

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

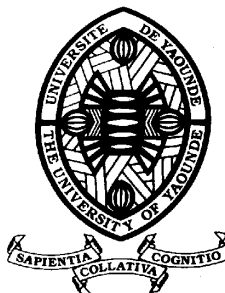
CENTRE DE RECHERCHE ET DE
FORMATION DOCTORALE EN SCIENCES
TECHNOLOGIQUES ET
GEOSCIENCES(CRFDSTG)

UNITE DE RECHERCHE ET DE FORMATION
DOCTORALE EN PHYSIQUE ET
APPLICATIONS

BP. 812 Yaoundé

Email: crfd_stg@uy1.uninet.cm

Site web: www.uy1researchstg.cm



THE UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

POSTGRADUATED SCHOOL OF SCIENCES
TECHNOLOGY AND
GEOSCIENCES(CRFDSTG)

RESEARCH AND POSTGRADUATE
TRAINING UNIT FOR PHYSICS AND
APPLICATIONS

BP. 812 Yaoundé

Email: crfd_stg@uy1.uninet.cm

Web site: www.uy1researchstg.cm

LABORATOIRE DE PHYSIQUE ET DE L'ENVIRONNEMENT TERRESTRE

LABORATORY OF PHYSICS OF EARTH'S ENVIRONMENT

**EVALUATION DE LA CONTENANCE EN EAUX
SURFACIQUES A L'AIDE DE LA MESURE DE LA
COMPLEXITE A PARTIR DE LA PENTE ORDINALE
DANS LA LOCALITE DE BAFIA-CAMEROUN**

Mémoire Rédigé en vue de l'obtention du diplôme de master

Option : GEOPHYSIQUE ET GEOEXPLORATION

Rédigé et Présenté Par :

MOUNCHILI Ismaila

Matricule : 16K2096

Licence en PHYSIQUE, Université de Yaoundé I



Sous la co-direction de :

ENYEGUE A NYAM Françoise

Maître de Conférence
Université de Yaoundé I

EYIKE YOMBA Albert

Maitre de Conférence
Université de Douala

Année académique : 2024-2025

DEDICACE

Je dédie ce travail à ma famille particulièrement à :

Mon feu père NGOUHOUE ISSAH

Ma maman NFANGAM AWAWOUE

REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier d'abord Allah, le Tout Puissant et miséricordieux qui m'a donné la force et la patience d'accomplir ce modeste travail ;

Mes remerciements vont :

- Au Professeur NDJAKA Jean-Marie Bienvenu, Chef de Département de Physique de la Faculté des Sciences de l'Université de Yaoundé I, pour tous ses conseils et enseignements ;
- Au Professeur Enyegue A Nyam Françoise Martine pour son dynamisme, sa disponibilité, sa patience, son sens de la motivation et de la pédagogie qui ont conduit à l'aboutissement de ce mémoire. Je tiens à l'en remercier pour le cadre convivial et chaleureux mis à ma disposition ;
- Au Professeur Eyike Albert qui a accepté de co-diriger ce travail
- Aux membres du jury qui me font un grand honneur d'évaluer mon travail ;
- Au Professeur Ndjanjock Nouck Philippe, Chef de Laboratoire de Géophysique et Géoexploration de l'Université de Yaoundé I, pour sa pédagogie, son esprit critique et son sens des valeurs morales qu'il a toujours eu à nous prodiguer tout au long des enseignements qu'il nous a dispensés ;
- Aux enseignants du Départements de Physique en général et en particulier aux professeurs, Ndougsa Mbarga Théophile, Meli'i Jorelle Larissa et Nouayou Robert pour leurs enseignements et leurs multiples conseils ;

Je tiens à remercier particulièrement le docteur Kouamou Njifen Serges Raoul pour son appui, son encadrement, son encouragement et ses multiples conseils qui m'ont été bénéfiques tout au long de l'initiation à la recherche.

- Aux aînés académiques, notamment NGOUOKOULO Anita, FOSSO KEGNE Sarskolin, YONKAM MBABOU Eder, Dr ABOMO ABEGA Xavier pour leurs soutiens leur collaboration et appui dans la réalisation de ce travail.

