

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

PAIX – TRAVAIL - PATRIE

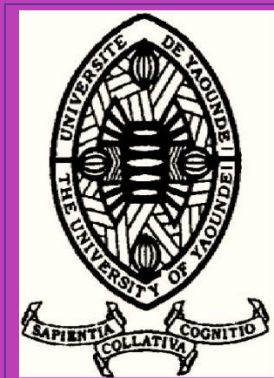
UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

CENTRE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALES EN SCIENCES, TECHNOLOGIES
ET GEOSCIENCES

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE

B.P 812 Yaoundé



REPUBLIC OF CAMEROON

PEACE-WORK-FATHERLAND

THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCES

POSTGRADUATE SCHOOL OF SCIENCE,
TECHNOLOGY AND GEOSCIENCES

RESEARCH AND POSTGRADUATE TRAINING
UNIT

B.P .812 Yaoundé

Email : crfd_stg@uy1.uninet.cm

DEPARTEMENT DE PHYSIQUE

DEPARTMENT OF PHYSICS

LABORATOIRE DE PHYSIQUE DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE

LABORATORY OF PHYSICS OF EARTH'S ENVIRONMENT

MODELE NUMERIQUE DE TERRAIN DANS LA REGION DE L'EXTREME
NORD CAMEROUN : IMPUTATION HYDROLOGIQUE

MEMOIRE PRESENTE EN VUE DE L'OBTENTION DU DIPLOME DE MASTER
OF SCIENCE EN PHYSIQUE

OPTION : GEOPHYSIQUE ET GEOEXPLORATION

Par :

Moshé Grégoire Hyacinthe YORSAM MANHOULI

MATRICULE : 13J2919

Licencié en Physique

Sous la direction de :

Pr NJANDJOCK NOUCK Philippe, U.Y.I

Professeur/Université de Yaoundé I

Pr DOMRA KANA Janvier, U. Ma

Maitre de Conférences/Université de Maroua



Année Académique 2024

Dédicaces

*A ma feuè mène, **MARIE BROUWANE***

*A mon cher père, **MANHOULI**, mes frères et sœurs.*

REMERCIEMENTS

L'exercice que constitue un mémoire de Master peut laisser croire et penser à une tâche personnelle, pourtant ce travail a été mené grâce au soutien et aux encouragements de plusieurs personnes. Qu'il nous soit permis en ce moment même 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 profonde gratitude et notre sincère reconnaissance, notamment les Professeurs

- **NJANDJOCK NOUCK** Philippe ; Chef du Laboratoire de Géophysique et Géoexploration pour son encadrement, ses enseignements et ses multiples conseils ;
- **DOMRA KANA** Janvier, Co-Directeur de ce mémoire, pour sa disponibilité, son sens de l'écoute, sa patience et sa rigueur dans le travail ;
- **SOSSO** Maurice Aurélien, ancien Recteur de l'Université de Yaoundé I, qui par ses services administratifs a bien voulu que je sois sélectionné en Master ;
- **ETOUA** Dieudonné Magloire Rémy, actuel Recteur de ladite Université ;
- **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 ;
- **PEGNYEMB** Dieudonné, Coordonnateur du Centre de Recherches 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 ;
- **NDJAKA** Jean Marie Bienvenue, Chef du Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, pour ses enseignements ;

À tout le personnel enseignant du Laboratoire de Géophysique et Géoexploration, en particulier les Professeurs **NOUAYOU** Robert, **ENYEGUE A NYAM** Françoise, **NDOUGSA MBARGA** Théophile, **TABOD** Charles, **OWONA ANGUE** Marie Louise, **MELI'I** Jorelle Larissa, **Dr NGATCHOU**, pour les conseils et les enseignements reçus ;

Aux personnels enseignant et administratif du Département de physique, à l'instar des Professeurs **BEN-BOLIE** Germain Hubert, **HONA** Jacques, **SIMO** Elie, **NANA ENGO** Serge Guy, **TCHAWOUA** Clément.

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

Au Pr. **GOUET** Herve Daniel, pour ses orientations

Au Dr **MBOUOMBOUO** Ngapouth pour ses conseils.

A mes amis **MESSINA**, **BATCHAGNO**, **NGASSA**, **ENGOULOU**, **MEKA**, **MBIDA** pour leurs encouragements.

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

TABLE DES MATIERES

Dédicaces	ii
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIERES	v
LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS.....	vii
LISTE DES FIGURES.....	ix
LISTE DES TABLEAUX.....	x
RESUME.....	xi
ABSTRACT.....	xii
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1: REVUE DE LA LITTERATURE	3
1.1 Généralités sur les altitudes et les diverses formes de terrains.....	3
1.1.1 Définitions.....	3
1.1.2 Altitudes et diverses formes de terrains	3
1.2 Généralités sur les modèles numériques de terrains	4
1.2.1 Définition des MNT	4
1.2.2 Historique sur les MNT.....	5
1.2.3 Importances et applications des MNT.....	6
1.2.4 Techniques d'acquisition et traitement des MNT	7
1.3 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE.....	12
1.3.1 Cadre géographique de la zone	12
1.3.2 Cadre géologique.....	16
1.3.3 Contexte hydrogéologique	18
1.3.4 Travaux géophysiques antérieurs	19
CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODE.....	21
2.1 Méthode.....	21
2.1.1 Télédétection	21
2.1.2 Systèmes d'informations Géographiques.....	24
2.2 Données et matériels.....	32
2.2.1 Données et matériels utilisés en télédétection.....	32

2.2.2	Données et matériels utilisés en systèmes d'informations géographiques.....	33
2.2.3	Les logiciels.....	34
CHAPITRE 3 : Résultats et discussions		35
3.1	Carte des MNT	36
3.2	Carte d'occupation des sols	37
3.3	NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	40
3.4	Carte des pentes	41
3.5	Bassins versants.....	43
3.5.1	Périmètre et superficie des sous-bassins versants	43
3.5.2	Le coefficient de compacité de Gravelius « Kc »	47
3.5.3	Le rectangle de Gravelius.....	49
3.5.4	Pente des bassins versants	50
3.5.5	Temps de concentration « Tc »	51
3.5.6	Apport en eau pluviale pour chaque Sous-Bassin Versant	52
3.6	DISCUSSIONS	54
CONCLUSION GENERALE ET PERPECTIVES		55
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES		57

LISTE DES SYMBOLES ET ABREVIATIONS

d	Distance
DSRP	Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté
SND30	Stratégie Nationale de Développement Cameroun 2020- 2030
DSCE	Document des Stratégies pour la Croissance et l'Emploi
GNSS	Global Navigation Satellite System
GPS	Global Positioning System
ha	Hectare
h	Heure
Km	Kilomètre
LASER	Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation
LIDAR	Light Detection and Ranging
LIDARa	Light Detection and Ranging aéroporté
LDARt	Light Detection and Ranging terrestre
m	Mètre
m ³	Mètre cube
min	Minute
MCD	Modèle Conceptuel des Données
MNT	Modèle Numérique de Terrain
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
ONU	Organisation des Nations Unies
RSO	Radar à Synthèse d'Ouverture
REM	Rayonnement Electromagnétique
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SBV	Sous-Bassin Versant
SIRS	Systèmes d'informations à Référence Spatiale
SIG	Systèmes d'Informations Géographiques
SI	Systèmes d'Informations

SGBD	Systhemes de gestion des bases de données
SQL	Systheme Querry Language
USGS	United States Geological Survey
VNP	Véhicule Non Piloté
Θ	Angle vertical
Φ	Angle horizontal
X, Y, Z	Coordonnées tridimensionnelles

LISTE DES FIGURES

Figure I: Différence entre altitude et hauteur ellipsoïdale (https://montre-cardio-gps.fr/wp-content/upload/2017/07/Altitude)	4
Figure II: Rendu en 3D d'un Modèle numérique de terrain (Hamouche et al., 2022)	5
Figure III: Mesure des coordonnées sphériques (d , ϕ , θ) des points — (Landes et al., 2011).	10
Figure IV: Situation de la zone d'étude	13
Figure V: Carte illustrant la géomorphologie de l'Extrême-Nord Cameroun (MORIN S., 2000).	15
Figure VI: Carte illustrant la géologie de l'Extrême-Nord Cameroun. (Dumond et Péronne., 1966).	17
Figure VII: Hydrogéologie de l'Extrême-Nord du Cameroun (Detay, 1987)	19
Figure VIII: Exemples d'images aérienne et satellitaire	22
Figure IX : Principe de la télédétection	23
Figure X: Représentations des entités géographiques (Réseau Cartographie et Développement, 2008)	26
Figure XI: Composantes du format vecteur (https://resources.arcgis.com)	27
Figure XII: Description du format raster (Source : https://resources.arcgis.com)	28
Figure XIII: Typologie de l'imagerie (www.ressources.arcgis.com)	29
Figure XIV: Transformation du spectre électromagnétique vers les grilles (https://resources.arcgis.com)	29
Figure XV: Image SRTM de la partie de l'Extrême-Nord du Cameroun	33
Figure XVI: Carte des MNT	36
Figure XVII: carte d'occupation des sols du Diamaré	37
Figure XVIII: carte d'occupation des sols de la Commune de Maroua I ^{er}	38
Figure XIX: carte d'occupation des sols de la Commune de Ndoukoula	39
Figure XX: indice de la végétation du Département du Diamaré	40
Figure XXI: carte des pentes de la Commune de Maroua I ^{er}	41
Figure XXII: carte des pentes de la Commune de Ndoukoula	42
Figure XXIII: carte du bassin versant de la Commune de Ndoukoula	45
Figure XXIV: carte du bassin versant de la Commune de Maroua I ^{er}	46

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Superficies et périmètres des sous-bassins versants	44
Tableau 2: Coefficient de compacité de Gravelius des sous-bassins versants	48
Tableau 3: Longueur et largeur du rectangle de Gravelius des sous-bassins versants	50
Tableau 4: Pentes des sous-bassins versants de Maroua I ^{er} et de Ndoukoula	51
Tableau 5: Temps de Concentration des sous-bassins versants de Maroua I ^{er} et de Ndoukoula.....	52

RESUME

Ce mémoire a pour objectif de produire les modèles numériques de terrain (MNT) de la Région de l'Extrême-Nord, afin de déterminer l'imputation hydrologique de la zone d'étude. Les MNT sont des représentations numériques de la topographie qui permettent d'extraire divers paramètres tels que la pente, la direction d'écoulement de l'eau et l'indice topographique, qui sont souvent utilisés comme outils de décision dans la gestion des ressources en eau. La méthodologie utilisée repose sur la télédétection, qui permet de comprendre le processus de création d'une image satellitaire, ainsi que sur les systèmes d'informations géographiques (SIG), qui facilitent l'analyse et le traitement des données. Les MNT d'une résolution de 30 m et les SIG ont été utilisés pour effectuer différents traitements et délimiter les sous-bassins versants de Maroua Ier et de Ndoukoula. L'étude des sous-bassins versants a permis d'obtenir le coefficient de Gravelius, qui est supérieur à 1, indiquant que nos zones d'étude sont exposées aux inondations. De plus, environ **1.156.997.463 m³** d'eau de pluie peuvent potentiellement transiter par les sous-bassins versants de Maroua I^{er}, et près de **2.252.879.040 m³** par ceux de Ndoukoula. Les résultats obtenus peuvent être utilisés par les décideurs pour mettre en place un outil d'aide à la décision afin de programmer les actions de mobilisation et d'aménagement des ressources en eau. De plus, ces résultats permettent de simuler différents scénarios pour prévoir et faire face aux crises causées par le manque de ressources en eaux pendant les années de faible pluviométrie.

Mots clés : MNT, Télédétection, SIG, Imputation Hydrologique, bassin versant, coefficient de Gravelius.

ABSTRACT

The aim of this dissertation is to produce digital terrain models (DTM) of the Far North Region, in order to determine the hydrological imputation of the study area. DTM are digital representations of topography that make it possible to extract various parameters such as slope, water flow direction and topographic index, which are often used as decision-making tools in water resource management. The methodology used is based on remote sensing, which enables us to understand the process of creating a satellite image, and on geographic information systems (GIS), which facilitate data analysis and processing. DTMs with a resolution of 30 m and GIS were used to carry out various processing operations and to delimit the sub-watersheds of Maroua I and Ndoukoulou. The study of the sub-catchments yielded the Gravelius coefficient, which is greater than 1, indicating that our study areas are exposed to flooding. In addition, approximately **1.156.997.463 m³** of rainwater can potentially flow through the Maroua I sub-catchments, and almost **2.252.879.040 m³** through the Ndoukoulou sub-catchments. The results obtained can be used by decision-makers to set up a decision-making tool for programming water resource mobilisation and development actions. In addition, these results can be used to simulate different scenarios for predicting and dealing with crises caused by the lack of resources during years of low rainfall.

Keywords : DTM, Remote Sensing, GIS, Hydrological Imputation, watershed, Gravelius coefficient.

INTRODUCTION GENERALE

Le besoin d'étudier les différentes Régions de la Terre et de comprendre leur environnement existe depuis toujours. Une connaissance de la topographie des sols basée sur des données d'altitude est requise pour l'aménagement du territoire, le développement durable, la protection de l'environnement et la prévention des risques au niveau de la Terre. Ces données d'altitude constituent des éléments indispensables pour réaliser l'analyse des caractères structurels du terrain.

Ces dernières années, ce besoin s'est ressenti de plus en plus à travers l'impact des changements climatiques à l'échelle mondiale. Ces derniers accroissent la variabilité du cycle hydrologique et, par conséquent, provoquent des phénomènes météorologiques extrêmes, réduisent la prévisibilité des ressources en eau, amoindrissent la qualité de l'eau et menacent, à l'échelle mondiale, le développement durable, la biodiversité et la jouissance du droit humain à l'eau potable et à l'assainissement (Note de Politique d'ONU-Eau, Septembre 2019). La Région de l'Extrême-Nord Cameroun, comme bon nombre de Régions du Cameroun est en proie à ce phénomène durant ces dernières années. Ce qui favorise une occurrence de « géo-risques » notamment : les inondations et la sécheresse entraînant ainsi une raréfaction pour l'accès à l'eau de la part des populations de ladite Région. En ce qui concerne le pourcentage de l'accès à l'eau potable par Région en 2007, celle de l'Extrême-Nord s'est classée au huitième rang sur les dix Régions du pays avec 25,4% par rapport à la moyenne nationale qui est de 49,0% ; ainsi seulement un habitant sur quatre a accès à l'eau potable (DSCE-, 2009). L'objectif du Gouvernement camerounais dans ce domaine est d'améliorer significativement le taux d'accès des populations à l'eau potable et d'atteindre un taux d'assainissement de 60% à l'horizon 2035 (SND30, 2020).

En effet, suite au Document de Stratégie de Réduction de la Pauvreté (DSRP) entré en vigueur en avril 2003, en tant que plan national prioritaire, le Gouvernement du Cameroun a appliqué en août 2009 le DSCE, en tant que second DSRP. Pour le secteur de l'eau, dans le DSCE, on visait l'atteinte d'un taux d'accès à l'eau potable de 70% en 2015 et de 75% en 2020 pour la moyenne nationale, mais d'après le SND30 entré en vigueur en 2020 cet objectif n'a pas été atteint ; il a été de 62%. Malgré ces efforts, l'Extrême-Nord du Cameroun connaît toujours des problèmes d'approvisionnement en eau surtout dans les localités situées en zone de socle.

Il est alors nécessaire de mettre à la disposition des décideurs et acteurs du développement une autre approche de la gestion des ressources en eau. Cette nécessité est d'autant plus urgente quand on sait que la ressource est rare et que le site est particulièrement fragile.

Une nouvelle approche de la gestion qui replace l'eau sans cesse dans son environnement global, celui du bassin versant. C'est dans cette perspective que nous nous inscrivons par ce travail, à l'étude des MNT (imputation hydrologique) dans la Région de l'Extrême-Nord du Cameroun, précisément dans les Communes de Maroua I^{er} et de Ndoukoula, à travers la télédétection et des systèmes d'informations géographiques qui permettent une prise en compte des informations de diverses natures.

Nos présents travaux de recherche visent à étudier les modèles numériques de terrains dans la Région de l'Extrême-Nord et leur utilisation pour l'imputation hydrologique.

Afin d'y parvenir, il s'agira principalement de :

- caractériser notre zone d'étude ;
- ressortir, la carte des MNT, la carte d'occupation des sols, le NDVI, la carte des pentes, ressortir la carte et les caractéristiques des bassins versants.

Ce mémoire présente différents aspects de développements d'outils et d'applications. Il s'organise en trois chapitres :

- le premier chapitre porte sur la revue de littérature dans laquelle nous présenterons d'abord les généralités sur les altitudes et formes de terrains ; nous examinerons en outre les généralités, l'importance et l'application des modèles numériques de terrains de notre zone d'étude ; nous exposerons enfin les caractéristiques géologiques et hydrogéologiques de notre zone d'étude ;
- le deuxième chapitre constitue le matériel et la méthode dans laquelle nous présenterons les données cartographiques, les modèles numériques de terrains ainsi que le choix de la méthode retenue pour notre étude ;
- le troisième chapitre présente les résultats et interprétations obtenus après analyse des données soit la carte des MNTs, la carte d'occupation des sols, le NDVI, la carte des pentes, la carte et les caractéristiques des bassins versants.

CHAPITRE 1: REVUE DE LA LITTERATURE

Nous examinerons ici les généralités sur les altitudes et les diverses formes de terrains.

1.1 Généralités sur les altitudes et les diverses formes de terrains

Cette sous-section porte sur la définition et la notion d'altitudes ainsi que des diverses formes de terrains.

1.1.1 Définitions

Une surface continue qui s'étend sur les différentes altitudes et présente une diversité de formes est appelée terrain. Celui-ci est composé du relief qui a des caractéristiques morphologiques variées.

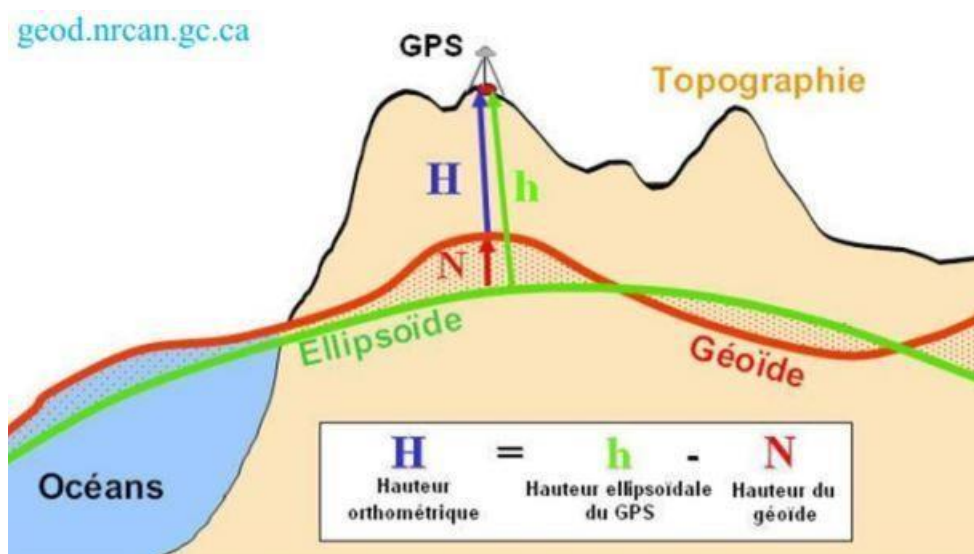
Le relief est défini comme étant n'importe quel objet physique de la surface de la Terre ayant une forme caractéristique et reconnaissable (Bates & Jackson, 2005). Cette morphologie est le résultat d'un ensemble de processus endogènes à l'instar de la tectonique et exogènes tel que le climat (Hugget, 2003).

