de fortes

potentialités en cassitérite sont situées où la densité de drainage est comprise entre 1,697 et 2,78km/km<sup>2</sup>. D'autre part, les zones où la densité de fracturation est comprise entre 3,722 et 6,202km/km<sup>2</sup> présentent des atouts de favorabilité pour les filons de cassitérite. L'observation des différentes cartes appuyée par les analyses met aussi l'interdépendance des deux paramètres. L'observation et l'analyse faites sur la carte de courbure du relief montre que plus elle a une allure concave plus la favorabilité en cassitérite y est, la compilation de ces résultats a permis de recenser 05 classes de favorabilité à savoir la classe très faible, faible, moyenne, forte et très forte qui occupent respectivement 27,24% ;24,77% ;24,26% ;18,25% et 5,47% de la zone d'étude. Les résultats obtenus ont été validés par les travaux de Daniel Essapo et Marcel Ekeddi (2020) ayant montré que la prédiction est bonne. La carte de favorabilité ainsi établie sera utile pour guider les futures campagnes de prospection de cassitérite et d'aménagement des sites d'exploitation.

Pour compléter le travail et améliorer la carte de favorabilité en cassitérite obtenue par la méthode d'AM de la commune de Mayo-Darlé, il serait souhaitable de mener certaines actions :

- Entreprendre des travaux de géophysique pour confirmer les zones à potentialité en cassitérite.
- Faire plusieurs fois les travaux de terrain pour recueillir des informations afin de compléter l'interprétation des images satellitaires, autrement dit les vérités terrain.
- Faire des études géochimiques, pétrographiques, métallogéniques et sédimentaires en vue d'affiner le résultat des cartes
- Réaliser des études de faisabilité et d'impact environnemental

## REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

**Abdessamad E.A., Zine, E.A.E.M., Mustapha, S. (2018).** Utilisation de l'image multispectrale pour l'exploration et la recherche des ressources minérales : état des connaissances et prospection d'un modèle de traitement. European scientific Journal August 2018 edition Vol.14, No .24 ISSN: 1857-7881(Print) e-ISSN 1857-7431.

**Abdullah A., Nassir S., and Ghalob A. (2013).** Landsat ETM-7 for lineament mapping using automatic extraction technics in the SW part of Taiz area, Yemen. Global Journal INC, Vol. 13, N°3, p. 35-38.

**Adon G.C. (2015).** Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de la haute Marahoué (Cote d'Ivoire) : apports des données géospatiales, du modèle hydrologique « Hydrotel » et de l'analyse multicritère. Thèse de Doctorat en télédétection et SIG, Université Félix Houphouët Boigny de Cocody, 177 p.

**Adragna F. (1997).** Interférométrie radar : principes, applications et limitations. Bulletin-Société française de photogrammétrie, Vol.148, pp.15-19.

**Akame, J., Mvondo, J. O., Assatse, T. W., Owona, S., Olinga, J. B., Ottou, E. Messi, J. et Ntomba, S. M. (2014).** Apport des images Landsat-7 ETM+ à l'étude structurale du socle archéen de Sangmélina (Sud Cameroun). Revue française de photogrammétrie et de télédétection, 206 (2014), pp. 15-26.

**Amenta, N., Bernd, M., et Kolluri, D. E. (1998).** "The crust and the betaskeleton: combinatorial curve reconstruction". Graphical Models and Image Processing, Vol. 60, pp.125-135.

**Anonyme A. (2011).** Plan Communal de Développement (PCD) de Mayo-Darlé par la PNDP et la SADER.

**Anonyme B. (2021).** www.cvuc-uccc.com visité le 17-06-2021 à 22h37min.

**Anonyme C. (2017).** Interview du préfet de l'arrondissement de Mayo-Darlé par brize MBEZE. [Http ://neoindependance.canalblog.com/archives/2017/05/17/35296657.html](http://neoindependance.canalblog.com/archives/2017/05/17/35296657.html).

**Bagnouls F. et Gaussen H. (1957).** Les climats biologiques et leurs classifications. Ann. Géor. 18. N°335. Paris, 193–220.