- Mes parents pour leur amour inestimable, leur confiance, leur soutien, leurs sacrifices et toutes les valeurs qu'ils ont su m'inculquer ;

- Mes frères et sœurs, PEKASSA Chitou, MOUNBAIGNOU Issoufa, TOUSSIE Ousman, MOFEN Dairou, JOUDIYIMOUN Joueretou, MAH Aicha, MANOUERE Mamatou, CHINTE Aichetou et toute ma famille pour leurs encouragements tout au long de ces travaux ;

***EVALUATION DE LA CONTENANCE EN EAUX SURFACIQUE A L'AIDE DE LA
MESURE DE LA COMPLEXITE A PARTIR DE LA PENTE ORDINALE DANS LA
LOCALITE DE BAFIA-CAMEROUN***

- Merci également à mes promotionnaires, NSANGO Adirou, MEFIRE Ousman, EYENGA Valere Lionel, NJIMAH YAYE Jojo, NSANGO Bassam, et les autres pour les échanges, collaboration, l'esprit du groupe, la solidarité et les moments inoubliables que nous avons passés ensemble ;

- A mes amis PEYOU Amza, MOUNSADE Ouzerou, NJOYA Hassan, MOUNCHIKPOU NGOUH Ahmed, NGOUM Ahoudou, YENDE Moustapha, MOULIOM Salif

Je termine en remerciant tous ceux qui d'une manière ou d'une autre ont participé à la réalisation de ce mémoire et que j'ai omis de nommer.

TABLE DES MATIERES

DEDICACE.....	i
REMERCIEMENTS	iii
TABLE DES MATIERES	v
LISTE DES FIGURES.....	vii
LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES	viii
RESUME.....	ix
ABSTRACT	x
INTRODUCTION GENERALE.....	1
CHAPITRE 1: REVUE DE LA LITTERATURE	3
1.1 Généralités en hydrogéologie	3
1.1.1 L'eau souterraine en milieu de socle	3
1.1.2 Différents réservoirs pour l'eau souterraine	4
1.1.3 Paramètre hydrodynamique des aquifères.....	4
1.2 Notion de base de la télédétection	5
1.2.1 Principe de base de la télédétection.....	6
1.2.2 Rayonnement électromagnétique	6
1.2.3 Spectre électromagnétique	7
1.3 Généralités sur la complexité	8
1.4 Présentation de la zone d'étude	9
1.4.1 Localisation géographique	9
1.4.2 Relief et hydrographie	11
1.4.3 Climat.....	11
1.4.4 Hydrographie.....	11
1.5 Contexte géologique et tectonique de la zone d'étude	12
1.5.1 La chaîne panafricaine	12
1.5.2 Série de Bafia	12
1.5.3 Contexte hydrogéologique de Bafia	13
1.6 Travaux antérieurs	14
CHAPITRE 2: MATERIEL ET METHODES	16
2.1 Acquisitions des données et matériel utilisé.....	16

**EVALUATION DE LA CONTENANCE EN EAUX SURFACIQUE A L'AIDE DE LA
MESURE DE LA COMPLEXITE A PARTIR DE LA PENTE ORDINALE DANS LA
LOCALITE DE BAFIA-CAMEROUN**

2.1.1	Systèmes GLDAS	16
2.1.2	Modèle numérique de terrain ou Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)	16
2.2	Logiciels	17
2.3	Méthode utilisée	17
2.3.1	Préparation des facteurs de conditionnement des eaux souterraines.....	17
2.4	La complexité	18
2.4.1	La mesure proposée par la complexité à partir de pentes positionnées	18
2.4.2	Définition de base.....	18
2.5	La mesure de la pente ordinale positionnée.....	21
CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSION.....		23
3.1	Présentation des résultats et interprétation	23
3.1.1	Couches thématiques.....	23
3.2	Courbe de variation de la quantité en eau surfacique.	26
3.3	Courbe de variation de la mesure de la complexité.....	28
3.4	Influence des changements climatiques sur la contenance en eaux surfaciques	30
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES		32
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES		33

LISTE DES FIGURES

Figure 1: Représentation de l'onde électromagnétique (Bonn et Rochon, 1992).	7
Figure 2: Détails des domaines spectraux (Bonn et Rochon, 1992).	8
Figure 3: Localisation de la zone d'étude.	10
Figure 4: Carte géologique du Sud Cameroun (Mvondo ondoua et al., 2007).	13
Figure 5: Exemple de codage de la pente ordinale positionnée.	20
Figure 6: Carte de la densité des linéaments.	24
Figure 7: Carte de la densité de drainage.	25
Figure 8: Carte de pentes.....	26
Figure 9 : Courbe des variations de la quantité en eau surfacique.	27
Figure 10: Courbe de variation de la complexité des eaux surfaciques en fonction des mois.	28