1.1.2 Altitudes et diverses formes de terrains

La modélisation numérique du relief exige un échantillonnage de points tridimensionnels; chaque point étant caractérisé par une position planimétrique et altimétrique. Cette position étant calculé par rapport à une référence et n'ayant de sens que si cette référence est précise. En planimétrie, la référence est le plus souvent un repère relié à un système de coordonnées tandis qu'en altimétrie cette référence est dans la plupart des cas une surface qui représente le niveau moyen de la mer appelée géoïde et donc, on parle d'altitude ; elle peut être aussi un ellipsoïde qui est une approximation mathématique du géoïde et dans ce cas on parle de hauteur ellipsoïdale. La position d'un point dans l'espace par rapport à un repère tridimensionnel est donc assurée par ces coordonnées planimétriques et altimétriques. Plusieurs techniques telles que la photogrammétrie et l'interférométrie radar permettent de mesurer cette position.

La répartition des points doit respecter le théorème de Shannon pour une meilleure modélisation de la morphologie du relief (Polidori & El Hage, 2012). Nous devons donc avoir

la fréquence d'échantillonnage égale à deux fois la fréquence maximale. A partir de ce semis de point, les formes du terrain peuvent être modélisées. Ainsi, la morphologie du terrain sera totalement déformée si la fréquence d'échantillonnage est égale à la fréquence maximale tandis qu'une fréquence égale aux quatre tiers de la fréquence maximale provoque une perte de plusieurs détails de cette dernière. Par contre, lorsque la fréquence d'échantillonnage est égale au moins au double de la fréquence maximale, la forme du terrain est conservée. La notion d'échelle est aussi importante car la représentation idéale des formes du terrain dépend aussi bien de la répartition des points que de l'échelle qui varie selon les détails à modéliser.



(El Hage, 2013).

Figure I: Différence entre altitude et hauteur ellipsoïdale (<https://.montre-cardio-gps.fr/wp-content/upload/2017/07/Altitude>)

1.2 Généralités sur les modèles numériques de terrains

Dans cette sous-section, il sera question de présenter la définition des MNT, leur historique, leur importance et leurs domaines d'applications, les techniques d'acquisitions et de traitement ainsi que leurs formats de stockages.

1.2.1 Définition des MNT

Un MNT est une représentation numérique et mathématique de l'altitude d'un point quelconque de la surface terrestre d'une zone géographique, dans un système référentiel bien défini. (Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2014 18(3), 407-421).

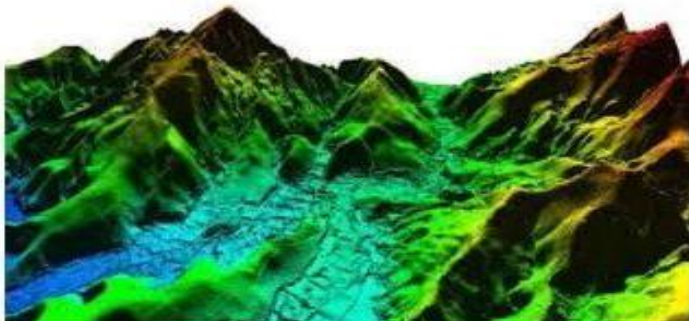


Figure II: Rendu en 3D d'un Modèle numérique de terrain (Hamouche et al., 2022)

1.2.2 Historique sur les MNT

La modélisation du relief terrestre a commencé depuis plusieurs siècles sous forme de cartes topographiques. Celles-ci ont connu d'importantes améliorations pour répondre à des objectifs tant administratifs que militaires aux XVII^{ème} et XVIII^{ème} siècle. Elles ont constitué jusqu'à nos jours une des sources les plus utilisées pour décrire la topographie du terrain. De plus, elles sont utilisées pour produire des Modèles Numériques de Terrain (MNT) par interpolation de leur altitude. L'apparition des caméras métriques et de la technique de photogrammétrie avec Aimé Laussedat au XIX^{ème} siècle ont conduit à une autre approche pour la production des MNT basée cette fois sur des images argentiques, puis plus tard sur celles qui sont numériques. Au XX^{ème} siècle, des nouvelles techniques de production de MNT sont apparues telles que celles basées sur les données RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture) et LIDAR (Light Detection And Ranging). Ces techniques de modélisation tridimensionnelle du terrain ont connu de véritables progrès en réponse à une demande croissante pour des besoins scientifiques et industriels. Ces évolutions ont commencé avec l'intégration du support informatique et la production du premier Modèle Numérique du Terrain (MNT) en 1975 par l'USGS (United States Geological Survey) (Meade, 2008). Ensuite, le lancement des satellites d'observation de la Terre utilisant des capteurs tant optiques que radar ont permis de produire des MNT mondiaux couvrant la plupart de la surface terrestre. Par exemple, la mission SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), lancée en 2000 a recueilli des données altimétriques sur une grande partie de la masse terrestre par interférométrie d'images RSO (Rabus et al. 2003 ;

Jarvis et al. 2004). Par ailleurs, le développement du LIDAR, qui fournit un nuage dense de points avec des altitudes très précises, a contribué à une meilleure représentation de la surface terrestre sur de grandes échelles (Hodgson et Bresnahan, 2004). Ces développements ont permis de fournir des MNT à différentes échelles pour tout utilisateur qui s'intéresse à l'analyse du terrain. De même, les algorithmes de traitement d'images et de nuages de points ont subi d'importants développements tout en poursuivant l'évolution des techniques de captage des données. Par exemple, le passage de l'appariement manuel à l'appariement automatique d'images optiques a réduit le temps de production des MNT photogrammétriques.

1.2.3 Importances et applications des MNT

Utiliser comme outils de décision dans la gestion de l'environnement, les modèles numériques de terrains représentent une pièce maîtresse permettant de mener à bien de nombreux projets d'aménagement du territoire. Ils sont souvent utilisés pour créer une modélisation 2D et 3D d'un territoire utile dans la surveillance des ouvrages d'arts comme les ponts, les stades ou les monuments historiques ; ils peuvent ainsi observer si des fissures des glissements de terrain ou des fragilités sont susceptibles de déstabiliser l'infrastructure et donc intervenir en amont pour le consolider. On peut également les utiliser comme source de données pour qualifier les objets d'un territoire étudié, comme c'est le cas dans Cartes & Données : calculer l'altitude d'un ensemble d'adresses géolocalisées, déterminer la pluviométrie moyenne pour des parcelles d'exploitations agricoles, étudier la température de différentes adresses et implantations, extraire des paramètres du terrain, tracer des profils topographiques, modéliser l'écoulement de l'eau ou de la masse du mouvement (par exemple pour les avalanches et glissements de terrains), créer de cartes en relief, rendu de visualisation en 3D, Planification du vol 3D, création de modèles physiques (y compris soulevé des cartes-relief), rectification géométrique de photographie aérienne ou d'imagerie satellitaire, réduction (correction du terrain) des mesures de la gravité (gravimétrie, géodésie physique), analyses de terrain en géomorphologie et géographie physique, Systèmes d'information géographique (SIG).

Les applications des MNT sont nombreuses. On les rencontre notamment dans celles qui sont relatives à :

- l'agriculture, l'élevage, la sylviculture, les MNT interviennent de plus en plus pour la surveillance, l'estimation de production et la planification. Deux paramètres principaux du

relief sont importants : l'orientation d'une part, l'altitude d'autre part, qui interviennent par plusieurs facteurs : ensoleillement, enneigement, humidité, irrigation ;

- l'aménagement du territoire : les retombées sont extrêmement nombreuses. L'utilisation de l'information d'altitude permet d'améliorer considérablement l'optimisation des tracés routiers, ferroviaires ou des canaux. Cela permet également de proposer de façon efficace les implantations d'aéroports, d'émetteurs de rediffusion, de retenues. Les impacts de ces implantations sont également évalués avec plus de pertinence, par exemple les zones recouvertes par un barrage, les zones d'ombres ou zones cultivées, peuvent être faite avec des critères plus riches. Enfin les impacts écologiques de la pollution de l'air ou des nappes phréatiques sont mieux estimés en prenant en compte les informations de relief en plus des données traditionnelles de métrologie, nature des sols ;
- aux opérations militaires : les militaires l'utilisent pour la reconnaissance du terrain, la détermination de la position optimale des radars, de lance-missiles, solaire ou des équipements de communication sophistiqués de guidage de missiles pour contourner les obstacles, la simulation de combat et l'analyse d'intervisibilité.

Ils retrouvent également leurs applications dans l'ingénierie et la conception des infrastructures, dans les systèmes de positionnement global (GPS), ligne de mire, d'analyse, cartographie de base, simulation de vol, précisions agricoles et forestières, analyse des surfaces, systèmes de transports intelligents, sécurité Automobile et systèmes avancés d'assistance du conducteur.

1.2.4 Techniques d'acquisition et traitement des MNT

Quatre techniques d'acquisition des données spatiales nécessaires à la génération des MNT sont utilisées en topographie il s'agit : des techniques classiques de positionnement, des techniques utilisant la technologie de télédétection et des techniques basées sur les informations cartographiques (Nelson et al., 2009).

1.2.4.1 Les Techniques Classiques de Positionnement

Comme technique classique de positionnement nous avons le tachéomètre électronique et le récepteur GNSS (Global Navigation Satellite System) en mode différentiel.

- Le tachéomètre est un appareil fréquemment utilisé en topographie dans toutes les opérations de levées de terrain (levée topographique). Comme exemple nous avons la station totale qui est un tachéomètre qui enregistre les données de terrain.

- Le GNSS se caractérise par une précision métrique, sa couverture mondiale et la compacité des terminaux mais également par sa sensibilité aux obstacles présents entre le terminal récepteur et les satellites (Wikipédia).

1.2.4.2 Les Techniques utilisant la Technologie de Télédétection

Il s'agit ici de la télédétection dans sa définition la plus large, c'est-à-dire toute technique permettant l'acquisition d'informations spatiales sur un objet ou un phénomène par l'intermédiaire d'un capteur n'ayant pas de contact avec l'objet étudié (exemples interférométrie radar, photogrammétrie aéroportée ou satellitaire, LiDAR [Light Detection And Ranging] aéroporté ou terrestre, photogrammétrie à basse altitude utilisant notamment les véhicules non pilotés tels que les microcoptères, les drones et les cerfs-volants).

- L'interférométrie radar est une technique utilisée en télédétection pour mesurer avec précision les variations de distance entre un capteur radar et la surface terrestre. Elle repose sur l'analyse des interférences entre les ondes radar émises par deux antennes distinctes ;

- La photogrammétrie est une technique qui permet d'extraire un MNT à partir de couples d'images stéréoscopiques (obtenues, par exemple, à partir des satellites, d'avions, d'hélicoptères ou de véhicules non pilotés, VNP) d'une zone d'étude (Hirano et al., 2003). Le principe est basé sur la reconstruction en trois dimensions d'un objet à partir de la superposition de deux images planes du même objet, perçu sous des angles différents à l'instar de la vision humaine (Aber et al., 2010). L'extraction se fait de manière automatique en utilisant des algorithmes, ce qui nécessite des images numérisées. Ces dernières sont obtenues soit directement en utilisant un appareil photographique numérique ou via une numérisation d'images analogiques, dans ce dernier cas l'utilisation de scanners est nécessaire. Selon Fabris et al. (2005), l'extraction d'un MNT par photogrammétrie peut être résumée en trois étapes :

- l'orientation interne permet de déterminer le référentiel lié à l'image produite par l'appareil photographique ;
- l'orientation externe consiste à déterminer les coordonnées par exemples X, Y, Z dans un système de référence local, ainsi que les angles de rotation w , f , k de l'appareil photographique par rapport respectivement aux axes du système de référence local au moment de la prise de vue.

- l'extraction des points : les plates-formes des mesures utilisées dans la photogrammétrie sont : la photogrammétrie aéroportée/hélicoptée et la photogrammétrie à basse altitude utilisant des véhicules non pilotés (VNP).

- Photogrammétrie aéroportée/hélicoptée

Elle consiste à équiper un avion ou un hélicoptère d'un appareil photographique digital et à réaliser plusieurs couples d'images stéréographiques de la zone d'intérêt. Le système embarque également une centrale inertielle et un récepteur GNSS qui permettent de déterminer les coordonnées ainsi que l'orientation des photographies. L'obtention d'un MNT de haute résolution spatiale avec des précisions planimétriques et altimétriques centimétriques est cependant conditionnée par l'échelle des photographies (1/30000 à 1/2000) et la prise de vue « selon l'axe vertical » des photographies (Henry et al., 2002).

- Photogrammétrie à basse altitude utilisant des véhicules non pilotés (VNP)

Elle consiste à équiper un véhicule d'un appareil photographique, à l'instar de la photogrammétrie classique et à réaliser des photographies aériennes à très basse altitude (généralement inférieures à 1 km).

Après l'acquisition des photographies aériennes, l'étape suivante consiste à déterminer l'altitude de chaque pixel. Pour un pixel donné sur une image, il s'agit de déterminer le pixel homologue sur l'image avec laquelle un couple stéréoscopique est définissable. Les algorithmes de mise en correspondance utilisés peuvent être classés en deux principaux groupes : les algorithmes de type « area-based » et les algorithmes de type « feature-based » (Fabris et al., 2005 ; Aber et al., 2010 ; Gruen, 2012). Les algorithmes de type « area based » sont les plus utilisés en photogrammétrie (Gruen, 2012). Ils considèrent l'hypothèse que la distance séparant chaque pixel localisé dans la fenêtre et l'appareil photographique est constante, ce qui n'est pas vérifié sur des terrains inclinés ou avec des variabilités topographiques importantes ;

- Le LiDAR est une technique utilisée en télédétection qui exploite les propriétés du laser pour déterminer les caractéristiques d'un objet distant.

Un instrument de mesure utilisant le LiDAR comprend un émetteur, un récepteur de rayon laser et un mécanisme permettant de modifier la trajectoire du rayon laser. Les techniques de mesure utilisant le LiDAR peuvent être classées en trois catégories (Heritage et al., 2009a) : les systèmes LiDAR par absorption différentielle utilisés pour mesurer les profils de concentration de gaz dans l'atmosphère, le « LiDAR Doppler » qui mesure la vitesse

d'objets en mouvement et les systèmes LiDAR utilisés pour déterminer le positionnement d'un objet en trois dimensions.

Le positionnement au LiDAR consiste à partir d'un scanner laser, à envoyer et recevoir un rayon laser sur une cible donnée, à l'instar d'un tachéomètre électronique. Connaissant le temps mis par le rayon, de la cible jusqu'à la source, la distance (d) est mesurée ainsi que l'angle horizontal (φ) et vertical (θ) (Figure 1). Les coordonnées des points mesurés sont ainsi définies dans un repère dont l'origine coïncide avec la source du laser. Les coordonnées tridimensionnelles X , Y et Z sont ensuite calculées ($X = d \cdot \cos \theta \cdot \cos \varphi$; $Y = d \cdot \cos \theta \cdot \sin \varphi$; $Z = d \cdot \sin \theta$). Le système opère à une si grande vitesse qu'il permet l'acquisition des coordonnées de plusieurs dizaines voire centaines de milliers de points par seconde.

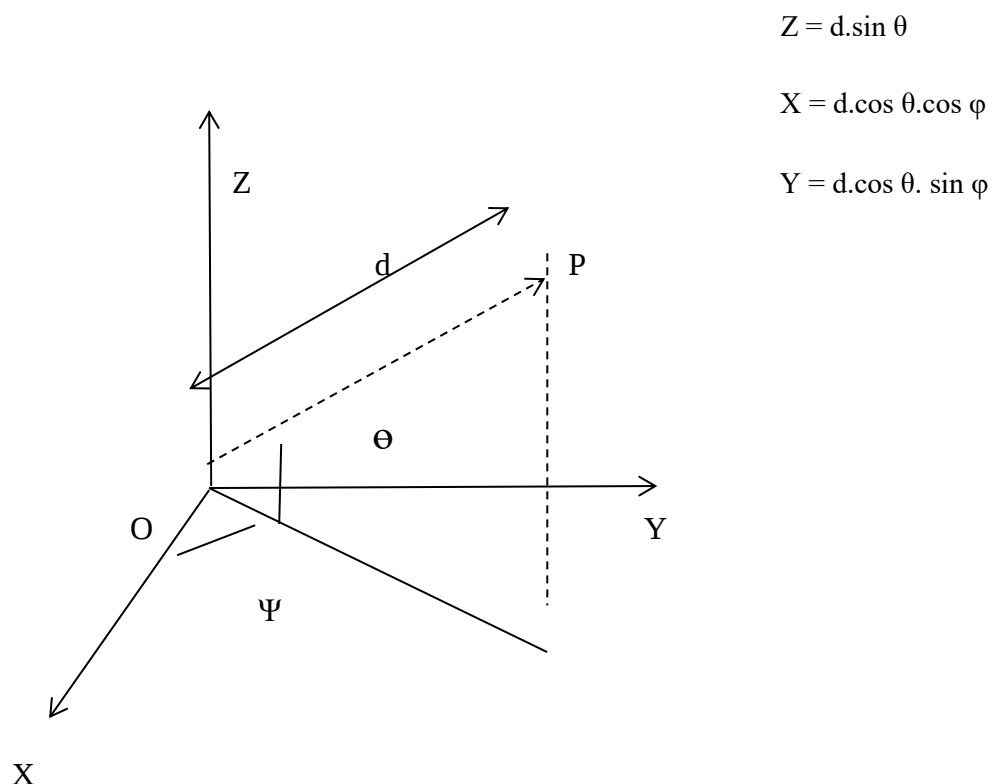


Figure III: Mesure des coordonnées sphériques (d , φ , θ) des points — (Landes et al., 2011).

De nos jours, les systèmes LiDAR ont la capacité de recevoir un retour multiple du signal émis (tous les systèmes n'en sont pas dotés) et, en général, le système enregistre le premier et le dernier retour du signal (Mallet et al., 2009), ce qui fait du LiDAR une méthode bien adaptée pour analyser la structure des végétations ou pour déterminer le MNT sous un

couvert forestier car le dernier retour est celui considéré comme renvoyé par le sol, ce qui n'est pas toujours le cas lorsque la végétation est très dense.

Les plates-formes de mesures utilisées dans le LiDAR sont : le LiDAR aéroporté/hélicopté et le LiDAR terrestre.

- Le LiDAR aéroporté/hélicopté

Ces dernières années, le LiDARa a été utilisé comme méthode d'acquisition des données altimétriques pour générer des MNT (Bater et al., 2009 ; Li S. et al., 2011a ; Hladik et al., 2012). Le système est composé d'une source de lumière (laser), d'un récepteur GNSS et d'une centrale inertielle. Il consiste à envoyer à partir de la source S (embarqué à bord d'un avion ou un hélicoptère) le rayon laser vers une cible C. Exemple le sol ou le sur-sol) et à déterminer la distance S-C, connaissant le temps de parcours du laser pour revenir vers C (Wehr et al., 1999). À partir des données GPS et inertielles, les coordonnées de la cible sont alors facilement déterminables. Le fait d'embarquer le système dans un hélicoptère permet d'augmenter la densité des points dans des zones spécifiques du site, étant donné que sa vitesse peut être nulle. Le système peut permettre ainsi l'acquisition des coordonnées de 5 000 à 10 000 points par seconde (Nelson et al., 2009). La précision des coordonnées acquises avec le LiDARa dépend de la hauteur de vol. En général, les erreurs sont estimées autour de quinze centimètre (15cm) en altimétrie et cinquante à cent centimètres (50 à 100 cm) en planimétrie (Huising et al., 1998 ; Smith, 2005). Une précision altimétrique inférieure à quinze centimètre (15cm) est atteignable si la hauteur de vol est inférieure à 1200 m ; elle est inférieure à 25 cm, par contre, si la hauteur de vol est comprise entre 1200 et 2500 m (Brinkman et al., 2000). Une comparaison complète faite par Baltsavias (1999) montre que, pour une grande partie des applications, le LiDARa est la technologie la mieux adaptée pour l'acquisition des données. La haute densité des points ainsi que la qualité des coordonnées fournies par le LiDARa ont amené certains auteurs (Nelson et al., 2009) à affirmer que le LiDARa sera la méthode idéale d'acquisition des données dans les prochaines années. Plusieurs pays à l'instar de la Belgique, des Pays-Bas, de la Suisse et de la France disposent de telles données sur leur territoire. Cela est sans doute dû à son coût d'acquisition qui reste son principal désavantage sur de petites surfaces.