**Bidzang, N.F., Messi, O.J.E., Ntomba, S.M., Akame, J.M., Mvondo, O.J. (2015).** Apport des linéaments satellitaires pour la recherche des indices aurifères du massif éburnéen de Ngovayang au Sud Cameroun (Craton of Congo). International journal of innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 13No.2 Oct.2015, pp.368-376.

**Bishta A.Z., Soliymán A.M., Madani A.A. and Abu Q.M.A. (2010).** Utilization of lineaments extraction satellite imageries in structural mapping and mineral exploration of central Wadi Arab, Southwest Jordan. Jaku Earth sci, Vol. 21, N°2, p. 1-27.

**Bonn, F., Rochon, G. (1992).** Précis de télédétection, Volume 1. Presses de l'université du Québec, Québec, p 485.

**Canny J. (1986).** A computational approach to edge detection. IEEE transformation on pattern analysis and machine intelligence, Vol. 8, p. 679-714.

**Chapman, RJ, Mortensen, JK et Le Barge, W. (2011).** Styles de minéralisation aurifère filonienne contribuant aux placers de la rivière Indian et du ruisseau Black Hills, territoire du Yukon, Canada, tels que déduits de la caractérisation microchimique des grains d'or placérien. Mineralum Deposita, 46, 881–903.

**Charleux-Demargne, Julie. (2001).** Qualité des modèles numériques de terrain pour l'hydrologie. Application à la caractérisation des crues des bassins versants. Thèse de Sciences de l'Information Géographique, Université de Marne la Vallée, France.

**Craig, (2008).** Modèle numérique de terrain. Lempdes, Craig, 105 p.

**Dakowicz, M et Gold, C. (2003).** “Extracting meaningful slopes from terrain contours”. International Journal of Computational Geometry and Applications, 13(4), 339p.

**Daniel, E et Marcel, E. (2020).** Assessing Green Policies for the Rehabilitation and Sustainable Restoration of Mine Sites in Cameroon: Case of Mayo-Darlé Mine Site, Adamawa Region. Ghana Journal of Geography Vol.12 (2), 2020 pp125-146.

**Dibi D. (2008).** Cartographie des sites potentiels d'implantation des points d'eau dans le département d'Aboisso (sud-est de la Cote d'Ivoire) : apport du SIG et de l'analyse multicritère. Thèse de Doctorat, Université de Cocody, Abidjan, 153p.

**Dupont, S., Demargne, L., & Durand, Ph. (1998).** Production de MNT à partir de données SAR RADARSAT. Rapport Final, Programme AvalSAR. CNES, Toulouse.

**Edima Yana, RW, Ondoa, ADB, Atouba, LCO, Fagny, MA, Bessa, AZE et Faarouk, NO. (2022).** Implication minière dans l'exploration géochimique des sédiments fluviaux de la zone volcanique de Nyambaka Est (Adamawa-Cameroun). Journal international des géosciences Vol 13pp 361-381.

**El Hage, M., Simonetto, E., Faour, G. and Polidori, L. (2010).** Impact of DEM reconstruction parameters on topographic indices. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Paris, France, 2010, vol. XXXVIII, part 3B, pp. 40 – 44.

**Foucault, A., Raoult, J.F. (2001).** Dictionnaire de géologie. 5ème édition 380 P.

**Hamzaoui, A. (2006).** Télédétection multispectrale et hyper spectrale appliquée à la recherche minière. Service télédétection ONHYM, pp.1-2.

**Hubbard, B.E., Mark, T.J., and Thopsom, A.L. (2010).** Lineament analysis of mineral areas of interest in Afghanistan: USGS Open-File Report 2012-1048, 28p.

**Humbel, F. H. (1971).** Carte pédologique de Ngaoundéré 10 à 1/50000. Centre de Yaoundé, Cameroun, ORSTOM, Note explicative, 118pp.

**Jenks, G.F. (1977).** Optimal data classification for choropleth maps. Occasional papers, N°2, p. 74-89.

**Jofack, S. V-C. (2016).** Cartographie des potentialités en eaux souterraines dans les Hauts Plateaux de l'Ouest-Cameroun : contribution de la télédétection (optique et radar), des Systèmes d'Informations Géographiques et des Réseaux de Neurones. Thèse de Doctorat, Université Felix Houphouët Boigny, 267 p.