LISTE DES ABREVIATIONS ET SYMBOLES

Abréviations

TWS	: Terrestrial Water Storage
GWS	: Ground Water Storage
BUCREP	: Bureau Central des Recensements et des Etudes de Population
MNT	: Modèle Numérique de Terrain
COPPS	: Complexity from Ordinal Pattern Positioned Slopes
OPPS	: Ordinal Pattern Positioned Slope
PE	: Permutation Entropy
DD	: Densité de Drainage
DL	: Densité de Linéament
PT	: Pente
NASA	: National Aeronautics and Space Administration
GLDAS	: Global Land Data Assimilation System
SRTM	: Shuttle Radar Topographic Mission
NOAH	: National Oceanic and Atmospheric Administration
NetCDF	: Network Common Data Form File
SIG	: Système d'Information Géographique
MATLAB	: Matrix Laboratory

Symboles

$\{x_t\}$	: Série temporelle
T	: Longueur
t	: Indice temporel
n	: Indice d'intégration
$\{x_k\}$	: Vecteur d'intégration
X_k	: Vecteur trié
π_k	: Permutation
τ	: Temps de retard
π^0	: Vecteur ordonné de position
$\theta_k(i)$	: Fonction d'interpolation
S_k	: Grande pente
$A_0(n)$	: Cardinalité de l'ensemble des OPPS
i_k	: Position
$A_s(n)$	: Nombre de groupe / de modèles possibles
$r_E(n, \tau)$	: Forme normalisée
$r_s(n)$	: Groupe S-link multi-larg moyen
$R(n, \tau)$	: Nombre de modèle distinct ou Nombre de motif distinct
$\lambda_s(n)$	: Probabilité conditionnelle
P_k	: Combinaison de la plus grande pente et de sa position

RESUME

Les populations de Bafia, dans la région du Centre Cameroun font recours à des eaux souterraines pour les usages domestiques, agricoles et industriels. Malgré la position géographique de cette zone, les habitants ont encore beaucoup de mal à s'approvisionner en eau.

L'évaluation de la contenance en eau superficielle dans la localité de Bafia, demeure une variable essentielle pour comprendre la dynamique des systèmes complexes. L'objectif principal de cette étude est d'analyser le contenu en eaux surfaciques dans la localité de Bafia en utilisant une approche innovante basée sur la mesure de la complexité. La présente étude met en exergue la variation de la mesure de la complexité en fonction des douze mois de l'année pour une période de 2002 à 2005. D'après l'analyse des graphes, durant les mois de Juin à Septembre, on observe une remontée de la variation de la mesure de la complexité traduisant une quantité en eau surfacique considérable dans la zone d'étude. Par ailleurs le mois de Novembre est marqué par une instabilité traduisant ainsi l'invariabilité du niveau d'eau. Ces résultats suggèrent que la mesure de la complexité joue un rôle crucial dans la gestion des ressources en eau surfacique dans la localité de Bafia. Les implications des résultats sont majeures, notamment pour la planification de l'utilisation des terres et la gestion de l'eau. L'intégration de la mesure de la complexité pour l'évaluation de la contenance en eau superficielle permettrait d'améliorer la précision des prévisions en eau souterraine.

Mots clés : Eaux souterraines, Cameroun, Système complexe, Mesure de la complexité.

ABSTRACT

The people of Bafia, in the Central Region of Cameroon, rely on groundwater for domestic, agricultural, and industrial purposes. Despite the area's geographical location, residents still struggle to access water. The assessment of surface water content in the locality of Bafia remains an essential variable for understanding the dynamics of complex systems. The main objective of this study is to analyse the surface water content in the locality of Bafia using an innovative approach based on the measurement of complexity. The main objective of this study is to analyse the surface water content in the locality of Bafia using an innovative approach based on the measurement of complexity. This study highlights the variation of the complexity measurement according to the twelve months of the year for a period from 2002 to 2005. According to the analysis of the graphs, we note during the month of June to September, we observe a rise in the variation of the complexity measurement reflecting a considerable quantity of surface water in the study area. Furthermore, the month of November is marked by instability, reflecting the invariability of the water level. These results suggest that the measurement of complexity plays a crucial role in the management of surface water resources in the locality of Bafia. The implications of the results are major, particularly for land use planning and water management. The integration of complexity measurement for the assessment of surface water content would improve the accuracy of groundwater forecasts.