- Le LiDAR terrestre :

Il permet l'acquisition de données altimétriques de grande densité (plusieurs points par mètres carrés) avec une précision de quelques centimètres sur de petites zones. Il

présente l'avantage d'être beaucoup plus abordable et flexible que le LiDARa en permettant d'atteindre des précisions planimétriques et altimétriques de quelques centimètres (Tahar et al. 2012). Le LiDARt peut être fixe (scanner laser statique) ou mobile (scanner laser dynamique) ; dans ce dernier cas, il est alors accompagné des mêmes composantes que le LiDARa, à savoir une centrale inertielle et un récepteur GNSS.

1.2.4.3 Les techniques basées sur les informations cartographiques

La cartographie est l'ensemble des études et des opérations scientifiques et techniques intervenant dans l'établissement des cartes ou plans, à partir des résultats d'observations directes ou de l'exploitation d'une documentation préexistante.

Durant l'acquisition des données pour la réalisation des MNT des erreurs peuvent être produites. Les sources d'erreurs du MNT sont variées et incluent principalement l'exactitude des points de contrôle, la densité et la distribution des données sources, la situation géographique de la zone d'étude, les méthodes utilisées pour générer le MNT et la microtopographie de la zone d'étude (Li, 1991 ; Heritage et al., 2009b). Pike (2002) identifie trois types d'erreurs (différence entre la valeur altimétrique d'une maille et la valeur réelle observable sur le terrain) dans les MNT : les erreurs systématiques, les erreurs aléatoires et les fautes.

1.3 PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Elle s'articulera sur plusieurs points parmi lesquels: les cadres géographique et géologique de la zone, ses contextes géologique et hydrogéologique.

1.3.1 Cadre géographique de la zone

a. Situation géographique de la zone

La Région de l'Extrême-Nord est l'une des dix Régions du Cameroun. Elle est la plus peuplée, avec une population estimée à 4,3 millions d'habitants en 2018 et une densité de 91 hab/km². Elle est située dans la partie septentrionale du pays, entre 9°58' et 13°03' de latitude Nord et 13°31' et 15°47' de longitude Est, et une superficie de 34246km². Elle est limitrophe de six Régions du Tchad et de deux Etats au Nigéria. Sur le plan économique, l'inondation régulière de la plaine a imposé son rythme à la population dont les activités se partagent entre l'agriculture, l'élevage et la pêche, principaux pôles de l'économie traditionnelle. De grands

projets, de développement, dépendant tous des ressources en eau, ont en outre été exécutés dans la Région (riziculture notamment). Le tourisme tient également une place non négligeable dans la Région avec la présence du parc National de Waza et récemment la réserve du Mayo-Kani dans les Arrondissements de Guidiguis , Kaélé et de Taibong.

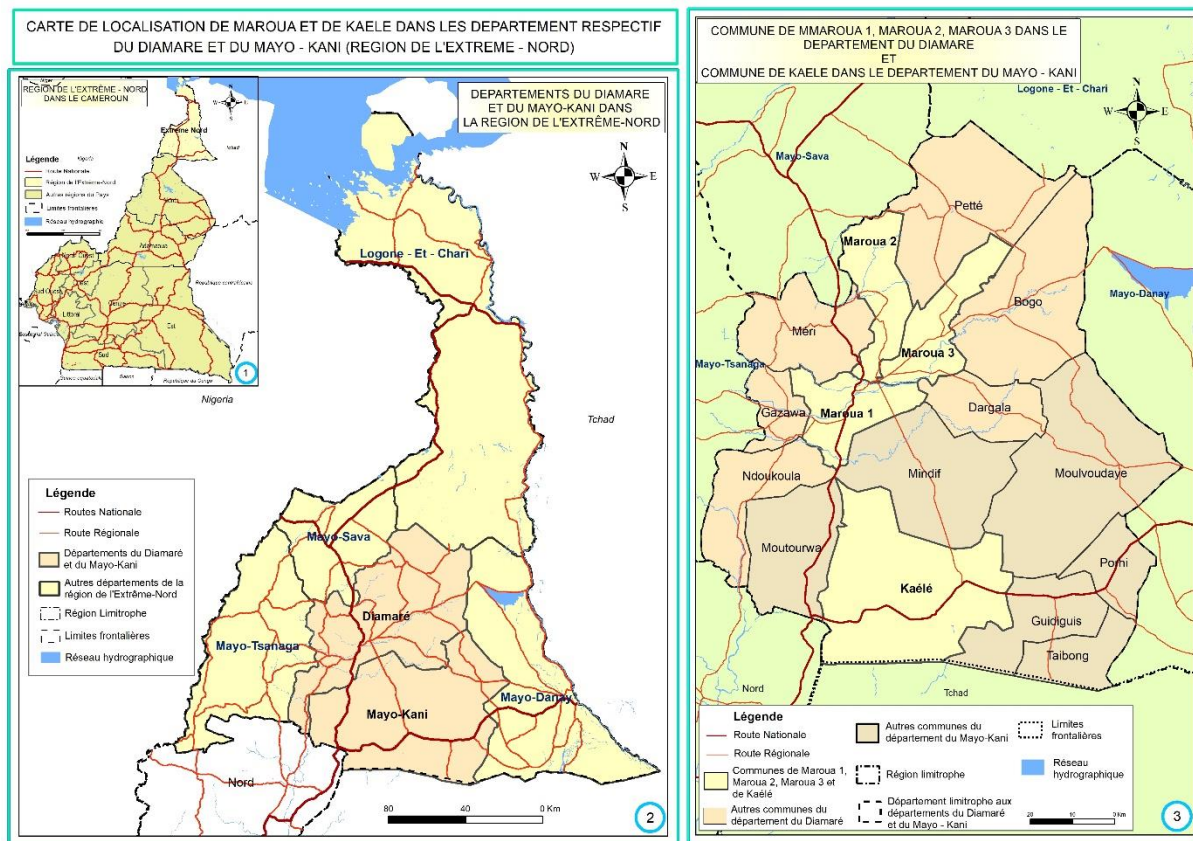


Figure IV: Situation de la zone d'étude

b. Climat et végétations

La Région est soumise à un climat de type soudano-sahélien dont les principales caractéristiques sont les suivantes :

- la seule saison des pluies centrée sur un maximum au mois d'août, avec les totaux moyens annuels variant entre 400 et 1200 mm d'eau ;
- une longue saison sèche de huit ou neuf mois, allant d'octobre en mai. Elle est d'autant plus rude que l'on se dirige vers le nord de la Région et que l'on s'éloigne des Monts Mandara. Elle présente une période de brume sèche d'environ trois mois centrée sur décembre et janvier ;
- une insolation importante et des températures fortes, et souvent très fortes quand on se rapproche des rives du Lac Tchad. La température journalière moyenne est de l'ordre

de 28° C. Elle augmente considérablement et atteint des pics de 45° C entre mars et mai. Les amplitudes thermiques atteignent parfois 20° Celsius ;

- un vent sec appelé Harmattan traverse la Région comme la plupart des pays sahéliens. La végétation est constituée d'une savane arborée, d'un couvert herbacé peu développé et des galeries forestières. Cette végétation est insuffisante en saison sèche pour assurer ses fonctions de protection du sol, de pâturage et de réserve biologique. En plus des espèces domestiques, on rencontre une pléthore d'animaux sauvages au niveau des différents parcs et réserves.

c. Géomorphologie

La zone d'étude est constituée par la vaste plaine qui occupe, dans la partie Camerounaise de la « Cuvette Tchadienne », une superficie de près de 25.000 km². Cette plaine est délimitée au Sud-Ouest par les contreforts des Monts Mandara, à l'Ouest par la frontière nigériane. Deux principales unités, séparées par un cordon dunaire fossile, constituent les grands traits de la géomorphologie :

- *la dépression tchadienne*, d'une superficie de près de 10.000 km². Les pentes y sont faibles et quasi nulles par endroits. Il en résulte un mauvais drainage suite aux pluies et aux inondations saisonnières des eaux de crues. Les sols argileux sont engorgés d'eau une partie de l'année. Les seuls reliefs qui rompent cette monotonie sont constitués par les inselbergs de Waza.

- *la plaine alluviale de piémont* s'étend sur 6.000 km² environ entre le cordon dunaire et les Mandaras. Sa partie septentrionale est traversée par de nombreux cours d'eau (Mayos). Elle est percée de quelques massifs extrusifs. Sa partie méridionale, sans réseau hydrographique marqué, présente de nombreuses dunes de sables orientées NE-SW, séparées par des dépressions inondées pendant la saison des pluies.

- *le grand cordon dunaire*, s'étendant de Limani à Yagoua sur près de 175 km, correspondrait à un ancien rivage du Lac Tchad daté du quaternaire récent (Faure 1962 ; Pias, 1970). Le cordon, large d'un kilomètre environ, atteint une hauteur maximale de vingt (20) m.

d. Pédologie

Les types de sols dominants sont les vertisols et les argiles noires hydromorphes (BRABANT et GAVAUD, 1985). Les sols hydromorphes montrent en saison sèche des

fentes de dessiccation dans lesquelles pénètre l'eau pluviale en début de saison pluvieuse. Cette eau provoque le gonflement du sol, la fermeture des fentes et une diminution de la perméabilité en surface.

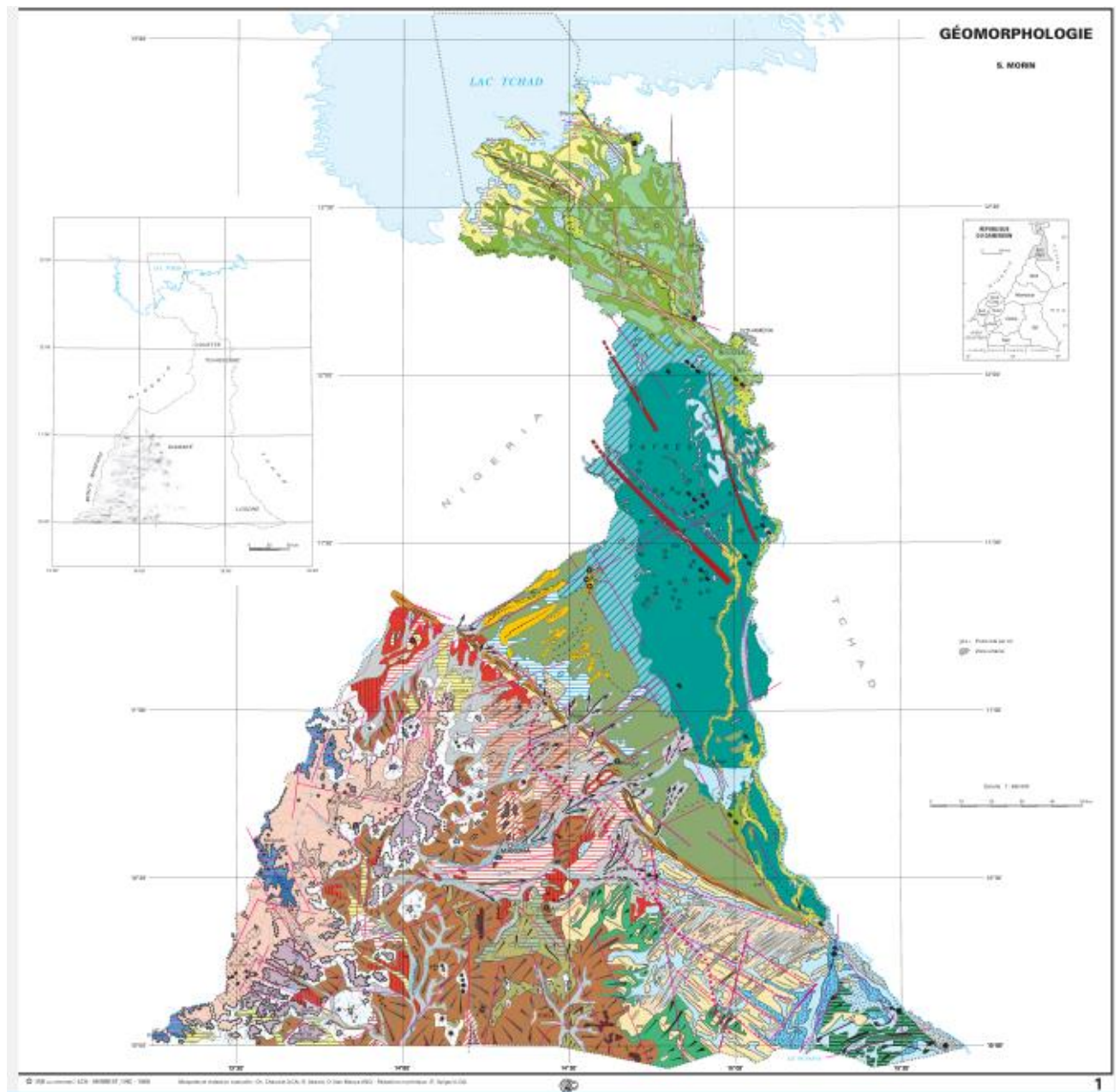


Figure V: Carte illustrant la géomorphologie de l'Extrême-Nord Cameroun (MORIN S., 2000).

e. L'hydrographie

L'hydrographie de la Région est dans sa majeure partie tributaire du bassin du Lac Tchad qui constitue la plus grande unité endoréique du continent africain. Elle est

subdivisée en deux grands bassins hydrographiques : le bassin de la Bénoué à l'Ouest et au Sud et le bassin du Logone au centre et au Nord (Olivry, 1986). Ces bassins regroupent un ensemble de rivières (Mayos) descendant des Monts Mandaras et présentant un écoulement temporaire en saison humide. À l'exception du Logone, puis du Chari plus au nord, délimitant la frontière orientale du Cameroun avec le Tchad et provenant de Régions plus arrosées, l'ensemble des cours d'eau de la Région est caractérisé par des écoulements non permanents. Généralement, leur régime est davantage lié à l'importance de la durée de la saison sèche qu'à la modestie des précipitations annuelles.

1.3.2 Cadre géologique

La géologie de la Région est représentée par les formations sédimentaires, du socle cristallin précambrien (Dumort et Peronne, 1966) et des formations volcaniques. Les formations sédimentaires s'étendent aux pieds des Monts Mandaras, de la plaine du Diamaré située à l'Est jusqu'aux plaines tchadiennes. Tout cet ensemble constitue la couverture sédimentaire. Son épaisseur varie de quelques mètres au niveau des piémonts à plusieurs dizaines de mètres au niveau du Lac Tchad (Tillement, 1970). Il s'agit d'alluvions provenant du Logone, des Monts Mandaras, d'argile lacustre et des sables anciens. Le socle cristallin précambrien affleure, de façon continue, dans les zones montagneuses de l'Ouest, la pénéplaine du Sud et, de façon sporadique, en inselberg dans la zone centrale.

D'après (Dawaï et al., 2017) on distingue cinq unités géologiques :

- le groupe de Poli, constitué de schistes et gneiss néoprotérozoïques de moyenne à haute teneur formée dans un contexte d'arc magmatique et /ou volcanique, et caractérisé par des assemblages métamorphiques de moyen à haut grade ;
- les granitoïdes pré- à syn-tectoniques comprenant des métadiorites et des métagranodiorites. Ils se sont mis dans les schistes et gneiss qu'ils contiennent souvent en enclave. Ces granitoïdes sont affectés par la déformation panafricaine, qui les transforme en orthogneiss et localement en migmatites ;
- les granitoïdes syn- à tardi-tectoniques constituent la plus grande majorité des roches plutoniques panafricaines du domaine Nord-Cameroun. Ils sont composés de granites à grain moyen à porphyroïde et à feldspath alcalin rose ;
- les granitoïdes alcalines post-tectoniques correspondent aux granites et aux syénites leucocrates à texture variable (aplitique, porphyroïde, pegmatitique) qui affleurent sous

forme de coupôles ou d'inselbergs recoupant la structure Régionale et dominant le relief de plaine. Ils comprennent également des dykes mafiques et felsiques traversés par des granites intrusifs et des syénites ;

- les bassins de dépôts molassiques telle que la série de Mangbaï, constitués de roches sédimentaires et volcaniques faiblement métamorphisées ont été identifiés comme des dépôts de molasse panafricaine. (Figure1.3).

D'après (Dumort et Peronne,1966) on distingue dans la zone de socle :

- un ensemble épi-métamorphique couvrant environ 100% de la surface du socle et formant une bande au nord de Maroua ;
- un ensemble méso-métamorphique migmatite couvrant 50% environ de la surface du socle et formant avec les granites l'ensemble des Monts Mandaras ;
- un ensemble méso-métamorphique non migmatite couvrant 10% de la surface du socle affleurant dans la pénéplaine de Kaélé et de Moutourwa.

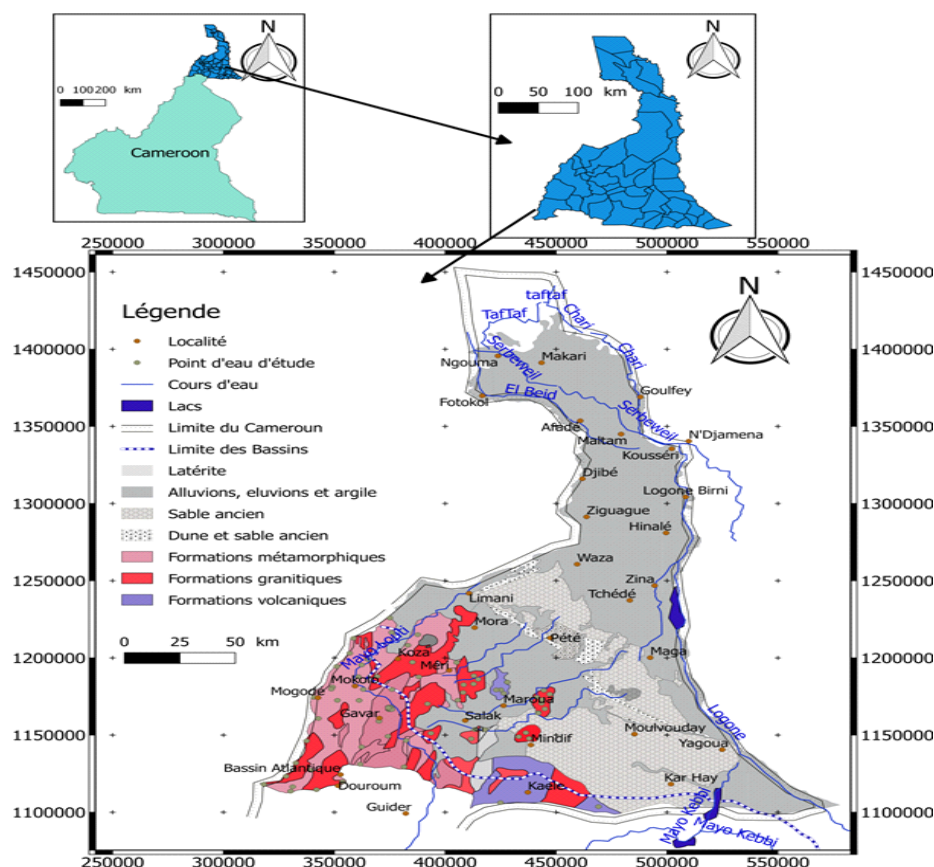


Figure VI: Carte illustrant la géologie de l'Extrême-Nord Cameroun. (Dumond et Péronne., 1966).

1.3.3 Contexte hydrogéologique

Sur la base des études hydrogéologiques antérieures (Schwœrer, 1964 ; Dassibat, 1966 ; Biscaldi, 1970 ; Tillement, 1972) on distingue :

a) Les nappes de piémont (nappe de Mora, du nord du Diamaré et du Kar-Hay), entre les Mandaras et les cordons dunaires. Elles regroupent deux types de formation :

- les nappes des alluvions quaternaires localisées dans le lit majeur des Mayos, de largeur généralement réduite (maximum 3km) de bonne transmissivité ($T \approx 10^{-3} m^2 s^{-2}$) ; elles sont depuis longtemps exploitées par des puits traditionnels et fournissent d'importants débits par forage (de 10 à 80 m^3/h). Elles correspondent à l'écoulement d'inféoflux, alimenté directement par les crues pendant la saison des pluies.