**Jourda, J.P. (2005).** Méthodologie d'application des techniques de télédétection et des systèmes d'information géographique à l'étude des aquifères fissurés d'Afrique de l'Ouest.

Concept de l'hydrotechnique spatiale : cas des zones tests de la Cote d'Ivoire. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Cocody, 430 p.

**Kibange, M.J. (2021).** Synthèse géologique sur le gisement Stannifère dans le territoire de Walikale : cas de Bisie (RDC). [Mémoire de Master II en Géologie], Université Libre de Kivu, 62p.

**Konopelko, DL, Cherny, RI, Petrova, SV, Strekopytov, S., Seltmann, R., Vlasenko, NS, Strekopytov, VV, Mamadjanov, YM, Wang, X., Plotinskaya, SY, Andreeva, EM. (2022).** Le gisement de Mushiston Sn dans le Tadjik Tien Shan comme localité type pour la minéralisation de stannite-cassitérite-hydrostannate : nouvelles données de chimie minérale et contraintes génétiques. Journal d'exploration géochimique. Vol 239, 107017. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.107017>.

**KOUAMÉ K., ADJA M., G., SALEY, M.B., and JOURDA, J.P.R. (2013).** Réalisation d'une image pseudo-panchromatique RSO de Radarsat-1 pour la cartographie lithostructurale du socle précambrien dans la région de Korhogo (Nord de la Côte d'Ivoire), International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 pp 1-20.

**Lee S., Kyo Y.S., Yongsung K., and Inhye P. (2012).** Regional groundwater productivity potential mapping using information system (GIS) based artificial neural network model. Hydrogeology journal, Office Journal of the International Association of hydrogeologists, Vol. 20, N° 8, p. 1511-1527.

**LEPAGE, R., ROUHANA, G.R., ST ONGE, B., NOUMIER, R. and DESJARDINS, R. (2000).** Cellular Neural Network for Automated Detection of Geological Lineaments on Radarsat Images, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, vol. 38, no. 3, pp. 1224-1233.

**Leroy, R. (1955).** Carte géologique de reconnaissance du Cameroun feuille N° NB 33 N0042. Ngaoundéré – O.

**Letouzey, R., & Combroux, J. (1959).** *Atlas du Cameroun : carte phytogéographique du Cameroun à l'échelle de 1/200 000.* Paris : Société nouvelle de cartographie.

**Letouzey, R. (1985).** *Notice explicative de la carte phytogéographique du Cameroun à l'échelle de 1/500 000.* Toulouse : Institut de la Carte Internationale de Végétation, 240pp.

**Linnen, RL, Van Lichtervelde, M., & ˇCerný, P. (2012).** Pegmatites granitiques : Pegmatites granitiques comme sources de métaux stratégiques. *Éléments* 2012, 8, 275–280.

**Mamdem.T.L.E. (2009).** Utilisation d'images satellites pour la cartographie des minerais supergènes : cas des bauxites de la région de Bangam dans les hautes terres de l'Ouest-Cameroun. *Mém. Master Univ, Yaoundé1.*

**Martin, D., Ségalen, p. (1966).** Carte pédologique du Cameroun oriental au 1/1000000 : feuille Nord. Yaoundé, ORSTOM, 125pp, 2 cartes.

**Mascret, A. (2010).** Développement d'une approche SIG pour l'intégration de données Terre/Mer. École doctorale n° 432 : Sciences des Métiers de l'Ingénieur, pp. 45-48.

**MITASSONA.K.B. (2022).** Apport de la cartographie géologique et structurale à l'identification des zones potentielles de minéralisation aurifère : cas de la localité de MBALE (Adamaoua-Cameroun). *Mém.Master. EGEM.*

**Moussa S., (2020).** Cartographie des potentialités en eaux souterraines dans la commune rurale de Loulouni (Sud du Mali) : apport de la télédétection, et des systèmes d'informations géographiques. Mémoire de Master Recherche, Université Felix Houphouët Boigny, 66 p.