Keywords: Groundwater. Cameroon. Complex system. Measurement of complexity.

INTRODUCTION GENERALE

L'absence de la ressource en eau constitue une menace à court, moyen, et long terme pour les pays du monde. En effet, l'eau est considérée comme une nécessité vitale pour les populations des zones urbaines et rurales. L'eau potable est considérée comme une nécessité fondamentale, et son absence constitue une menace importante pour la santé de la population. La multiplicité de son utilisation pose le problème d'adéquation entre l'eau disponible et l'usage qu'on peut en faire, qu'il s'agisse du domaine agropastoral, industriel que ménager.

Au Cameroun, les populations des zones rurales et urbaines depuis ces dernières années sont confrontées aux problèmes d'accessibilité aux ressources en eau. Les besoins en eau au Cameroun en général et dans le département du Mbam et Inoubou en particulier sont importants et nécessitent la réalisation de nombreux forages. La problématique centrale de cette étude est basée sur l'amélioration de la continuité en eau dans les forages ou alors l'exploitation continue des eaux dans les forages dans la ville de Bafia

Les travaux géophysiques antérieurs menés dans la ville de Bafia et ses environs nous révèlent la présence des aquifères, malheureusement ces aquifères ont une durée de vie. Les eaux de surface sont essentielles pour l'approvisionnement en eau potable, l'agriculture, l'industrie et les loisirs. Les aquifères souterrains sont devenus une source d'eau vitale pour diverses structures, en particulier pour les gros consommateurs tels que, les ménages, les usines et l'irrigation (Verma et Patel, 2021; Hamidu et al., 2013). Les approches hydrogéologiques traditionnelles par des méthodes visuelles, géologiques et géophysiques sont coûteuses, prennent du temps et nécessitent un personnel qualifié (Jha et al., 2010; Mahato et Pal, 2019). Par contre, plusieurs études récentes ont combiné les systèmes d'informations géographiques (SIG) et les techniques de télédétection pour caractériser les eaux souterraines avec des résultats satisfaisants (Avtar et al., 2010; Magesh et al., 2012; Yeh et al., 2009; Pradhan, 2009; Thapa et al., 2017). La cartographie des zones favorables à l'implantation des forages reste peu explorée et beaucoup reste encore à faire au Cameroun. Peu de recherches ont été faites dans l'effort de caractériser les zones de potentiels d'eaux souterraines au Cameroun. Pour pallier les difficultés d'accès à l'eau potable, il est important d'évaluer la contenance en eau dans l'espace et le temps. Récemment, la mesure de complexité a été utilisée dans de nombreuses études pour comprendre les comportements et phénomènes importants (Eyebe Fouda et al., 2013, 2024). La mesure de la complexité permet de

caractériser les systèmes complexes. Elle peut être utile pour mettre en exergue les variations de la quantité en eau surfacique.

La recharge d'eau souterraine est un processus qui dépend de plusieurs facteurs de conditionnement. Il est donc judicieux d'étudier les différents facteurs en vue de cartographier les zones de recharge d'eau souterraine. Dans cette étude, la densité de drainage, la densité des linéaments et la pente ont été utilisées comme couches thématiques qui influencent la recharge des eaux souterraines. L'objectif principal de cette étude est d'analyser le contenu en eaux surfaciques dans la localité de Bafia en utilisant une approche innovante basée sur la mesure de la complexité. Ce mémoire sera structuré comme suit :

Le premier chapitre est consacré à la revue de la littérature. Nous présenterons tout d'abord les généralités en hydrogéologie et la télédétection. Par la suite, nous présenterons la région de Bafia dans son contexte géographique, climatique, hydrographique, géologique et hydrogéologique.

Le deuxième chapitre est consacré au matériel et à la méthodologie de l'étude. Il décrit les données et le matériel utilisés.

Le troisième chapitre présente les résultats obtenus et leurs discussions.

CHAPITRE 1: REVUE DE LA LITTERATURE

Dans ce chapitre consacré à la revue de la littérature, il est important de fixer les idées sur la zone qui fait l'objet de notre investigation géophysique. Nous allons dans un premier temps présenter les généralités en hydrogéologie, présenter l'importance de l'eau de surface dans l'environnement, le paramètre hydro géodynamique des aquifères, la notion de télédétection, et généralité sur la complexité. Dans un second temps nous ferons un résumé des travaux antérieurs effectués dans la zone d'étude.