- la nappe du socle : la présence d'une couche d'altérité relativement importante (quinze mètres en moyenne dans la plaine de Mora et quarante mètres dans la plaine du Diamaré), joue un rôle considérable dans l'hydrogéologie du socle ; c'est elle qui constitue le réservoir aquifère drainé par le socle fissuré. Les débits moyens se situent à 2 m^3/h environ).

b) la nappe phréatique générale de la plaine de la Région est contenue dans les dépôts quaternaires. Elle est interrompue à l'ouest par les collines de Waza et au sud-Est par la zone stérile de Galon-Gobé. Cette nappe est subdivisée en trois unités : la nappe du Chari-Tchad, la nappe du Logone et la nappe du Bec de Canard. Les caractéristiques hydrodynamiques sont très variables et témoignent de l'extrême hétérogénéité des formations ($10^{-3} < T < 10^{-7} m^2 s^{-1}$). Les débits obtenus varient en conséquence entre 0,1 et 30 m^3/h . La profondeur de la nappe augmente systématiquement lorsqu'on s'éloigne du fleuve.

c) les nappes superficielles ou perchées que l'on retrouve au niveau des nappes de Mora, du Nord Diamaré et du Logone. Elles sont localisées dans les formations dunaires (y compris le cordon dunaire). Elles sont aussi piégées dans les lentilles ou les chenaux sableux fossiles des interfluvies de la plaine de piémont.

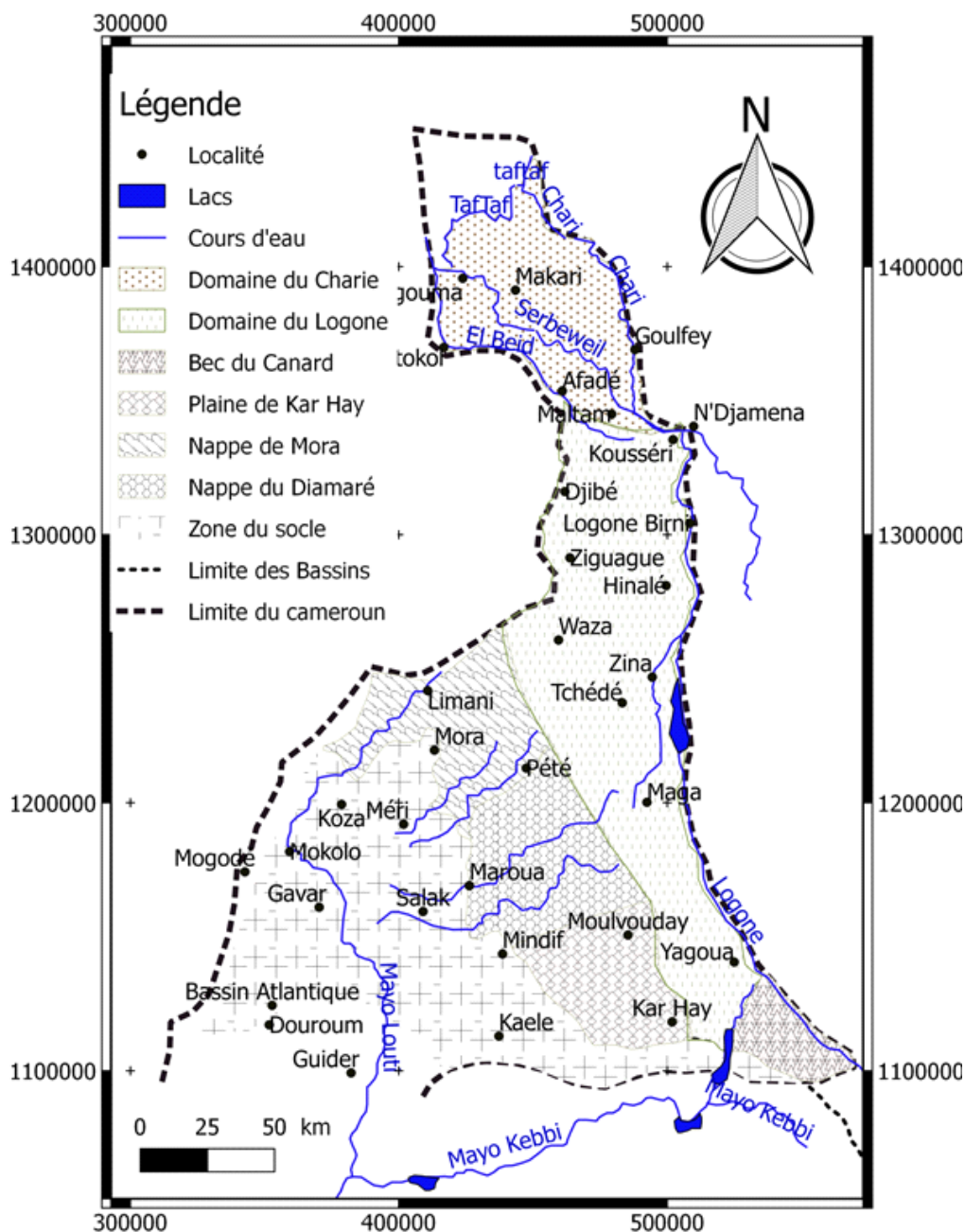


Figure VII: Hydrogéologie de l'Extrême-Nord du Cameroun (Detay, 1987)

1.3.4 Travaux géophysiques antérieurs

En réponse à une demande croissante pour des besoins scientifiques et industriels, la production des MNT a subi une évolution croissante durant les deux dernières décennies. Graham (1974) fut le premier à montrer l'utilité de l'InSAR pour l'extraction de la topographie du terrain. Cette évolution a commencé avec l'intégration du support informatique et la production du premier MNT en 1975 par l'USGS (Meade, 2008). Le lancement des satellites d'observation de la Terre utilisant des capteurs tant Optiques que

Radar ont permis par la suite de produire des MNT mondiaux couvrant la plupart des surfaces terrestres. Nous avons comme illustration la mission SRTM, lancée en février 2000 qui a recueilli les données altimétriques sur une grande partie de la masse terrestre par interférométrie d'image RSO (Rabus et al., 2003 ; Jarvis et al., 2004). Plusieurs travaux ont donc été effectués sur les MNT dans l'optique de résoudre certains problèmes de la société.

En Côte d'Ivoire, Mahaman et al., (2005) montrent l'importance des MNT et de l'imagerie satellitaire dans la cartographie des zones à risques d'inondation dans la Région montagneuse de MAN tout en reconnaissant les limites de la carte topographique (quarante mètres d'équidistance) ils abordent une approche cartographique.

Au Cameroun les travaux d'ADAMA AMAYA et al..., publiés dans l'International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 33 No. 3 (Aug 2021, pp 491-501) ont permis à partir d'un MNT de déterminer la susceptibilité aux inondations dans le Département du Diamaré dans la Région de l'Extrême-Nord du Cameroun.

Les travaux de Bruno HENQUIN, Marc TUITÉ ont permis la caractérisation du milieu physique notamment la caractérisation des domaines agricoles dans la Région du Sud-Ouest du Burkina Faso à partir des MNT.

Akame et al., (2014) ont utilisé 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.

Ce chapitre nous a permis de définir la notion d'altitude, de présenter les différentes formes de terrains et de donner les diverses généralités sur les MNT tout en présentant la zone d'étude et les travaux antérieurs en lien avec l'objet de notre étude. En raison de la rareté des travaux similaires dans notre zone d'étude, nous nous sommes plus appesantis sur l'importance et l'apport des MNT dans le cadre de l'imputation hydrologique. Le chapitre suivant s'appesantit sur les différentes méthodes et le matériel ayant permis la réalisation de la présente étude.

CHAPITRE 2 : MATERIEL ET METHODE

Les référentiels spatiaux-techniques du cadre d'étude étant connus, il est question de présenter les différentes techniques et méthodes à même de nous conduire aux meilleurs résultats possibles. Pour contribuer à la réalisation du MNT, nous avons opté pour la télédétection et les Systèmes d'Informations Géographiques (SIG). Il sera donc question tout au long de ce chapitre, de présenter tout d'abord la méthode retenue dans le cadre de notre étude, en outre le matériel ainsi que les données et enfin les logiciels.

2.1 Méthode

Cette section se focalise essentiellement sur la méthode utilisée, à savoir la télédétection et le principal outil que sont les SIG pour la réalisation de cette méthode.

2.1.1 Télédétection

Cette partie porte sur le choix de la télédétection comme méthode, sa définition et son principe.

2.1.1.1 Choix de la méthode

Seules les techniques classiques de positionnement et les techniques basées sur la technologie de télédétection peuvent fournir des données de haute densité (plusieurs points par m²) dont la précision des coordonnées dans un système de référence cartographique est de quelques centimètres. Les techniques classiques de positionnement sont néanmoins très contraignantes lorsque la densité des données nécessaires à la génération du MNT est élevée sur une grande zone d'étude (Li et al., 2005). Une comparaison des données sources utilisées pour générer un MNT, faite par Nelson et al. (2009), montre clairement que, par rapport aux autres techniques d'acquisition utilisant la technologie de la télédétection, les données obtenues par photogrammétrie et LiDAR sont celles qui permettent de produire un MNT de résolution spatiale valant quelques dizaines de centimètres avec une précision altimétrique de

quelques centimètres. Aussi, avons-nous retenu la télédétection comme méthode, notamment avec la photogrammétrie satellitaire comme mode d'acquisition des données.

2.1.1.2 Définition de la télédétection

La télédétection peut être définie comme l'ensemble des connaissances et techniques utilisées pour déterminer les caractéristiques physiques et biologiques d'objets, par des mesures effectuées à distance, sans contact matériel avec ceux-ci (Journal Officiel du 11 décembre 1980).

Télédétection aérospatiale = acquisition et étude d'informations sur le système terre/océan/atmosphère terrestre par des capteurs situés dans l'espace (avion, ballon, satellite), basée sur les propriétés du rayonnement électromagnétique (REM) qui interagit avec les surfaces étudiées. (Cours phy 4478 UYI).

PHOTOGRAPHIE AERIENNE



IMAGERIE SATELLITAIRE



Figure VIII: Exemples d'images aérienne et satellitaire

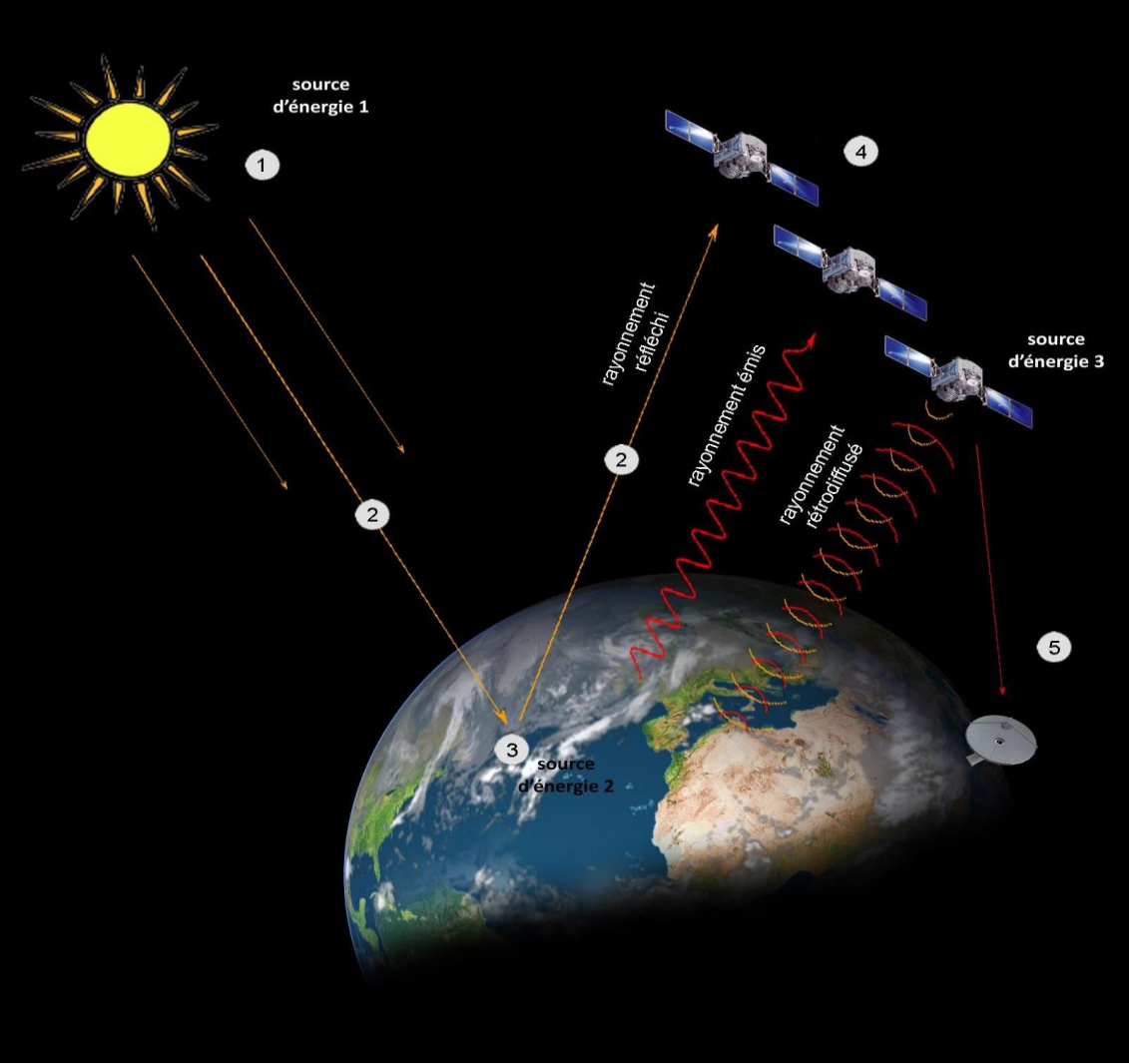


Figure IX : Principe de la télédétection

- source d'énergie = « éclaire » la cible en émettant une onde électromagnétique.
- cible = portion de surface terrestre observée par le satellite (taille : quelques dizaines de mètres à plusieurs milliers de kilomètres carrés)
- vecteur (satellite, avion ...) = mesure l'énergie solaire (REM) réfléchi par la cible.

Un des chemins du REM :

1 - La source d'énergie (REM)

En télédétection dite passive, le soleil constitue la principale source d'énergie.

En télédétection dite active, la source d'énergie est fabriquée par l'homme.

2 - Les interactions du rayonnement avec l'atmosphère ;

3 - Les interactions du rayonnement avec la surface terrestre.

Ces interactions sont de trois types : la transmission, la réflexion et l'absorption.

4 - L'enregistrement du signal par le capteur satellitaire ;

5 - La transmission et la réception des données.

Le satellite transmet les signaux vers des stations de réception au sol ou à des satellites de relais au sol ou à des satellites relais. Au niveau de ces stations, les informations sont décodées et enregistrées sous forme d'images ou de photographies.

2.1.2 Systèmes d'informations Géographiques

Cette partie porte sur la définition des SIG et de leurs principes

2.1.2.1 Définitions

Les SIG peuvent avoir plusieurs définitions et interprétations en fonction du domaine dans lequel on se situe ; il n'existe donc pas une définition unique pour ce concept. En principe, le terme SIG désigne à la fois :

- ✓ le concept de chaîne de traitement numérique de l'information géographique ;

- ✓ les outils informatiques qui permettent de l'instrumenter ;
- ✓ et les applications qui sont construites avec cet outil.

Dans l'optique de garder ce caractère polysémique, l'on constatera que les définitions sont donc relativement générales en fonction du domaine et des auteurs. D'une part, un SIG peut se définir comme étant "un système informatique permettant, à partir de diverses sources, de rassembler et d'organiser, de gérer et de combiner, d'élaborer et de représenter des informations localisées géographiquement contribuant notamment à la gestion de l'espace" d'après la Société Française de Photogrammétrie et de Télédétection à Strasbourg en 1989. D'autre part, il peut également se définir comme "un système pour collecter, stocker, vérifier, manipuler, analyser et restituer des données spatialement référencées à la surface de la Terre" (Smith et al., 1987).

Nous pouvons en outre signaler l'existence d'un synonyme appelé SIRS (Système d'informations à Référence Spatiale), qui met l'accent sur l'aspect Système d'Informations (SI), avec ses aspects structuration des données, organisation des moyens et ressources humaines et développement d'outils.

2.1.2.2 Arborescence des données dans un Système d'Informations Géographiques

Les SIG offrent un vaste champ de possibilités permettant de représenter et de gérer les informations géographiques. Ce champ repose sur trois types de représentations ou expressions fondamentales : les entités (ensemble de points, lignes et polygones), les attributs et l'imagerie.

- **Les entités**

Les objets situés à la surface de la terre ou à proximité de celle-ci représentent les entités géographiques. Il peut s'agir d'éléments naturels (fleuves et végétation), de constructions (routes, pipelines, puits et bâtiments) et de subdivisions du sol (comtés, divisions politiques et parcelles).

Les entités géographiques sont généralement représentées par des points, des lignes ou des polygones (figure X) :

- les points définissent des localisations discrètes d'entités géographiques très petites

Pour être représentées sous forme de lignes ou de surfaces (par exemple, un péage, des

poteaux électriques), les points peuvent aussi représenter des emplacements d'adresses, des coordonnées ou des sommets de montagnes ;

- les lignes représentent la forme et la localisation d'objets géographiques trop étroits pour être décrits sous forme de surfaces (axe de rue et cours d'eau). Elles permettent également de représenter des entités qui ont une longueur mais aucune surface, telles que les isolignes et les limites administratives ;
- les polygones sont des surfaces fermées (figures à plusieurs côtés) qui représentent la forme et la localisation d'entités homogènes (Etats, collectivité territoriale, parcelles, types de sol et zones d'utilisation du sol).

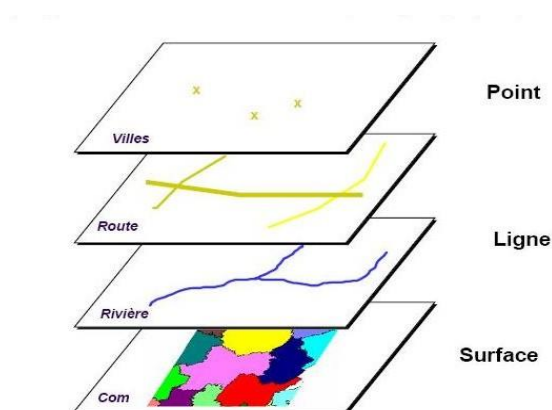


Figure X: Représentations des entités géographiques (Réseau Cartographie et Développement, 2008)

• Les attributs

Les informations caractéristiques d'une entité géographique dans un SIG, qui sont généralement stockées dans une table et liées à l'entité par un identifiant unique sont appelées attributs. Comme illustration :

- ☐ les routes sont affichées selon la classe à laquelle elles appartiennent (par exemple, des symboles linéaires représentant des autoroutes, des rues principales, des rues résidentielles, des routes non revêtues et des sentiers) ;
- ☐ les cours d'eau et les plans d'eau sont le plus souvent affichés en bleu ;
- ☐ les rues des villes sont étiquetées avec leurs noms et souvent quelques plages d'adresses ;

□ les symboles ponctuels et linéaires particuliers désignent des entités spécifiques (voies ferrées, aéroports, écoles, hôpitaux et incidents de divers types).