**Nguene, F.R. (1982).** Geology and geochemistry of the Mayo-Darlé Tin Deposit, West-Central Cameroun, Central Africa. New Mexico Institute of mining and Technology, 358pp.

**NOARIJAONA, Z.T. (2010).** Estimation par combinaison de la méthode Electrique et du MNT du volume de calcaire de la carrière d'Ankena. *Mém.Master. UNIVERSITE D'ANTANANARIVO.*

**Oliveira, De E., Populus, J., et Guillaumont, B. (2006).** "Using Lidar survey and satellite imagery for predictive modelling of coastal habitats - A case for seaweed in Brittany (France)". *Earsel Proceedings*, 5(2), pp. 208-223.

**Olivry J. C. (1986).** Fleuves et rivières du Cameroun. Collect. < Monographies Hydrologiques ORSTOM > No 9, Paris.

**OUATTARA, G., KOFFI, G.B. and YAO, A.K. (2016).** Contribution des images satellitales Landsat 7 ETM+ à la cartographie lithostructurale du Centre-Est de la Côte d’Ivoire (Afrique de l’Ouest)., International Journal of Innovation and Applied Studies (ISSN), vol. 1, no. 1, pp. 61-75.

**PCD, (2021).** Plan communal de développement de Mayo-Darlé. 163p.

**Polidori, L. (1991).** Validation de modèles numériques de terrain, application à la cartographie des risques géologiques. Thèse de doctorat, Université de Paris VII, 87 p.

**Pouderoux ,J. (2009).** Création semi-automatique de modèle numérique de terrain. Visualisation et interaction sur terminaux mobiles communicants. Thèse de doctorat. L’université de Bordeaux 1. 189p.

**Puech, C. (2000).** Utilisation de la télédétection et des modèles numérique de terrain pour la connaissance du fonctionnement des hydrosystèmes. Mémoire de recherches. INPG, Grenoble, 83 p.

**Roupsard, M. (1985).** L’étain de Mayo-Darlé : déclin d’un petit centre minier dans l’Adamaoua. Revue de géographie du Cameroun, 35-38pp.

**Sarah OT, Marc L, John AW et Maciek W.L. (2006).** Remote sensing and GIS for mapping groundwater recharge and discharge areas in salinity prone catchments, southeastern Australia. Hydrogeology Journal 15: 75–96.

**Soudani, K. (2005).** Introduction général à la télédétection. Cours en ligne Faculté des Sciences d’Orsay – Université Paris Sud XI.

**Tchami, T.F.A. (2022).** Analyse Statistique, Modélisation Numérique et Estimation des ressources de la minéralisation de Coltan-Etain dans le Mayo-Darlé (Adamaoua-Cameroun). [Mémoire de Master Professionnel en Mines-Pétrole-Métallurgie : Option Mines], Université de Yaoundé 1,104p.

**Thierry J. (2013).** La cartographie 2.0 vers une approche critique d’un nouveau régime cartographique. L’information géographique.Vol.77, 29-46.

**Toteu, S.F., Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J.M., & Njanko, T.H. (2000).** Panafrican tectonic evolution in Central and Southern Cameroon: Transpression and transtension during sinistral shear movements. *J. Afr. Earth Sci.*, 36, 207-214pp.

**Youan T. M., Lasm T., Jourda J.P.R., Saley M.B, Adja G.M., Kouame K. et Biemi J. (2011).** Cartographie des eaux souterraines en milieu fissuré par analyse multicritère : Cas de Bondoukou (Cote d'Ivoire). *Revue internationale de géomatique*, Vol. 21, N°1, p. 43-71.