1.1 Généralités en hydrogéologie

L'hydrogéologie est une science à la fois descriptive et quantitative qui étudie les relations entre l'eau souterraine et les matériaux et processus géologiques. Dans bien de régions du monde, l'eau souterraine est la source principale d'eau potable pour les populations, ou même la seule source d'eau. Elle est aussi en quantité limitée et elle court de nos jours de graves dangers de contamination par les activités humaines. Le développement et la gestion des ressources en eau sont des aspects importants de l'hydrogéologie (Kouamou Njifen et al., 2022). La décomposition de l'hydrogéologie laisse deviner qu'il doit s'agir de l'étude du mouvement de l'eau du sol :

Hydraulique : Etude des écoulements de fluides incompressibles newtoniens tels que l'eau

Souterraine : Terme qui désigne dans le contexte actuel le sol sous ses différentes formes pourvu qu'il présente, à travers les particules le constituant, une accessibilité au fluide en mouvement.

L'étude du mouvement des eaux souterraines est d'une grande importance à chaque fois que le phénomène d'infiltrations se présente (Njifen et al., 2024). Cette infiltration peut être illustrée sur plusieurs exemples :

Effet de l'écoulement interstitiel sur l'état de contrainte d'une structure poreuse ;
Etude du régime de nappe ; Simulation de l'intrusion de l'eau de mer dans un aquifère dans le cas où on est à proximité de la mer ; étude de la pollution des nappes.

1.1.1 L'eau souterraine en milieu de socle

L'eau souterraine est l'une des ressources essentielles et fiables pour la consommation et l'irrigation dans les régions de socle ; c'est pourquoi l'évaluation de sa qualité est essentielle pour la santé publique (Gaikwad et al., 2021). La sensibilisation du public à la qualité de l'eau augmente partout en raison de son effet direct sur la santé humaine. Les polluants biologiques et chimiques présents dans l'eau potable et l'eau agricole peuvent avoir des répercussions sur la santé à court et à long terme. En conséquence, de nombreuses recherches soutiennent l'idée que les caractéristiques

hydro chimiques sont essentielles pour déterminer la qualité des eaux souterraines en quantifiant la concentration de divers ions et leur impact sur la santé humaine (Shanmugasundharam et al., 2017; Wagh et al., 2017). La composition chimique des eaux souterraines varie en raison de la lithologie locale, de la vitesse d'écoulement des eaux souterraines, du temps de résidence et des interactions roche-eau. Les Eaux de surface au sein de l'environnement

1.1.2 Différents réservoirs pour l'eau souterraine

L'eau venant des précipitations et des réservoirs de surface (lacs, étangs, mers, cours d'eau, sols marécageux, etc...) finit par trouver son chemin dans les pores du sous-sol rocheux. L'eau s'infiltre en général verticalement dans la zone insaturée. Elle peut s'accumuler localement dans des poches formées par des formations imperméables (lits argileux) ; on parle alors de nappe ou d'aquifère perché. Ces aquifères perchés sont souvent saisonniers ou migrent avec le temps. L'eau par contre s'accumule en permanence et sature un volume de roche à partir d'un front plus ou moins imperméable. C'est une nappe phréatique dite libre. Sa surface peut varier avec le temps, mais dans des limites en général faibles. Dans la nappe, l'eau s'écoule plus ou moins horizontalement vers un exutoire, source ou lit d'une rivière. Au toit de la nappe libre, on distingue parfois une zone de roche saturée en eau, mais où les écoulements sont essentiellement verticaux, c'est la frange capillaire. L'eau peut aussi saturer une autre couche rocheuse sous-jacente, capable aussi d'emmagasinier et de faire circuler l'eau, et située entre deux niveaux imperméables (aquicludes) ou presque imperméables (aquitards).

1.1.3 Paramètre hydrodynamique des aquifères

La fonction d'un aquifère est d'emmagasinier les eaux souterraines, en régulant le stockage et la libération de l'eau. Les paramètres hydrodynamiques sont des indices qui définissent l'aptitude de l'aquifère à récupérer et à délivrer l'eau. Ils sont indispensables pour connaître l'aquifère et ses volumes d'eau exploitable par un puits. Par définition un paramètre hydrodynamique est un paramètre physique définissant quantitativement le comportement d'un milieu ou d'un corps conducteur vis-à-vis d'un fluide, c'est-à-dire son aptitude à le contenir et à régir les propagations d'influence. Les principaux paramètres régissant l'écoulement des eaux souterraines sont la transmissivité, la perméabilité, la porosité efficace et le coefficient d'emmagasinement. Certains paramètres sont indispensables pour connaître les débits exploitables par un forage. Ils peuvent être déterminés au laboratoire ou sur le terrain, notamment lors du test de pompage dans un puits.