Les attributs descriptifs sont gérés dans les tables, qui sont basées sur une série de concepts de base de données relationnelles essentielles. Les tables attributaires fournissent un modèle de données simple et universel pour stocker et utiliser des informations attributaires. Elles sont fondamentalement ouvertes car leur simplicité et leur souplesse garantissent la prise en charge d'un large éventail d'applications. Les concepts clés sont notamment les suivants :

- les données descriptives sont organisées en tables attributaires ;
- ces tables contiennent des lignes ;
- toutes les lignes d'une table possèdent les mêmes colonnes ;
- chaque colonne possède un type de caractères, par exemple, entier, nombre décimal, booléen, texte ou date ;
- ces concepts sont étendus afin d'englober une série de fonctions relationnelles et d'opérateurs qui fonctionnent sur les tables et leurs éléments de données, dans des bases de données relationnelles. C'est ce que l'on appelle le « Structured Query Language » (SQL, langage d'interrogations structuré).

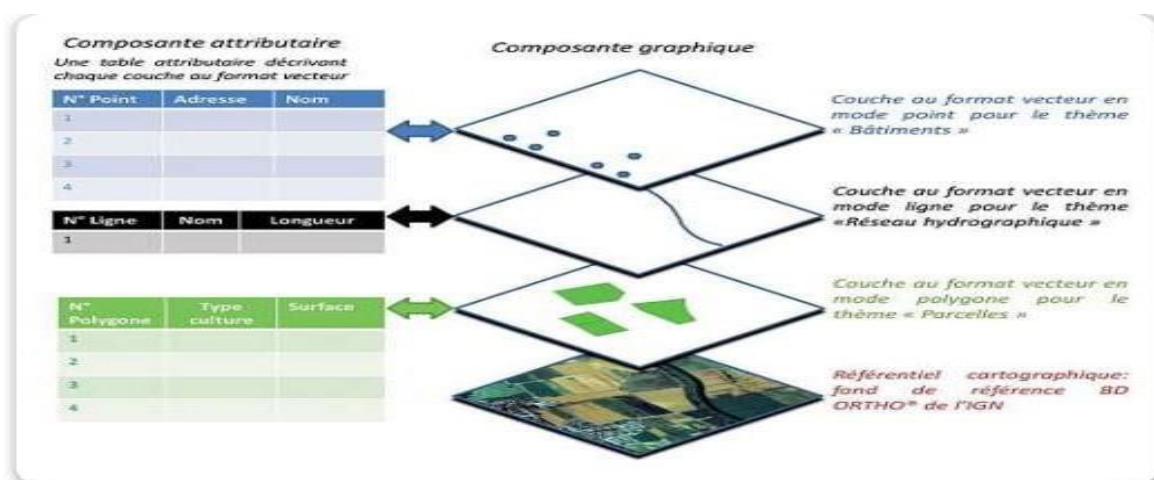


Figure XI: Composantes du format vecteur (<https://resources.arcgis.com>)

- **Imagerie**

Une multitude des types de sources de données basées sur les cellules ou les pixels pour les satellites, la photographie aérienne, les modèles numériques d'altitude, les jeux de données raster, font référence à l'imagerie dans les SIG. L'imagerie est gérée comme un type de données raster composé de cellules organisées dans une grille de lignes et colonnes. Outre la projection cartographique, le système de coordonnées d'un jeu de données raster inclut sa taille de cellule et une coordonnée de référence correspondant généralement au coin supérieur ou inférieur gauche de la grille.

Ces propriétés permettent de décrire un jeu de données raster à l'aide d'un ensemble de valeurs de cellules, à partir de la ligne gauche supérieure.

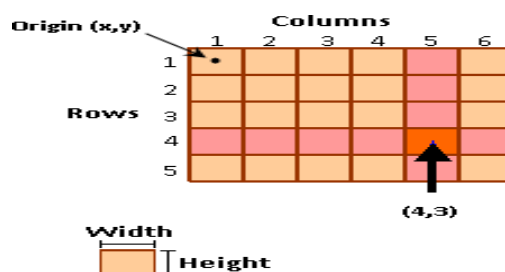


Figure XII: Description du format raster (Source : <https://resources.arcgis.com>)

Les images proviennent généralement de caméras capables de capturer des photographies aériennes pouvant être géoréférencées et corrigées par rapport à des localisations au sol (orthophotographie numérique).

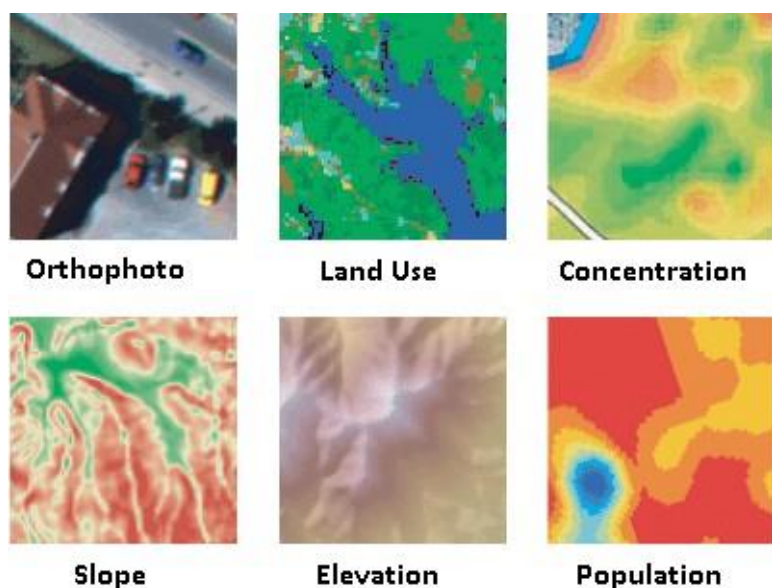


Figure XIII: Typologie de l'imagerie (www.ressources.arcgis.com)

L'imagerie permet aussi la collecte des données dans les parties visibles et invisibles du spectre électromagnétique. Un exemple de ce type de système est le scanner multi spectral, transporté par les satellites LANDSAT, qui enregistrent des images dans sept canaux (ou plages) le long du spectre électromagnétique. Les mesures correspondant à chaque canal sont enregistrées dans une grille séparée. La pile de sept grilles compose une image multicanale.

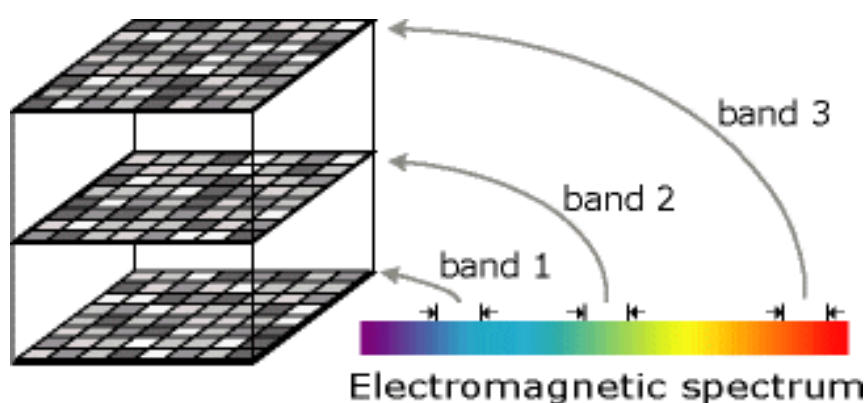


Figure XIV: Transformation du spectre électromagnétique vers les grilles (<https://resources.arcgis.com>).

2.1.2.3 Fonctionnalités d'un SIG

La perspective fonctionnelle cherche à comprendre comment fonctionne un SIG. Pour pouvoir atteindre ses différents objectifs, le SIG possède différentes fonctionnalités : abstraction, acquisition, archivage, analyse et affichage : c'est la méthode des 5A.

- **Abstraction**

L'abstraction est importante pour rendre le monde modélisable. Par exemple le relief peut être représenté par des courbes de niveau, ou par un Modèle Numérique de Terrain. D'une manière générale, cette abstraction dépend du but poursuivi. Elle se traduit par le choix des données à prendre en compte, par leur définition et leur structuration. Des classes d'objets sont définies (exemple. "Avenue"), avec leurs attributs (attribut de "Avenue" : son "nom"), mais aussi avec leurs relations de composition (telle "Avenue" est composé de tel et tel "tronçon d'avenue") et de construction (tel "tronçon d'Avenue", objet linéaire, va de tel "carrefour" à tel "carrefour", objets ponctuels). L'ensemble objets-attributs-relations constitue le Modèle Conceptuel de Données ou MCD. En fait, ce schéma peut être globalement décomposé en un volet "données sémantiques" (alphanumériques), et un volet "données géographiques" (graphiques).

On constate de même qu'un SIG est une intégration d'un Système de Gestion de Base de Données (SGBD) et d'un système cartographique dans sa mise en œuvre informatique, le SGBD prenant en charge les données sémantiques tandis que le système cartographique fait de même avec les données géographiques.

Au niveau du logiciel de SIG, chaque donnée va faire l'objet d'une fiche, qui rassemblera les informations sur cette donnée, encore appelée métadonnées, ou données sur les données. Cette fiche précisera les attributs de la donnée, dont ceux communs avec une autre donnée (ce qui indiquera la présence d'une relation entre ces deux données, mais non sa nature), mais aussi le format, propre au SIG, sous lequel la donnée sera stockée.

- **Acquisition**

C'est la récupération de l'information existante, première étape une fois le modèle des données choisi. Les contraintes d'acquisition de l'information sont liées à la nature et à l'organisation des sources d'informations. Les données géographiques peuvent être soit numérisées et géoréférencées, soit importées d'autres systèmes non intégrés, notamment le traitement d'images de la télédétection, la levée de terrains. Les informations préexistantes,

doivent comporter des précisions sur leur production (date, origine, mode de calcul, etc.), qui permettront d'évaluer leur qualité et leur pertinence d'utilisation, tandis que pour les informations créées dans le cadre de l'application, ce sont les procédures de leur constitution qui en font la qualité.

Les données représentent 60 à 80 % de son coût dans la constitution d'un SIG. Il importe donc de bien spécifier les besoins afin d'optimiser les investissements. Les spécifications doivent suivre les exigences de précision et de disponibilité des données. La montée en charge implique la saisie, le contrôle et la validation des données et leur intégration dans le SIG. Les coûts de mise à jour des données doivent également être considérés pour l'évaluation du coût du SIG.

- **Archivage**

L'archivage permet de stocker les données de façon à pouvoir les retrouver et à les interroger facilement. Cette organisation se fera selon le Modèle Conceptuel des Données (MCD). Signalons que deux options existent pour manipuler les données géographiques. Certains logiciels travaillent directement avec les trois types d'objets géographiques (point, ligne, polygone) tandis que d'autres travaillent en mode tramé, c'est-à-dire qu'ils divisent l'espace en un ensemble de cellules élémentaires jointives, par exemple carrées ou hexagonales, et que chaque entité géographique, point, segment, ou polygone, est repérée selon ce référentiel.

L'opération de sélection permet d'accéder à l'information. On choisit de mettre en évidence telle ou telle information par des sélections sémantiques, au sein d'une hiérarchie, ou par des sélections sur localisation spatiale, qui constitue une caractéristique originale des SIG. On accède donc à une information spécifique par des requêtes plus ou moins complexes, qui répondent à des questions du type " Que trouve-t-on dans cette zone ? ". Le langage le plus courant pour structurer les requêtes d'accès à l'information sémantique est le langage SQL susmentionné.

- **Analyse spatiale**

Des traitements spécifiques sur les objets sélectionnés sont rendus possibles grâce à l'accès à l'information. L'analyse spatiale correspond donc à la réponse aux requêtes. Certains de ces traitements se font directement sur la base des données, sans utiliser les attributs de localisation. Mais l'originalité des SIG est de permettre des traitements sur la

dimension géographique, par exemple " Quels autres objets sont en liaison topologique (par contiguïté, distance ou chemin) avec cet objet ? ". L'analyse spatiale qu'il faut alors mettre en œuvre repose sur les relations topologiques d'inclusion, d'intersection et de proximité.

Cependant, ces opérateurs ne suffisent pas le plus souvent pour répondre à toutes les questions d'ordre spatial. Par exemple, la recherche de régularités et de discontinuités dans l'espace nécessite des méthodes et outils qui sont rarement jusqu'à présent intégrés dans les SIG.

En conséquence, il convient en général de leur associer des outils complémentaires, venant des domaines des statistiques descriptives et spatiales, notamment de la morphologie mathématique et de la reconnaissance des formes.

- **Affichage**

La restitution graphique de l'information spatialisée, sélectionnée et analysée, est une grande force des SIG. En effet, par rapport à la cartographie classique, ceux-ci permettent de varier les restitutions cartographiques en les adaptant à la demande. Celles-ci s'effectuent par les procédures de cartographie qui relèvent de la sémiologie graphique classique ou qui appartiennent à un champ nouveau de la cartographie offert par l'interface Internet, qui permet des représentations multi échelles et dynamiques.

2.2 Données et matériels

Les données et matériels ont été utilisés dans le cadre de la télédétection et des systèmes d'information géographiques.

2.2.1 Données et matériels utilisés en télédétection

Dans le cadre de ce travail, la donnée utilisée est numérique et issue des capteurs du satellite par la méthode de télédétection. Le capteur consiste à détecter le signal radiatif émis ou réfléchi par la surface et à l'enregistrer soit sous forme analogique (document qualitatif interprétable), soit sous forme numérique (données quantitatives susceptibles d'être calibrées pour accéder aux grandeurs physiques, réflectance ou luminance). Il existe deux types de capteurs : actifs, et passifs. Ces derniers sont utilisés dans le cadre de cette étude. Ils enregistrent le rayonnement naturel, lumière visible, infrarouge ou même micro-onde sous forme numérique.

Pour l'obtention du MNT de la zone d'étude, nous avons utilisé plusieurs images SRTM qui sont des fichiers de type raster dont la maille unitaire est de 30 m x 30 m de résolution et qui ont été téléchargés à partir d'un ordinateur sur le site <https://earthexplorer.usgs.gov>. La figure3.I présente l'image SRTM de la partie de l'Extrême-Nord Cameroun qui a été téléchargé.



Figure XV: Image SRTM de la partie de l'Extrême-Nord du Cameroun

2.2.2 Données et matériels utilisés en systèmes d'informations géographiques

Dans le cadre des SIG, les données sont soit sous forme de vecteur, soit sous forme raster.

Pour cette étude, nous avons utilisé :

Les données vectorielles sont issues du téléchargement dans le site de divagis.org. Ce qui nous a permis d'obtenir des données administratives du Cameroun ainsi que des données routières. S'agissant des données sur les localités des chefs-lieux des Communes, celles-ci sont obtenues à la suite du principe de numérisation avec openstreemap comme support.

Les données rasters sont de deux catégories. D'abord les données MNT sont obtenues dans le site de divagis.org, alors que les données satellitaires (Landsat 8 et Sentinel 2) sont issues des plateformes USGS et Google Earth engine. Leurs traitements ont permis d'obtenir des cartes MNT, occupation du sol, NDVI etc.

2.2.3 Les logiciels

L'analyse des données à notre disposition a été effectuée grâce à certains logiciels, à partir d'un ordinateur portable. Nous notons :

- ArcGIS version 10.5, pour le traitement SRTM et la cartographie des sites ;
- Divagis.org, pour le téléchargement des données administratives du Cameroun ainsi que des données routières ;
- Openstreemap a permis d'obtenir les données sur les localités des chefs-lieux des Communes à partir du principe de numérisation ;
- Google Earth et USGS ont permis d'obtenir les données satellitaires ;
- Microsoft Word et Excel pour l'intégration des données, la conception des classeurs et la représentation des graphes.

Dans ce chapitre, il était question de présenter les différentes méthodes d'acquisition et de traitement des données mises en œuvre pour l'atteinte de nos objectifs. Il s'agit entre autres d'une description de la télédétection et des SIG, réalisés en présentant les définitions et principes, les matériels, les données et logiciels utilisés. Dans le prochain chapitre, nous présenterons les résultats et interprétations de ce travail.

CHAPITRE 3 : Résultats et discussions

Dans cette partie, nous allons présenter les principaux résultats obtenus à partir de la télédétection et des SIG.

En raison de l'étendue de notre zone d'étude, les travaux présentés ici sont ceux réalisés dans le Département du Diamaré, plus précisément dans les Communes de Maroua I^{er} et de Ndoukoula.

3.1 Carte des MNT

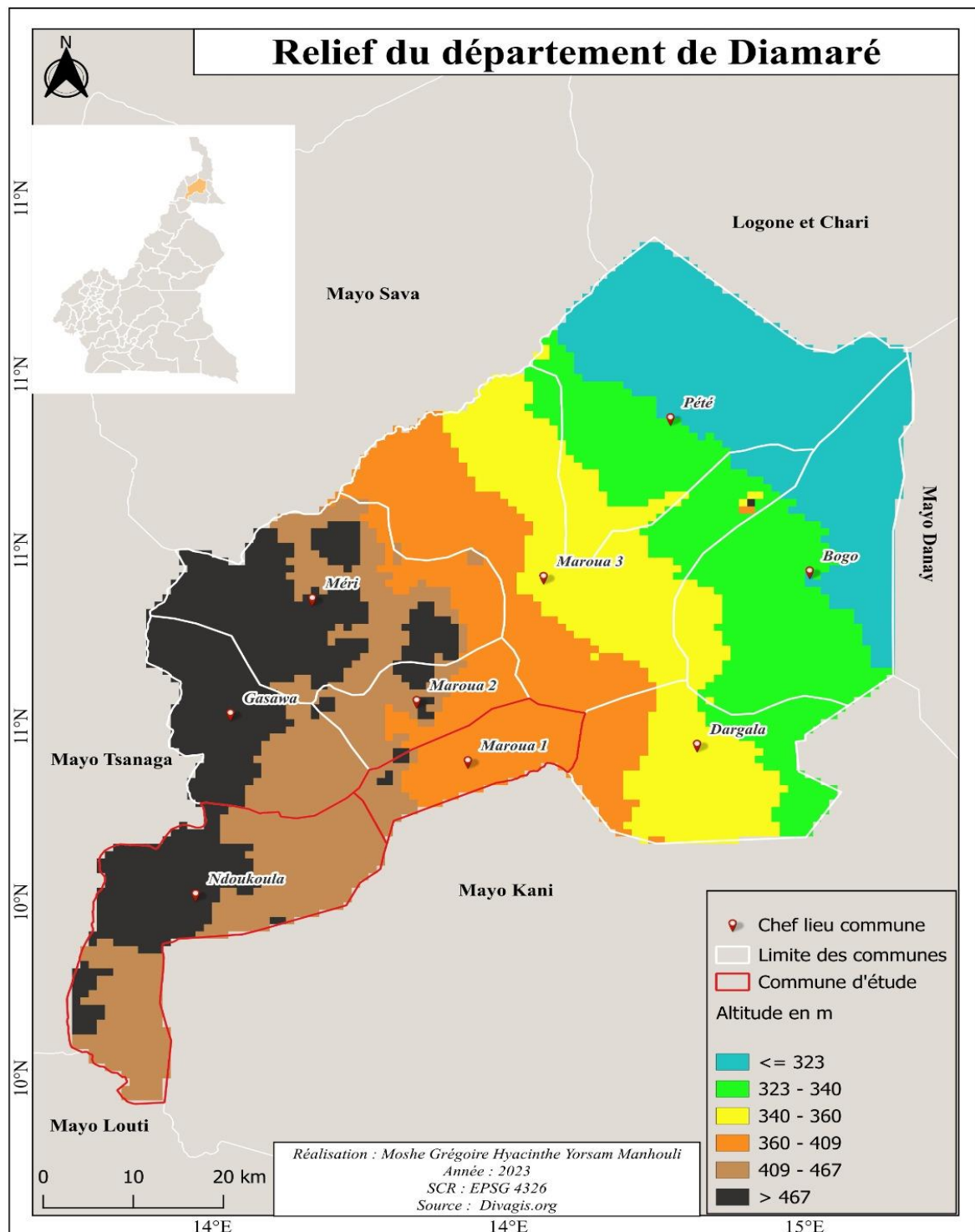


Figure XVI: Carte des MNT

La carte des MNT nous montre que notre zone d'étude est de faible altitude.