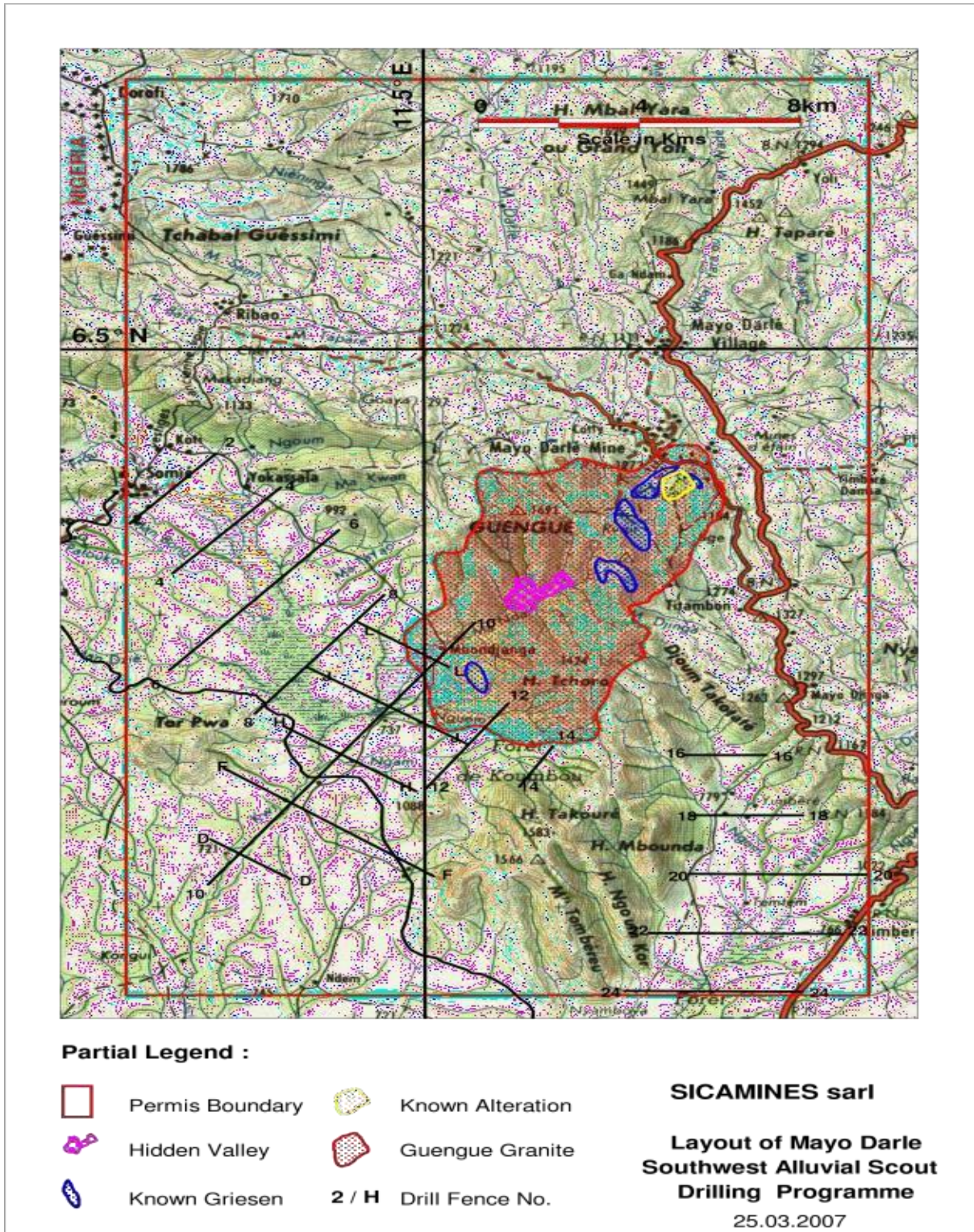
**YOUAN TA, M. (2008).** Contribution de la Télédétection et des Systèmes d'Informations Géographiques à la prospection Hydrogéologique su socle Précambrien d'Afrique de l'Ouest: Cas de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), Thèse de Doctorat de l'Université de Cocody, Abidjan, 237 p.

**YOUAN TA, M., LASM, T., JOURDA, J.P.R. and KOUAMÉ, K.F. (2008).** Cartographie structurale par imagerie satellitaire ETM+ de Landsat-7 et analyse des réseaux de fractures du socle précambrien de la région de Bondoukou (Nord-Est de la Côte d'Ivoire), *Revue Télédétection*, vol. 21, no. 1, pp. 43-71.



## ANNEXES

ANNEXE 1. Carte d'aménagement du site d'exploitation de la mine de Mayo-Darlé



(Source :enquête de terrain SICAMINES Sarl,2007).