La porosité : par définition c'est le rapport du volume d'eau gravitaire qu'un milieu poreux peut contenir en état de saturation puis libérer sous l'effet d'un drainage complet, à son volume total.

Les différents types de porosité sont :

- Dans les pores des roches sableuses ; c'est la porosité d'interstice.
- Dans les fissures et fractures des roches compactes sans pores interconnectés (granite, calcaire ...), c'est la porosité de fissure.
- Dans le karst, c'est-à-dire dans des réseaux de galeries ouvertes creusées par de l'eau ; c'est la porosité de karst

La perméabilité ou vitesse d'écoulement est par définition l'aptitude d'un milieu à se laisser traverser par un fluide (liquide ou gaz). Pour l'eau, la perméabilité s'exprime grâce au coefficient de perméabilité (Darcy). En 1956, Henri Darcy a réalisé diverses expériences sur le déplacement de l'eau dans un milieu poreux. Il a ainsi pu déterminer des lois régissant l'écoulement de l'eau à travers le sable. Aujourd'hui, les équations de Darcy sont toujours utilisées pour calculer les vitesses d'écoulement des eaux souterraine.

La transmissivité est un paramètre régissant le débit d'eau qui s'écoule par unité de largeur de la zone saturée d'un aquifère continu (mesurée selon une direction orthogonale à celle de l'écoulement) et par unité de gradient hydraulique. Alors la transmissivité d'un aquifère représente ses capacités à mobiliser l'eau qu'il contient. Elle se détermine lors de pompage d'essai.

Le coefficient d'emménagement est le rapport du volume d'eau libérée (ou emmagasinée) par unité de surface d'un aquifère pour une perte (ou un gain) de charge hydraulique donnée, c'est-à-dire une baisse ou une hausse de de pression, sans référence au temps. Le coefficient d'emménagement représente la quantité d'eau libérée sous une variation unitaire de la charge hydraulique c'est-à-dire sous l'effet d'une baisse du niveau d'eau. Il est utilisé pour caractériser le volume d'eau exploitable par un forage et se détermine lors de pompages d'essai.

1.2 Notion de base de la télédétection

La télédétection est une technique qui permet, à l'aide d'un capteur, d'observer et d'enregistrer le rayonnement électromagnétique (REM), émis ou réfléchi, par une cible quelconque sans contact direct avec celle-ci. Elle a connu une évolution considérable depuis les années 1844, où les premières photographies aériennes ont été réalisées avec un ballon-sonde, jusqu'à nos jours avec les lancements de satellites de plus en plus à la pointe de la technologie.

1.2.1 Principe de base de la télédétection (Bonn et Rochon, 1992).

La télédétection est une technique permettant d'obtenir à distance des images décrivant de manière plus ou moins détaillée une portion de la surface terrestre à un moment donné. Ces images sont acquises par des capteurs installés sur des plateformes aériennes ou satellitaires (avion, hélicoptère, satellite...). Ces capteurs enregistrent le rayonnement électromagnétique émis ou réfléchi par la surface du globe terrestre. Il existe différents types de capteurs, produisant plusieurs types d'images pouvant être utilisées dans un grand nombre d'applications environnementales.

1.2.2 Rayonnement électromagnétique (Bonn et Rochon, 1992).

Selon la théorie corpusculaire de la lumière, le rayonnement électromagnétique peut être considéré comme étant un flux de particules élémentaires appelées photons. Selon la théorie ondulatoire, le rayonnement électromagnétique est composé de deux vecteurs champs électrique et magnétique perpendiculaires et se déplaçant à la vitesse de la lumière (dans le vide $c = 3.10^8$ m/s). Deux propriétés principales caractérisent une onde électromagnétique : sa longueur d'onde et sa fréquence. La longueur d'onde est la distance entre deux points homologues (deux crêtes ou deux creux successifs qu'on note λ (m)). La fréquence est le nombre d'oscillations par unité de temps qu'on note ν (nombre d'oscillations/s ou Hertz (Hz)).

Selon la théorie des ondes, tout rayonnement électromagnétique possède des propriétés fondamentales et se comporte de façon prévisible. Le rayonnement électromagnétique est composé d'un champ électrique (E) et d'un champ magnétique (M) (Figure 8). Les deux champs forment un trièdre direct avec la direction de propagation du rayonnement et se déplacent à la vitesse de la lumière dans le vide.