Dans la Commune de Maroua I^{er} les altitudes sont très faibles et sont comprises majoritairement dans l'intervalle [360 ;409] m tandis que dans la Commune de Ndoukoula les

altitudes faibles et comprises en majorité dans l'intervalle [409 ;467] m et sont quelque fois supérieures à 467 m par endroits.

3.2 Carte d'occupation des sols

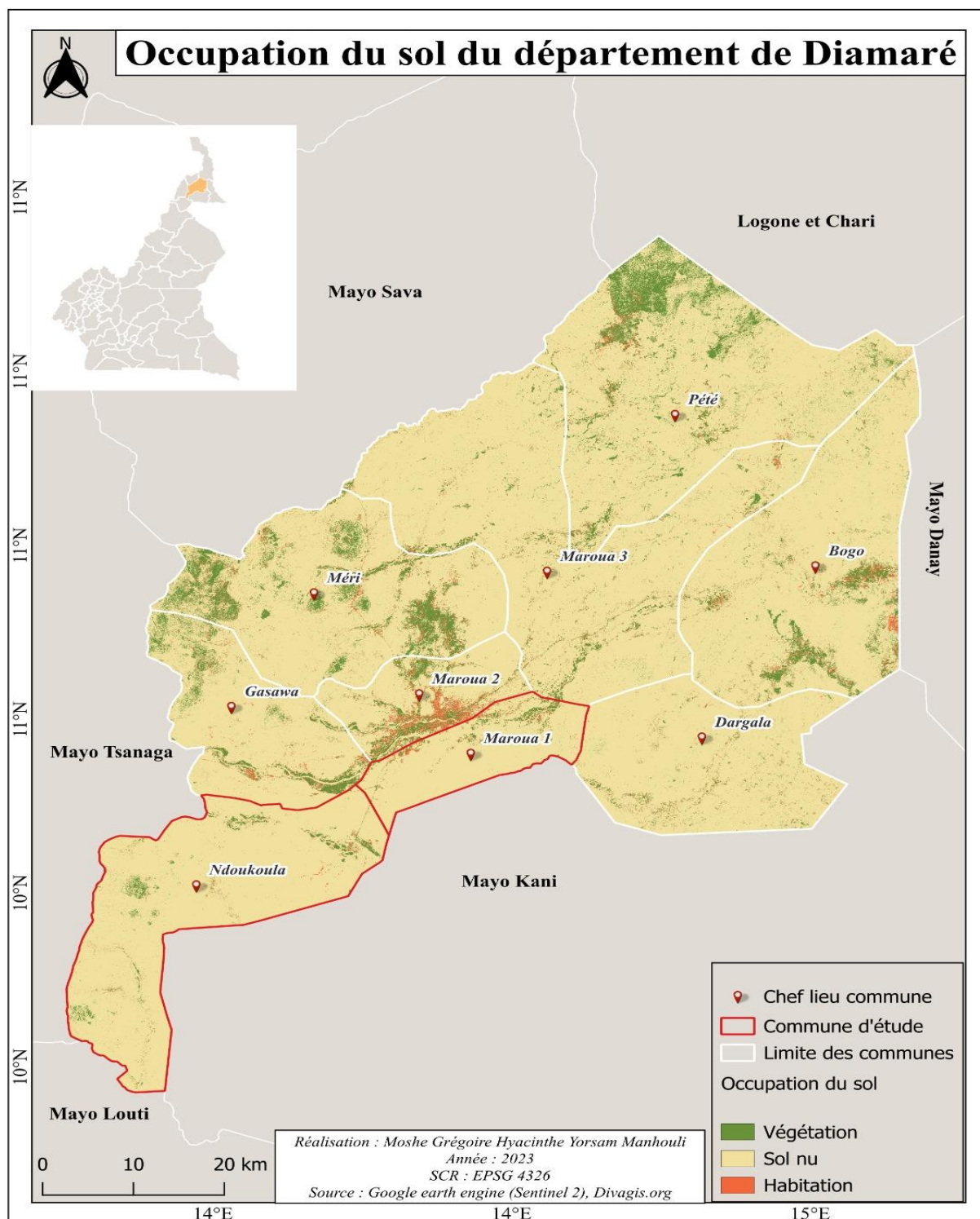


Figure XVII: carte d'occupation des sols du Diamaré

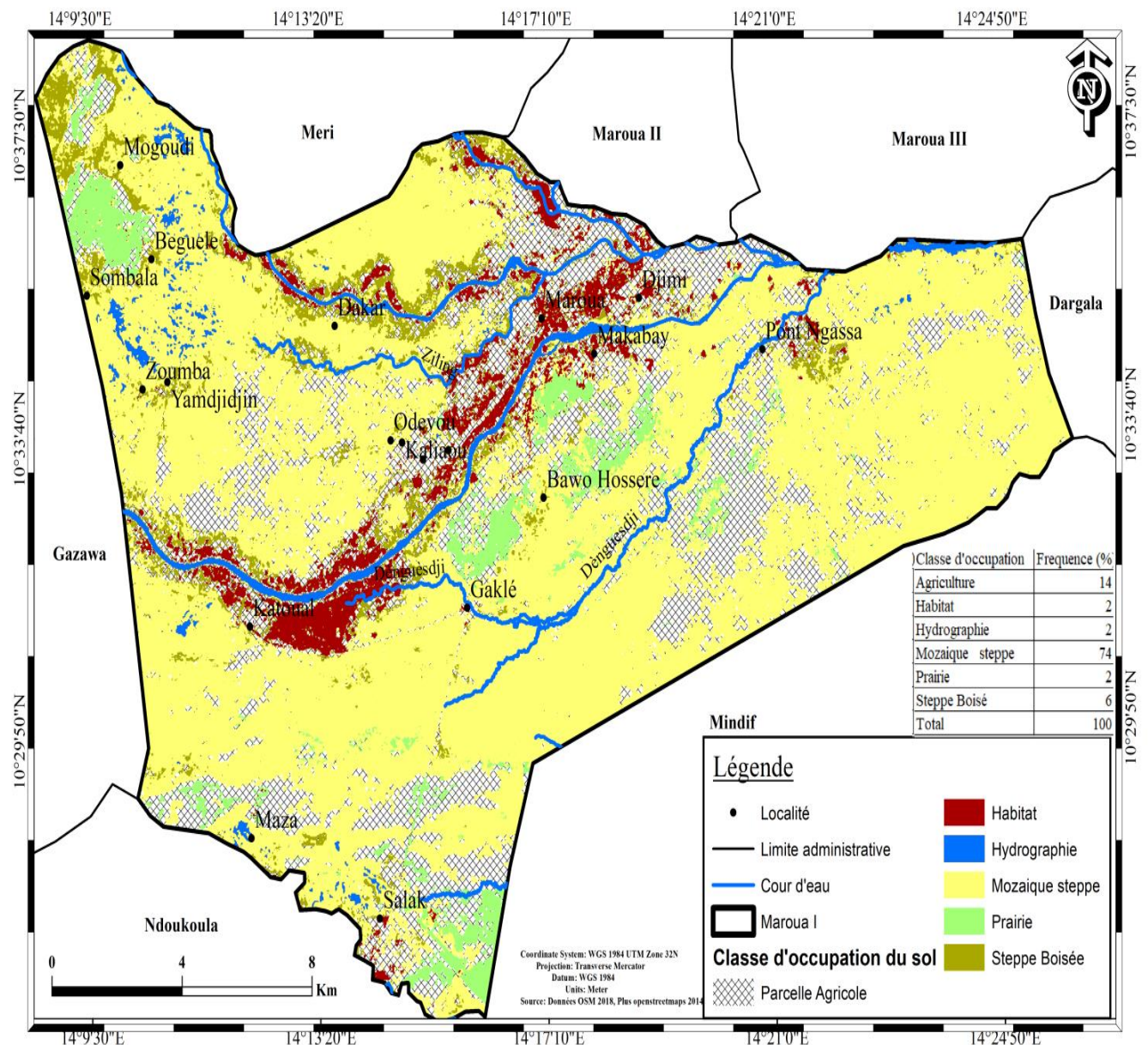


Figure XVIII: carte d'occupation des sols de la Commune de Maroua I^{er}

Dans la Commune de Maroua I^{er} la steppe mozaïque occupe 74% des sols, la steppe boisée 6% , les parcelles agricoles 14% , l'hydrographie et l'habitat 2%.

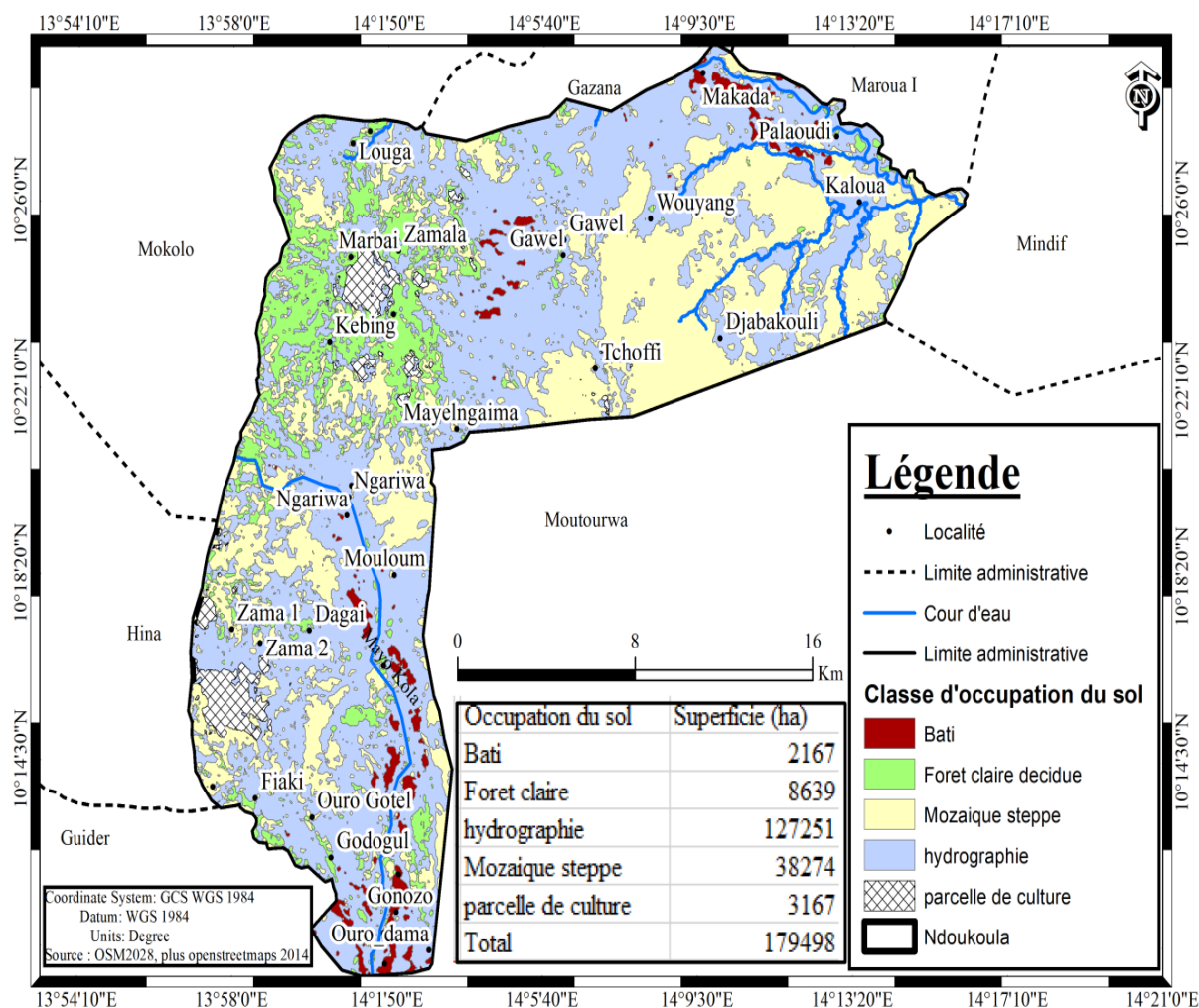


Figure XIX: carte d'occupation des sols de la Commune de Ndoukoula

Dans la Commune de Ndoukoula la steppe mozaïque occupe 21,32% des sols, la forêt claire 4,81% , les parcelles agricoles 1,74% , l'hydrographie (cours d'eau) 70,82% et l'habitat 12,2%.

En définitive, la carte d'occupation des sols nous fais savoir que nous sommes dans une zone totalement dominée par la présence des sols nus, sableux et argileux avec un taux d'urbanisation faible.

3.3 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)

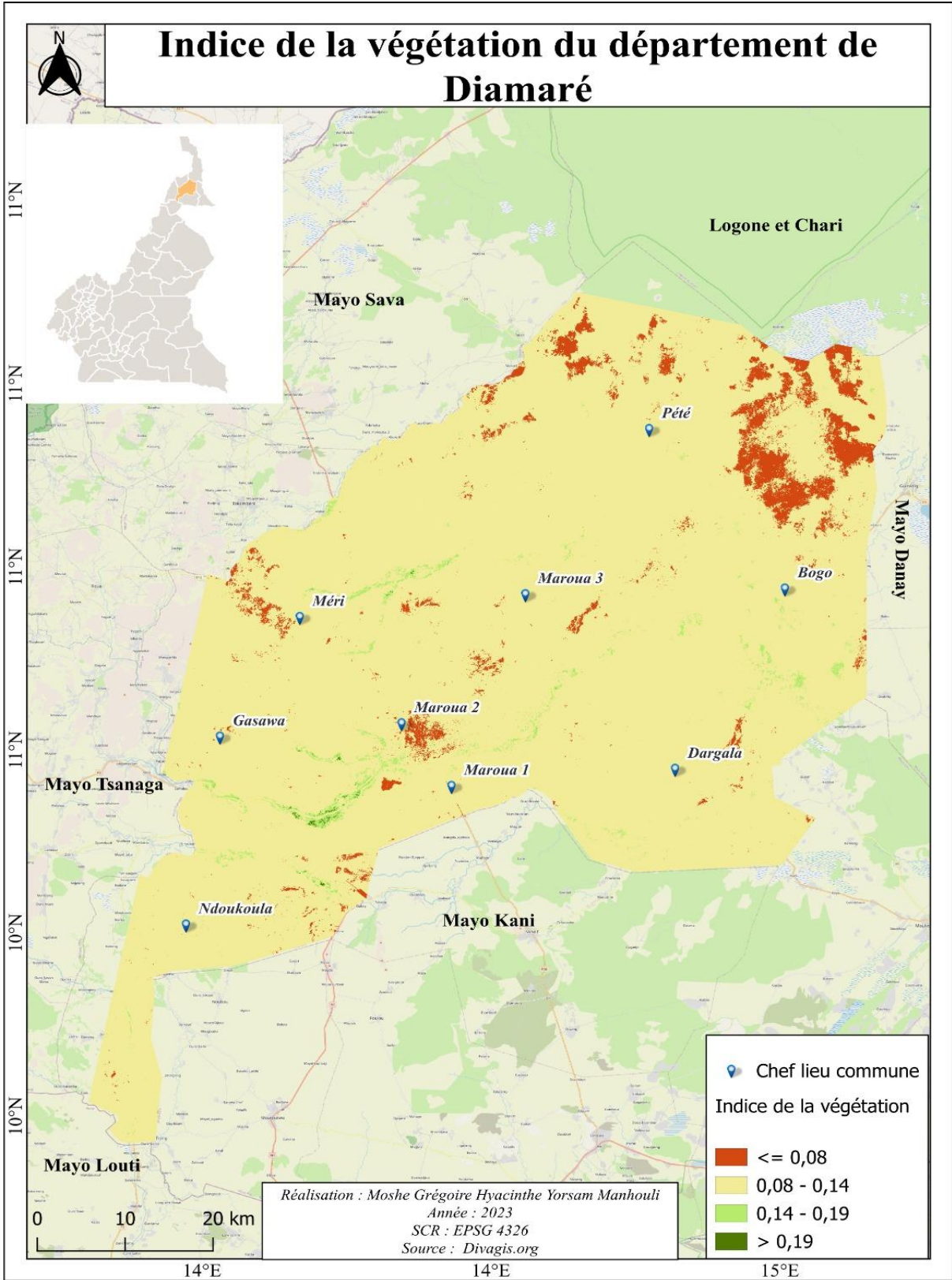


Figure XX: indice de la végétation du Département du Diamaré

La carte de NDVI nous montre que notre zone d'étude est faiblement couverte en végétation. Car l'indice varie de **0,08 à 0,19**. Ce développement mitigé que connaît la végétation est dû à sa topographie qui est basse.

3.4 Carte des pentes

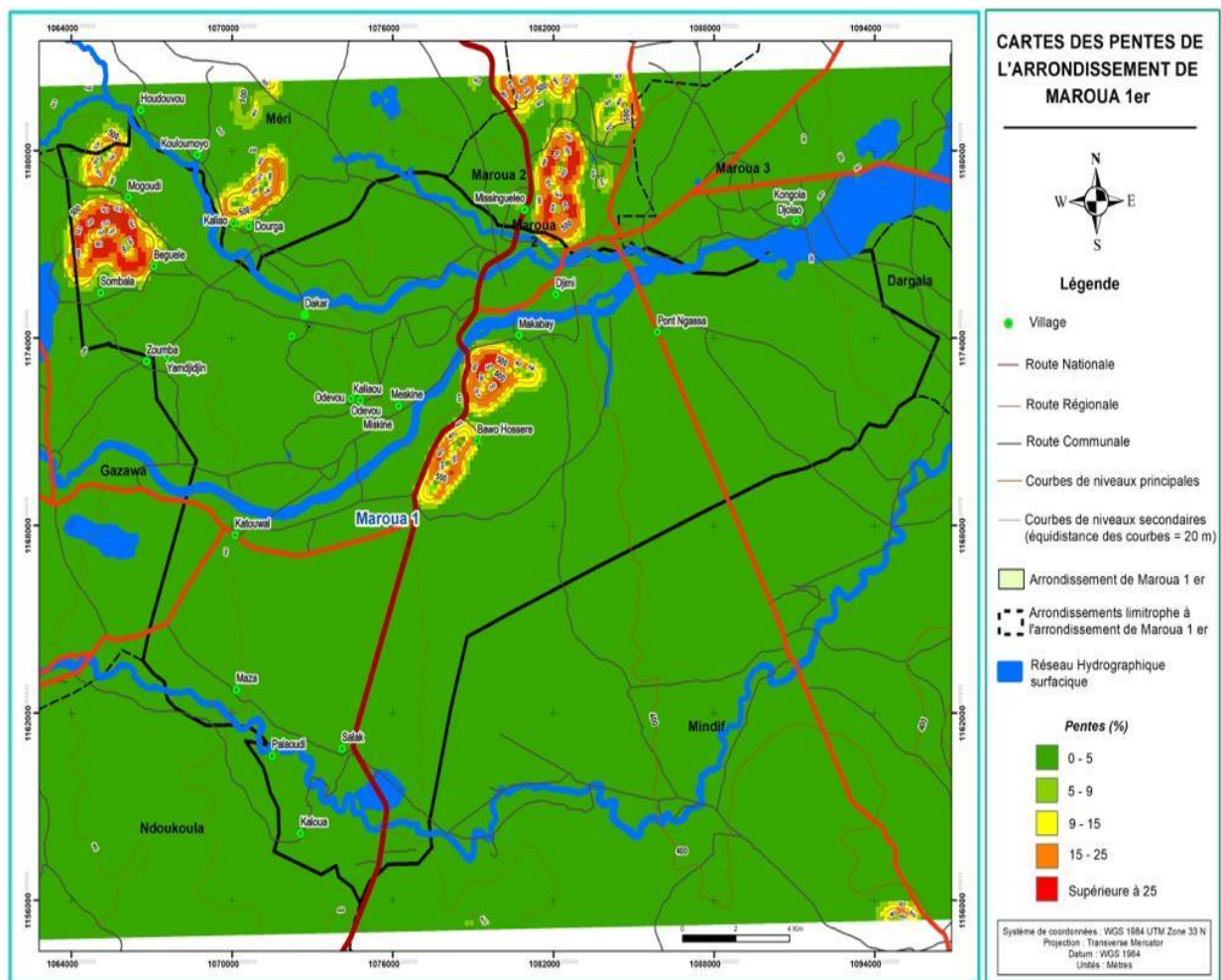


Figure XXI: carte des pentes de la Commune de Maroua Ier

La carte des pentes de Maroua I^{er} nous montre que la Commune de Maroua I^{er} est une zone à très faibles pentes. Celles-ci sont majoritairement comprises dans l'intervalle [0 ;5] %.