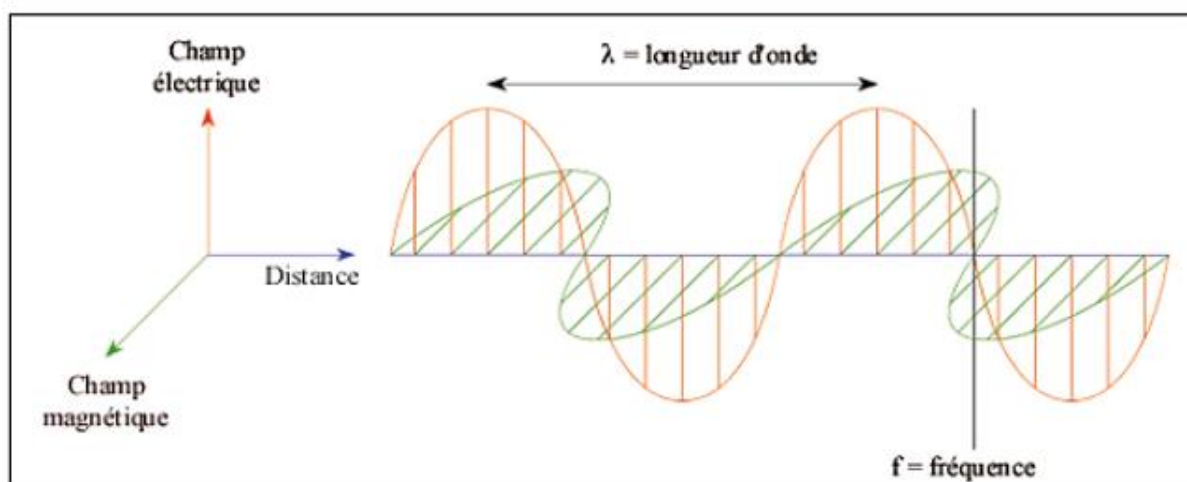


Figure 1: Représentation de l'onde électromagnétique (Bonn et Rochon, 1992).

1.2.3 Spectre électromagnétique

Le spectre électromagnétique est la décomposition du REM en ses fréquences constituantes. Il s'étend des courtes longueurs d'onde (dont font partie les rayons gamma et les rayons X) aux grandes longueurs d'onde (micro-ondes et ondes radio). L'ensemble des fenêtres de toutes les longueurs d'onde est appelé spectre électromagnétique (Figure 2). Il est constitué de plusieurs domaines à savoir :

- Spectre visible (0,4- 0,7 m) : Gamme de fréquence de l'œil humain. Rayonnement solaire maximal ; subdivisé en trois groupes : Rouge, Vert, Bleu.
- Infrarouge proche (0,7- 1,1 m) : Appelé IR réfléchi. Le rayonnement dans la région de l'infrarouge réfléchi est utilisé en télédétection de la même façon que le rayonnement visible.
- Infrarouge moyen (1,1- 8 mm) : Mélange de rayonnement solaire et d'émission. Affecte de manière significative l'atmosphère et est employé pour mesurer les concentrations de vapeur d'eau, ozone, aérosols, etc.
- Infrarouge thermique (8-14 mm) : Rayonnement émis par les organismes eux-mêmes. La température d'un corps peut être déterminée (IR thermique).
- Micro-ondes (1mm-1m) : Intérêt croissant de la télédétection dans cette bande. Les perturbations atmosphériques sont mineures et sont transparentes pour les nuages. Les capteurs actifs sont généralement utilisés.