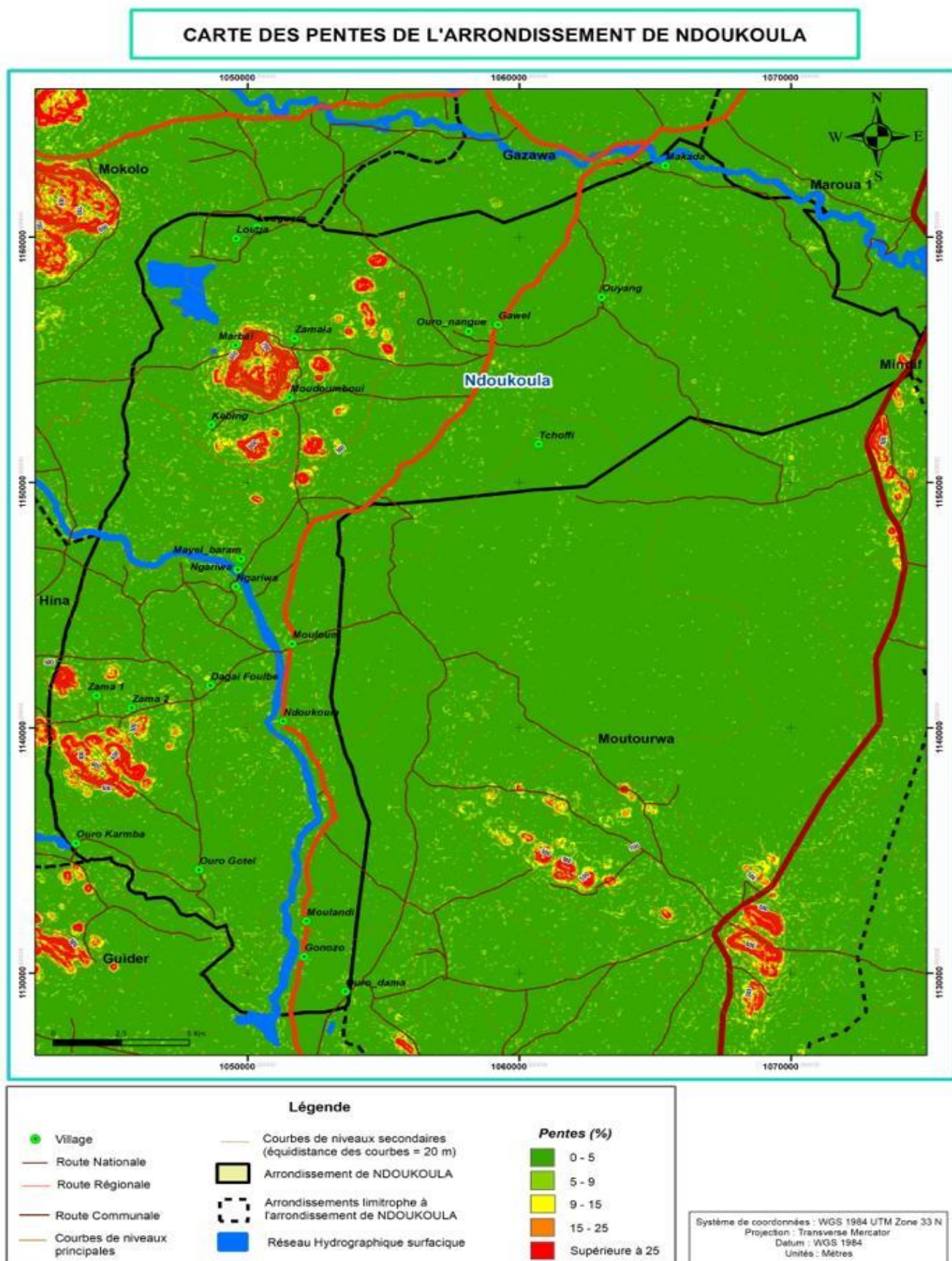


Figure XXII: carte des pentes de la Commune de Ndoukoula

La carte des pentes de Ndoukoula nous montre que la Commune de Ndoukoula est une zone à faibles pentes. Celles-ci sont majoritairement comprise dans l'intervalle [5;9] %.

3.5 Bassins versants

L'échelle cohérente de la gestion de l'eau est celle du bassin versant. Celui-ci est au cœur d'une gestion durable et équilibrée. Le bassin versant c'est un domaine dans lequel tous les écoulements des eaux convergent vers un même point, exutoire. Ainsi, toute goutte d'eau qui tombe dans ce territoire délimité par des frontières naturelles se dirige vers le cours d'eau ou ses affluents, puis vers l'aval et son exutoire. Sa délimitation est donc primordiale car c'est de lui que proviennent la plupart des paramètres nécessaires à la gestion de la ressource en eau notamment le volume d'eau qu'il draine et le débit des cours d'eaux qui s'y déversent.

Lors de la conférence de FORT LAMY, du 23 au 25 Octobre 1962, D. LE GOURIERES Chef de la Section Hydrologie du Cameroun de l'Institut de Recherches du Cameroun (IRCAM), relevant de l'Office de la Recherche Scientifique d'Outre-Mer (ORSTOM), a exposé sur **les bassins versants expérimentaux du Nord-Cameroun**. Il ressort de cette étude que les Commune de Maroua I^{er} et Ndoukoula font partie respectivement du **grand bassin versant du Mayo Tsanaga** et du **grand bassin versant du Mayo Mogodé**. Les bassins versants se déterminant à partir des lignes de séparations des eaux (les crêtes) et les lignes d'écoulement des eaux (Talwegs) ; nous avons pu, grâce au MNT à 30 m de résolution spatiale recueillir et traiter sur les logiciels SIG que sont Global Mapper et ArcGIS, déterminer les limites exactes de séparation des eaux permettant de délimiter les sous-bassins ayant un impact hydraulique sur Maroua I^{er} et Ndoukoula. Ainsi, nous avons obtenu trois sous-bassins versants 1, 2 et 3 pour la Commune de Ndoukoula et six sous-bassins versants pour la Commune de Maroua I^{er}.

3.5.1 Périmètre et superficie des sous-bassins versants

La superficie et le périmètre des sous-bassins versants sont obtenus à partir du logiciel ArcGIS. Le périmètre représente la longueur du contour du sous-bassin versant. Les différentes valeurs des surfaces et des périmètres sont consignées dans le tableau suivant.

Tableau 1: Superficies et périmètres des sous-bassins versants

Commune	Bassin Versant	Sous – Bassin Versant	Superficie (ha)	Périmètre (km)
Maroua I ^{er}	Bassin Versant du Mayo Tsanaga	Sous-bassin versant 1	65 182,4	130,58
		Sous-bassin versant 2	21 760,7	146,05
		Sous -bassin versant 3	41 623,3	132,22
		Sous -bassin versant 4	8 101,31	64,22
		Sous -bassin versant 5	5 605,33	58,53
		Sous -bassin versant 6	2 532,65	34,95
Ndoukoula	Bassin Versant du Mayo Mogodé	Sous -bassin versant 1	44 509,7	133,908
		Sous -bassin versant 2	41 841,2	115,64
		Sous -bassin versant 3	148 324	196,664

Source : MNT de Maroua & Ndoukoula

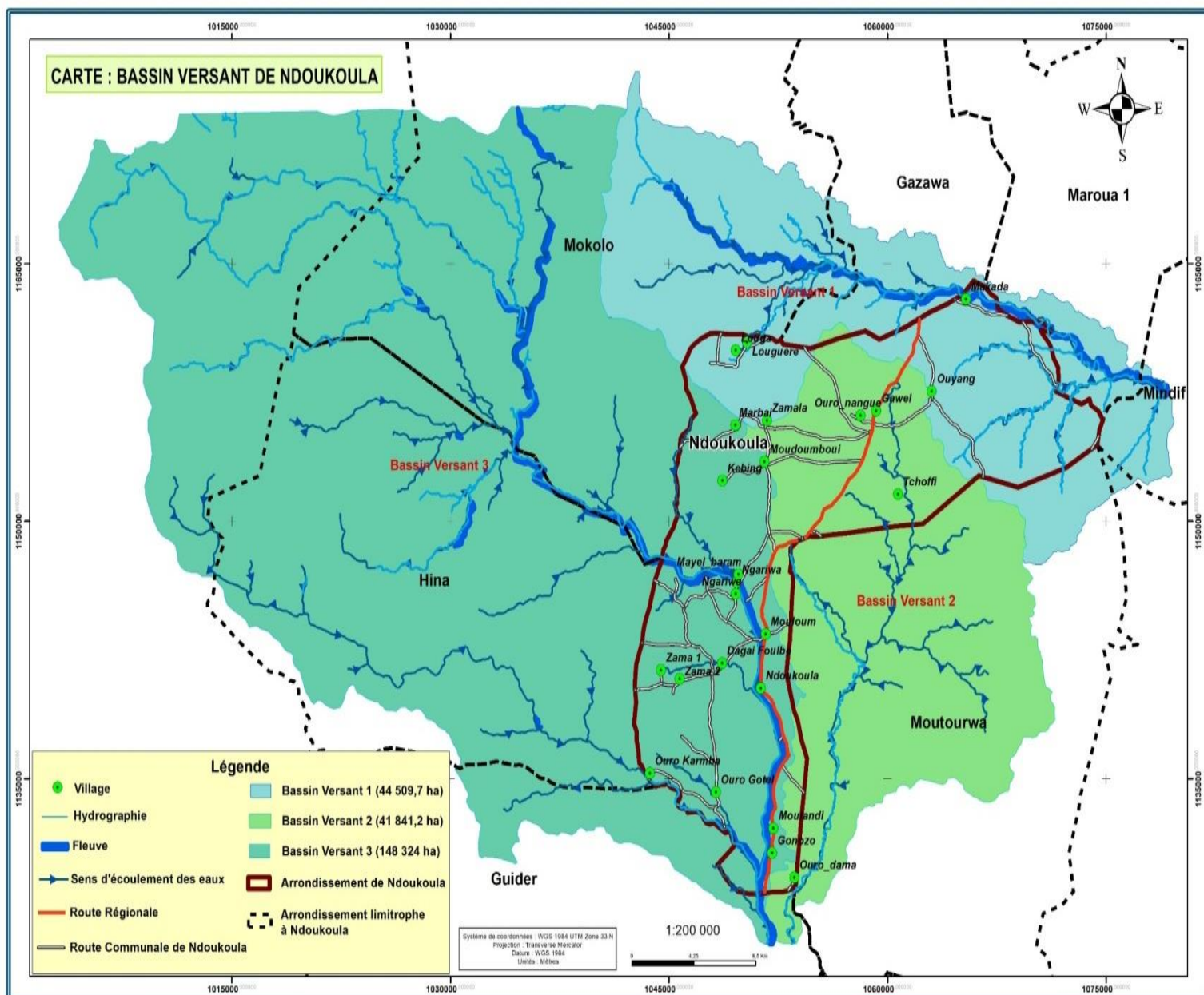


Figure XXIII: carte du bassin versant de la Commune de Ndokoula

La carte des bassins versants de la Commune de Ndokoula nous donne des informations sur le sens de l'écoulement des eaux dans cette Commune qui nous renseigne que :

- dans le sous-bassin versant 1 les eaux s'écoulent en direction du principal cours d'eau qui lui s'écoule du Nord-Ouest vers le Sud-Est du sous-bassin versant 1 ;
- dans le sous-bassin versant 2 les eaux s'écoulent en direction du Centre du sous-bassin pour y rejoindre la rivière avant de s'écouler du Nord vers le Sud ;

- dans le sous-bassin versant 3 les eaux s'écoulent en direction du Mayo Louti. Celles-ci s'écoulent à leur tour du Nord vers le Sud-Est du sous-bassin versant 3.

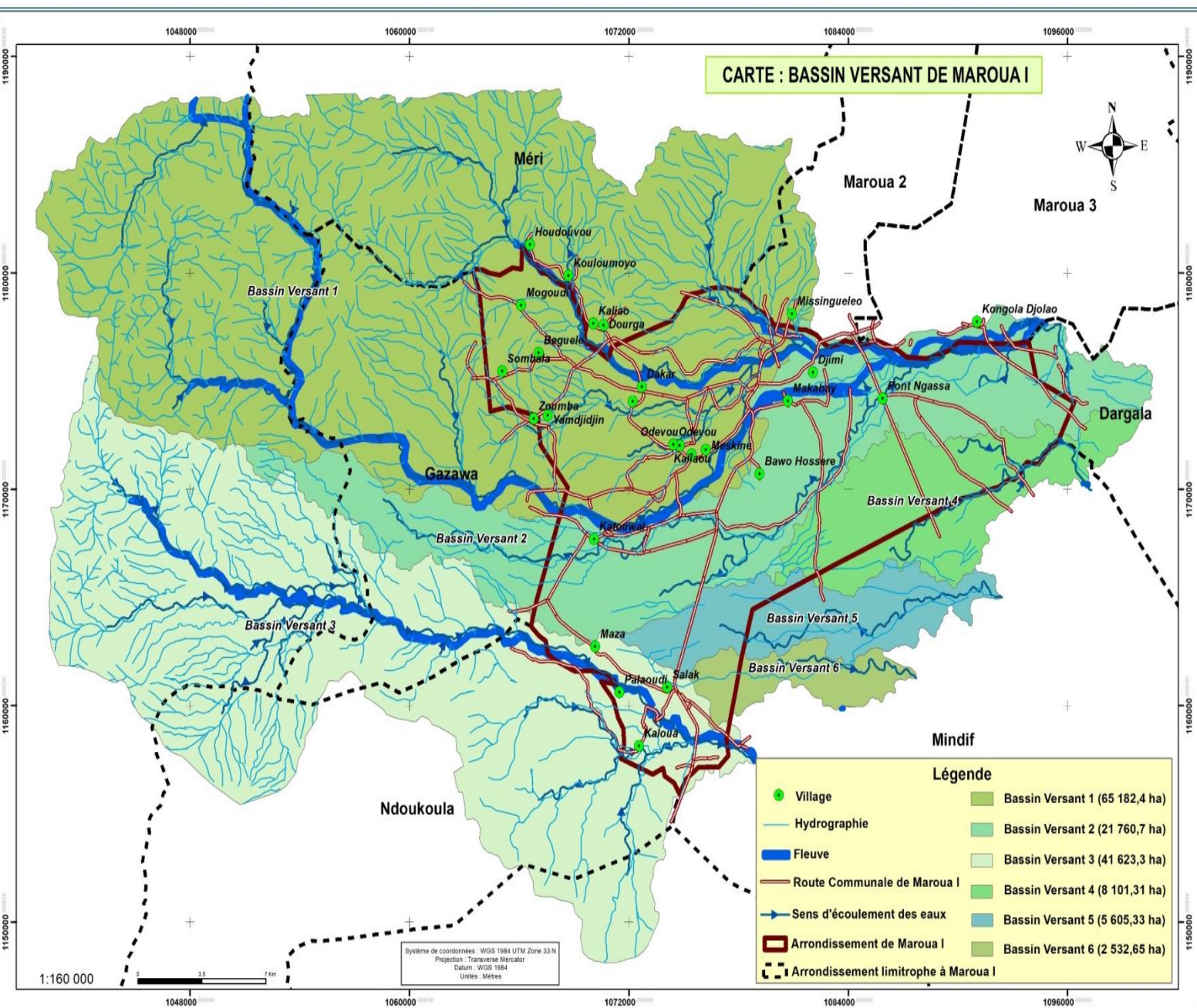


Figure XXIV: carte du bassin versant de la Commune de Maroua I^{er}

La carte des bassins versants de la Commune de Maroua I^{er} nous donne des informations sur le sens de l'écoulement des eaux dans cette Commune qui nous renseigne que :

- dans le sous-bassin versant 1, les eaux s'écoulent de l'Ouest vers l'Est du sous-bassin versant 1 ;
- dans le sous-bassin versant 2, les eaux s'écoulent cette fois-ci de l'Ouest vers l'Est avant de changer de direction au Centre de Maroua I^{er} et s'écouler en direction du Nord de la Commune de Maroua I^{er} ;
- dans le sous-bassin versant 3, les eaux s'écoulent en direction du fleuve qu'abrite le bassin versant qui lui s'écoule du Nord-Ouest au Nord-Est ;
- dans le sous-bassin versant 4, les eaux s'écoulent du Sud vers le Nord-Est ;
- dans le sous-bassin versant 5, les eaux s'écoulent de l'Ouest vers le Nord-Est ;
- dans le sous-bassin versant 6, les eaux s'écoulent de l'Ouest vers le Nord-Est.

3.5.2 Le coefficient de compacité de Gravelius « Kc »

Outre les conditions climatiques qui gouvernent le fonctionnement d'un bassin versant, ses caractéristiques physiques influencent le volume (en terme de bilan) et la répartition temporelle (en terme d'hydrogramme) des écoulements (Roche, 1963). Par caractéristiques physiques il faut non seulement entendre la topographie, la géologie, la nature et l'occupation du sol, mais également la forme du bassin dont on conçoit bien qu'elle influence les caractéristiques de l'écoulement résultant d'une pluie donnée (Roche, 1963 ; Strahler, 1964). Ainsi, le coefficient de compacité de Gravelius qui est le rapport entre le périmètre du bassin versant et la circonférence du cercle ayant la même superficie que ce bassin, nous renseigne sur la forme du bassin versant qui a une influence sur le débit des crues.

$$Kc = \frac{P}{C}$$

Avec :

- $C = 2\pi R$; la circonférence du cercle

- P : le périmètre du bassin versant

- A : la superficie du cercle ou du bassin versant

(1)

On a :

$$A = \pi R^2 \Rightarrow R = \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad \text{ou} \quad C = 2\pi \sqrt{\frac{A}{\pi}} \quad (2)$$

En combinant l'expression (2) dans (1), on obtient :

$$Kc = 0,282 \frac{P}{\sqrt{A}} \quad (3)$$

On obtient les résultats suivants :

Tableau 2: Coefficient de compacité de Gravelius des sous-bassins versants

Communes	Bassins Versants	Sous – Bassins Versants	Coefficient de Gravelius
Maroua I ^{er}	Bassin Versant du Mayo Tsanaga	Sous-bassin versant 1	1,44
		Sous-bassin versant 2	2,79
		Sous-bassin versant 3	1,83
		Sous-bassin versant 4	2,01
		Sous-bassin versant 5	2,20
		Sous-bassin versant 6	1,96
Ndoukoula	Bassin Versant du Mayo Mogodé	Sous-bassin versant 1	1,79
		Sous-bassin versant 2	1,59
		Sous-bassin versant 3	1,44

Source : Nos travaux

Pour chaque sous-bassin versant, il est à noter que le coefficient de compacité de Gravelius est supérieur à l'unité 1. Ainsi, par rapport à la forme d'un cercle, les sous-bassins versants de Maroua I^{er} et de Ndoukoula sont irréguliers. Ce qui traduit une augmentation du temps de concentration des eaux pluviales diminuant ainsi leur pouvoir érosif mais aussi des risques d'inondation plus importants. Plus le coefficient de compacité de Gravelius est important, plus ces constats sont perceptibles. Suivant les résultats obtenus, les sous-bassins versants 2, 4 et 5 de l'arrondissement de Maroua I^{er}, dont les valeurs sont supérieures à 2, sont les plus enclins à enregistrer des inondations avec un temps de concentration des eaux plus important que dans les autres sous-bassins versants.

3.5.3 Le rectangle de Gravelius

Le rectangle de Gravelius est une notion qui permet de comparer facilement des bassins versants entre eux du point de vue de l'influence de leurs caractéristiques physiques sur l'écoulement. Le rectangle de Gravelius est le bassin versant de forme rectangulaire ayant les mêmes conditions climatiques, la même surface et le même périmètre que le bassin étudié. Les dimensions du rectangle sont données par :

$$A = l * L \text{ et } P = 2(l + L) \quad (4)$$

En remplaçant l'expression de P (formule 4) dans (3) on a :

$$2(L + l) = Kc \frac{\sqrt{A}}{0,282} \quad (5)$$

En résolvant les équations (4) et (5), nous obtenons les expressions de L et l respectivement la longueur et la largeur du rectangle de Gravelius.

$$L = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,128} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{Kc} \right)^2} \right]$$

$$l = \frac{Kc\sqrt{A}}{1,128} \left[1 - \sqrt{1 - \left(\frac{1,128}{Kc} \right)^2} \right]$$

Les résultats des calculs sont consignés dans le tableau suivant.

Tableau 3: Longueur et largeur du rectangle de Gravelius des sous-bassins versants

Communes	Bassins Versants	Sous – Bassins Versants	Longueur (m)	Largeur (m)
Maroua I ^{er}	Bassin Versant du Mayo Tsanaga	Sous-bassin versant 1	52 988,84	12 301,16
		Sous-bassin versant 2	69 912,44	3 112,57
		Sous-bassin versant 3	59 062,69	7 047,31
		Sous-bassin versant 4	29 349,73	2 760,27
		Sous-bassin versant 5	27 204,56	2 060,44
		Sous-bassin versant 6	15 880,15	1 594,85
Ndoukoula	Bassin Versant du Mayo Mogodé	Sous-bassin versant 1	59 469,548	7 484,45
		Sous-bassin versant 2	49 339,78	8 480,22
		Sous-bassin versant 3	79 728,32	18 603,68

Source : Nos travaux

3.5.4 Pente des bassins versants

La pente moyenne du bassin versant est le facteur déterminant du temps de parcours du ruissellement direct. Elle intervient aussi dans le calcul du temps de concentration du bassin. Plusieurs méthodes ont été développées pour le calcul de la pente moyenne, nous retiendrons celle proposée par ROCHE (1963) étant donné que le relief de la zone d'étude est modéré. (6)

$$S = \frac{\Delta H}{L}$$

Avec :

- ΔH : dénivelée totale du bassin (différence entre l'élévation du point le plus élevé du bassin et l'élévation à l'exutoire).
- L : longueur du rectangle de Gravelius

On obtient les résultats ci – après :

Tableau 4: Pentés des sous-bassins versants de Maroua I^{er} et de Ndoukoulá

Communes	Bassins Versants	Sous – Bassins Versants (SB V)	Elévation à l'exutoire (m)	Elévation du point le plus haut (m)	Longueur (m)	Pente
Maroua I ^{er}	Bassin Versant du Mayo Tsanaga	SB V 1	416	780	52 988,84	0,006869
		SB V 2	380	720	69 912,44	0,004863
		SB V 3	417	740	59 062,69	0,005469
		SB V 4	375	416	29 349,73	0,001397
		SB V 5	388	438	27 204,56	0,001838
		SB V 6	397	428	15 880,15	0,001952
Ndoukoulá	Bassin Versant du Mayo Mogodé	SB V 1	417	740	59 469,548	0,005431
		SB V 2	418	516	49 339,78	0,001986
		SB V 3	416	960	79 728,32	0,006823

Source : Nos travaux

Le sous-bassin 4 de Maroua I^{er} présente la pente moyenne la plus faible inférieure à **0,0015**. Autrement écrit, l'écoulement des eaux pluviales doit y être plus faible comparativement aux autres sous-bassins versants.

3.5.5 Temps de concentration « T_c »

Le temps de concentration est le temps que met une goutte d'eau pour parcourir la distance qui sépare l'exutoire du bassin versant, du point le plus éloigné hydrauliquement de cet exutoire. C'est un paramètre qui traduit le comportement hydraulique du bassin versant au cours de la précipitation. Pour ce travail, nous allons utiliser la formule de KIRPICH (1940), selon laquelle :

$$S = \frac{0,0194L^{0,77}S^{-0,385}}{60}$$

Avec :

- T_c: temps de concentration du bassin versant en (heure)
- L : longueur maximum du parcours de l'eau en (m)
- S : la pente moyenne du terrain

(7)

Les résultats des calculs sont présentés dans le tableau ci – après :

Tableau 5: Temps de Concentration des sous-bassins versants de Maroua I^{er} et de Ndoukoula

Communes	Bassins Versants	Sous - Bassins Versants (SB V)	Pentes	Longueurs maximums de parcours (m)	Tc (heures)
Maroua I ^{er}	Bassin Versant du Mayo Tsanaga	SB V 1	0,006869	41 990,79	7 h 59 min
		SB V 2	0,004863	47 019,08	9 h 57 min
		SB V 3	0,005469	40 553,7	8 h 29 min
		SB V 4	0,001397	19 593,95	8 h 11 min
		SB V 5	0,001838	22 196,01	8 h 07 min
		SB V 6	0,001952	13 567,67	5 h 25 min
Ndoukoula	Bassin Versant du Mayo Mogodé	SB V 1	0,005431	41 982,16	8 h 44 min
		SB V 2	0,001986	36 335,16	11 h 31 min
		SB V 3	0,006823	65 697,05	11 h 17 min

Source : Nos travaux

Il ressort de ces résultats que le temps de parcours d'une goutte d'eau du point le plus éloigné d'un sous-bassin à son exutoire est assez important, supérieur à sept heures (7h), à l'exception du sous-bassin versant 6. Aussi, il peut pleuvoir en amont des sous-bassins versants, avant que des heures plus tard (8 h 51 min en moyenne) les effets ne se manifestent en aval desdits sous-bassins versants.

3.5.6 Apport en eau pluviale pour chaque Sous-Bassin Versant

L'hydrologie permet grâce entre autres, à l'analyse de la pluviométrie de calculer les apports en eau pour un bassin versant. En supposant une répartition homogène des précipitations, l'apport en eau pluviale s'obtient par la formule ci - après :

$$V = Pr \times A$$

Avec :

- *Pr*: Précipitation moyenne du bassin versant / sous-bassin versant (un millimètre de précipitation représente 1 litre d'eau par mètre carré)

- *A* : Superficie du sous-bassin versant

(8)

On obtient les résultats ci -dessous :

Tableau 6: Apport en eau pluviale par sous-bassin versant

Communes	Bassins Versants	Sous -Bassins Versants (SB V)	Précipitations (mm)	Superficies (ha)	Volumes (m ³)
Maroua I ^{er}	Bassin Versant du Mayo Tsanaga	SB V 1	7991	65 182,4	520 807 376
		SB V 2	799	21 760,7	173 867 993
		SB V 3	799	41 623,3	332 570 167
		SB V 4	799	8 101,31	64 729 466,9
		SB V 5	799	5 605,33	44 786 586,7
		SB V 6	799	2 532,65	20 235 873,5
		Total 1			1 156 997 463
Ndoukoula	Bassin Versant du Mayo Mogodé	SB V 1	9602	44 509,7	427 293 120
		SB V 2	960	41 841,2	401 675 520
		SB V 3	960	148 324	1 423 910 400
		Total 2			2 252 879 040

Source : Nos travaux

Ainsi, près de **1.156.997.463 m³** d'eau pluviale sont susceptibles de transiter par les sous-bassins versants de Maroua I^{er} et près de **2.252.879.040 m³** par ceux de Ndoukoula.

3.6 DISCUSSIONS

Les principaux résultats obtenus dans le cadre de cet étude à l'aide de la méthode de télédétection et des SIG comme outil à ladite méthode nous ont permis d'établir les MNT dans le Département du Diamaré notamment dans les Communes de Maroua I^{er} et de Ndoukoula tout en faisant ressortir la topographie, la carte d'occupation des sols, l'indice de végétation ainsi que les cartes des pentes et des bassins versants de notre zone d'étude, en vue de déterminer l'imputation hydrologique de la Région. L'analyse des différentes cartes a permis d'avoir une idée sur les objectifs mentionnés plus haut. La production du MNT dans les différentes Communes choisies montre que l'altitude minimale à Ndoukoula est comprise par endroits entre 409 et 467 m et supérieur à 467 m à d'autres et celle de Maroua I^{er} sont comprises entre 360 et 409 m. Ce qui montre que notre zone d'étude est une zone de faible altitude avec un relief relativement plat.

En outre, la carte d'occupation des sols nous renseigne que l'habitation à l'échelle de la Commune est faible (2% à Maroua I^{er} et 12,2% à Ndoukoula) par conséquent l'impact de l'urbanisation dû à l'imperméabilité des sols qui en découle très souvent est réduite. Dans la Commune de Maroua I^{er}, les sols sont en majorité constitués par la steppe (74%) tandis qu'à Ndoukoula ils sont en majorité constitués de cours d'eaux (70,82%). La carte NDVI nous montre que la zone d'étude a un faible couvert végétal (NDVI majoritairement compris entre 0,08 à 0,14) venant du fait que la zone est faiblement arrosée en eau à cause de son climat.

La carte des pentes de nos différentes Communes d'étude nous montre que dans les Communes de Ndoukoula et Maroua I^{er} on a des pentes faibles qui favorisent une mauvaise évacuation des eaux entraînant ainsi une accumulation d'eaux comme nous le montre le coefficient de compacité de Gravelius des différents sous-bassins versants qui est supérieur à 1.

Les résultats ci-dessus obtenus se rapprochent des observations d'Adama Amaya et al, (Août 2021) sur la cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique combinée au SIG : cas du Département du Diamaré (Extrême-Nord, Cameroun).

CONCLUSION GENERALE ET PERPECTIVES

En substance, notre travail consistait à utiliser des modèles numériques de terrain pour déterminer l'imputation hydrologique dans la Région de l'Extrême-Nord du Cameroun, plus précisément dans le Département du Diamaré à travers les Communes de Maroua I^{er} et Ndoukoula. Pour atteindre cet objectif, nous avons choisi soigneusement les données utilisées, notamment les images satellitaires (Landsat 8 et Sentinel 2) provenant des plateformes USGS et Google Earth Engine. Ces données nous ont permis d'obtenir des cartes du modèle numérique de terrain, de l'occupation du sol, du NDVI (Indice de Végétation par Différence Normalisée), des pentes et des bassins versants.

L'analyse des différentes cartes nous a permis de constater que les altitudes varient considérablement d'une Commune à une autre dans la Région de l'Extrême-Nord du Cameroun, avec des altitudes maximales et minimales spécifiques à chaque Commune. Par exemple, dans la Commune de Maroua I^{er}, nous avons observé une altitude maximale de 409 m et une altitude minimale de 360 m, tandis que dans la Commune de Ndoukoula, nous avons enregistré une altitude maximale de 467 m et une altitude minimale de 409 m. La carte d'occupation du sol nous indique que dans la Commune de Maroua I^{er}, la steppe occupe 74% du territoire, tandis que l'habitat ne représente que 2%. Dans la Commune de Ndoukoula, les cours d'eau occupent 70,82% du territoire, tandis que l'habitat couvre 12,2%. La carte du NDVI révèle que la végétation est presque inexistante ($0,08 < \text{NDVI} < 0,19$). Les pentes varient également selon la Commune, avec des pentes très faibles ou faibles dominantes. Dans la Commune de Maroua I^{er}, les pentes sont majoritairement très faibles, comprises entre 0 et 5%, tandis que dans celle de Ndoukoula, les pentes sont faibles et s'étendent entre 5 et 9%.

Après avoir extrait les sous-bassins versants ayant un impact hydrologique sur Maroua I^{er} et Ndoukoula à partir du modèle numérique de terrain d'une résolution de 30 m et à l'aide des SIG, nous avons identifié trois sous-bassins versants pour la Commune de Ndoukoula et six sous-bassins versants pour la Commune de Maroua I^{er}. Pour chacun de ces sous-bassins versants, le coefficient de compacité de Gravelius est supérieur à 1. Ce qui indique que notre zone d'étude est encline aux inondations. En particulier, le sous-bassin versant 4 de la Commune de Maroua I^{er} présente un débit d'eaux pluviales plus faible par rapport aux autres sous-bassins versants en raison de la pente moyenne la plus faible ($< 0,0015$). Le temps de concentration de chaque sous-bassin versant indique que le temps de trajet d'une goutte d'eau depuis le point le plus éloigné jusqu'à son exutoire est assez long (> 7 heures). L'apport en eau pluviale de chaque sous-bassin versant est de $1\ 156\ 997\ 463\ \text{m}^3$ pour la Commune de Maroua I^{er} et près de $2\ 252\ 879\ 040\ \text{m}^3$ pour la Commune de Ndoukoula.

Ces résultats sont importants car ils serviront de base et de référence aux chercheurs pour une meilleure gestion des ressources en eau dans la Région de l'Extrême-Nord du

Cameroun. Ils permettront notamment de prendre des mesures de protection contre les inondations et de satisfaire les besoins en fonction des ressources en eau disponibles.

PERPECTIVES

Au terme de cette étude, nous pensons que plusieurs actions peuvent être entreprises afin d'appréhender davantage l'imputation hydrologique à travers les MNT de la Région de l'Extrême-Nord. De ce fait, plusieurs perspectives sont envisageables :

- effectuer des levés topographiques sur le terrain en vue d'avoir une meilleure précision sur les valeurs des altitudes et des MNT plus justes et fiables ;
- mener une enquête sur le terrain en vue de collecter les données sur les caractéristiques physiques de la zone telle que la végétation, les sols et les données hydrologiques. ;
- analyser la géographie de la zone afin de comprendre comment circule l'eau dans la Région ;
- conduire une étude combinant les données reçues par image satellitaire et celles obtenues par levées sur le terrain ;
- inciter les mairies à avoir le MNT exact concernant l'imputation hydrologique de leur unité territoriale afin de se faire une idée générale sur la gestion des ressources en eaux dans l'optique de lutter efficacement contre les inondations et améliorer l'accès à l'eau pour les populations.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Mohamar Moussa Ouédraogo, Aurore Degré, Charles Debouche (2014). « Synthèse bibliographique : le modèle numérique de terrain de haute résolution, ses erreurs et leur propagation » in Biotechnol. Agron. Soc. Environ. 2014 18(3), pp 407-421

Bruno **HENQUIN (1), Marc TÛITÉ (2) (1993).** « Cah. Orstom, sér. Pédol., vol. XXV111, n°1 », pp 55-65

Dieme L.P.M., Christophe Bouvier, Bodian A., Sidibe A. (2020). « Utilisation d'un MNT pour la construction de la topologie de drainage de l'agglomération de Dakar » in Risque ruissellement : diagnostic et solutions. Paris : SHF, pp10

Eric José **MESSI OTTOU, Sylvestre Martial NTOMBA , François NDONG BIDZANG , Joseph Martial AKAME , Sébastien OWONA et Joseph MVONDO ONDOA (2014)** « Géomorphologie structurale et risque naturel dans une portion de zone mobile du complexe du Nyong au SW Cameroun : cas de la Région Lolodorf-Mvengue » in Afrique SCIENCE 10(4), pp 288 – 298

David **GOUTX et Jean-Baptiste NARCY (2013)** « La place des modèles numériques dans la prise de conscience locale des risques d'inondations : simulations ou stimulations ? » in La Houille Blanche, n° 1, pp. 27-33

Daniel **Sighomnou (September 2003)** « CAMEROUN : GESTION INTEGREE DES EAUX DE CRUES Cas de la plaine d'inondation du fleuve Logone » in WMO/GWP Associated Programme on Flood Management, pp 1-8

Adama Amaya, Mama Ntoubé, Amadou Kepnamou Diguim, and Elvis Kah (. 3 Aug. 2021) « Cartographie de la susceptibilité aux inondations par la méthode de l'analyse multicritère hiérarchique (AHP) combinée au Système d'Information Géographique (SIG) : Cas du Département du Diamaré (Extrême-nord, Cameroun) » in International Journal of Innovation and Applied Studies ISSN 2028-9324 Vol. 33 No. 3, pp 491-501

Boyossoro Hélène Kouadio, Kan Jean Kouamé, Brice Sika, Gabriel Etienne Aké, Vami Hermann N'guessan Bi, Assa Yapi, « UTILISATION DES SIG ET DE LA TELEDETECTION POUR LA CARTOGRAPHIE DE LA SUSCEPTIBILITE AUX MOUVEMENTS D'INSTABILITE DE VERSANT DANS L'OUEST MONTAGNEUX DE LA CÔTE D'IVOIRE »

DJAKOU Rodrigue **YOPO**, **FONTEH** Mathias **FRU**, **NJILA** Roger (2015) « Vulnérabilité des systèmes d'approvisionnement en Eau Face aux Risques Climatiques en Zone Soudano-Sahélienne : Cas De Mogode, Extrême-Nord Cameroun » in JOURNAL OF THE CAMEROON ACADEMY OF SCIENCES Vol. 12 No. 2, pp 115-128

Noamen **REBAI**, Tarek **SLAMA** et **Mohamed Moncef TURKI** (2007) « Evaluation de différentes méthodes d'interpolation spatiale pour la production d'un MNT à partir des données topographiques dans un SIG » in Revue XYZ • N° 110, pp 19-28

Aline **AUBRY**, Antoine **GARDEL**, Mathieu **JEANSON** et Sandric **LESOURD** (2012) « AMÉLIORATION DE LA MODÉLISATION NUMÉRIQUE DE TERRAIN SUR UN ESTRAN INTERTIDAL DE LA MER DU NORD PAR L'APPORT DE LA TÉLÉDÉTECTION SPATIALE : THE SHORELINE DETECTION METHOD. » in Revue Télédétection vol. 11, n° 1, pp 251-262

Y. Secretan, **M. Leclerc**, **S. Duchesne** et **M. Heniche** (2001) « Une méthodologie de modélisation numérique de terrain pour la simulation hydrodynamique bidimensionnelle A methodology to construct a numerical terrain model for two-dimensional hydrodynamic simulations » in Rev. Sci. Eau, 14(2), pp 187-212

D. MAIRECHE « la PHOTOGRAMMETRIE NUMERIQUE A L'INSTITUT NATIONAL DE CARTOGRAPHIE », pp 34-39

Gouet Daniel Hervé, **Fofie Kokea** Ariane Darolle, **Koumétio** Fidèle, **Yemele** David (2021) « prospection des eaux souterraines par télédétection et méthodes géoélectrique dans les formations métamorphiques du Nord Cameroun (Afrique Centrale) » in Le journal égyptien de la télédétection et des sciences spatiales 24, pp 933-943

Nordine **NOUAYTI**, Driss **KHATTACH**, Mohamed **HILALI** (2017) « Cartographie des zones potentielles pour le stockage des eaux souterraines dans le haut bassin du Zig (Maroc) : apport de la télédétection et du système d'information géographique » in Bulletin de l'Institut Scientifique, Rabat, Section Sciences de la Terre n°39, pp 45-57

Brahim **NANGASDAI** (2016) cartographie géologique et hydrogéologique de la sous-préfecture de Biltine : caractérisation de la ressource en eau, Mémoire en Hydrogéologie et Système d'information Géographique (Hydro-SIG)

**FOOD AND AGRICULTURE ORGANIZATION Of THE UNITED NATIONS
(MONTPELLIER 1995) « TELEDETECTION ET GESTION DES RESSOURCES EN
EAU »**

**INSTITUT DE RECHERCHES SCIENTIFIQUES DU CAMEROUN (CONFERENCE
DE FORT LAMY DU 23 AU 25 OCTOBRE 1962) « BASSINS VERSANTS
EXPERIMENTAUX DU NORD-CAMEROUN » par D. LE GOURIERES**

Note de politique d'ONU-Eau sur le changement climatique et l'eau (septembre 2019)