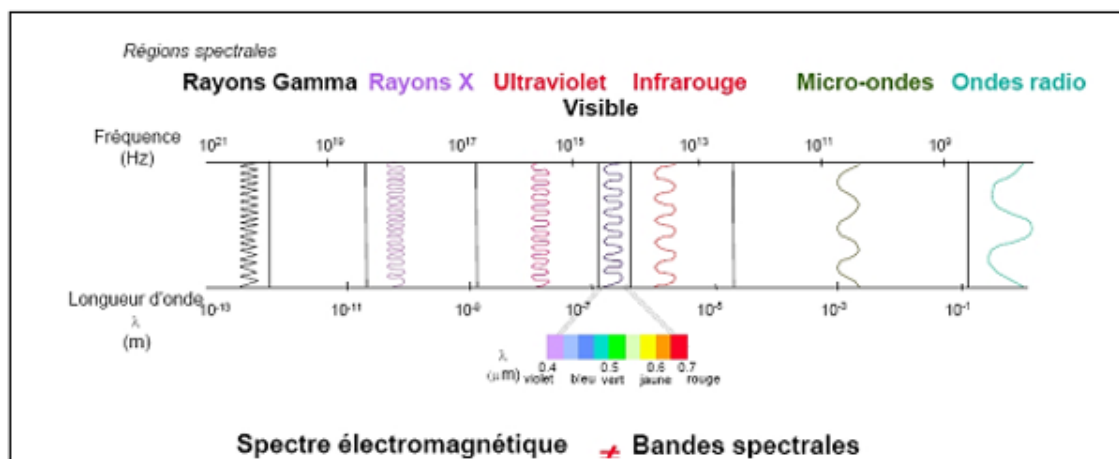


Figure 2: Détails des domaines spectraux (Bonn et Rochon, 1992).

1.3 Généralités sur la complexité

La complexité est un concept multidisciplinaire qui décrit la mesure de la complexité d'un système, d'un phénomène ou d'un problème. Elle peut être définie comme la propriété d'un système qui présente des comportements difficiles à comprendre, à prédire ou à contrôler en raison de la multitude d'éléments, d'interactions, et de relations qui le composent. La mesure de la complexité permet de caractériser le système complexe. La mesure de la complexité des systèmes dynamiques est aussi importante qu'utile pour comprendre leur comportement interne, et donc prédire des phénomènes importants. Les mesures de complexité les plus utilisées sont l'entropie et la dimension de corrélation. Le problème conceptuel fondamental de ces mesures est qu'elle s'applique à des systèmes dynamiques présumés ergodiques et nécessite des séries de données infinies, il existe d'autres mesures de complexité basées sur les séries temporelles notamment, l'entropie d'échantillon et l'entropie de Reni. Il existe différentes techniques de mesure de la complexité, notamment :

- La complexité algorithmique. Elle permet d'évaluer l'efficacité d'un algorithme en termes de ressources nécessaires, principalement le temps et l'espace.
- La complexité de Shannon, souvent appelée complexité algébrique. Elle est un concept en théorie de l'information qui mesure la quantité d'information contenue dans un message ou une source de données. En d'autres termes elle permet de quantifier la longueur minimale d'une représentation binaire d'un message, compte tenu de sa distribution de probabilité.

- La complexité de Kolmogorov. Elle mesure la quantité d'information d'un objet (comme une chaîne de caractère) en termes de la longueur du programme le plus court capable de générer une information
- La complexité de Langevin. Elle est utilisée dans l'analyse de systèmes dynamiques et de modèles stochastiques pour mesurer la complexité de la dynamique des systèmes.
- Complexité à partir de pente positionnée sur un modèle ordinal. Elle est un nouveau codage des données combinant les pentes et les positions de pente pour améliorer l'évaluation de la complexité (Eyebe Fouda et al., 2024).

La compréhension de la complexité des systèmes est essentielle pour aborder les problèmes contemporains dans de nombreux domaines. Cela nécessite une approche interdisciplinaire et des outils variés pour modéliser, analyser, et éventuellement influencer ces systèmes. La prise en compte de la complexité peut conduire à des solutions plus robustes et adaptatives aux défis rencontrés.

1.4 Présentation de la zone d'étude

1.4.1 Localisation géographique

La zone d'étude est située dans la Région du Centre chef-lieu Yaoundé au Cameroun plus précisément dans le Département du Mbam-et-Inoubou chef-lieu Bafia. Elle s'étend entre les latitudes 04'20' et 05' Nord et les longitudes 10'40' et 11'20' Est avec une altitude comprise entre 1100 et 1300 m (Figure 2). Les principales villes qu'on y rencontre sont : Bafia, Bokito, Deuk, Makénéné, Ndikiminiki, Ndom, Balamba et Ombessa. Elle couvre une étendue d'environ 4500 km² pour une population estimée à 55700 habitants en 2005 (BUCREP, 2010).

**EVALUATION DE LA CONTENANCE EN EAUX SURFACIQUES A L'AIDE DE LA
MESURE DE LA COMPLEXITE A PARTIR DE LA PENTE ORDINALE DANS LA
LOCALITE DE BAFIA-CAMEROUN**

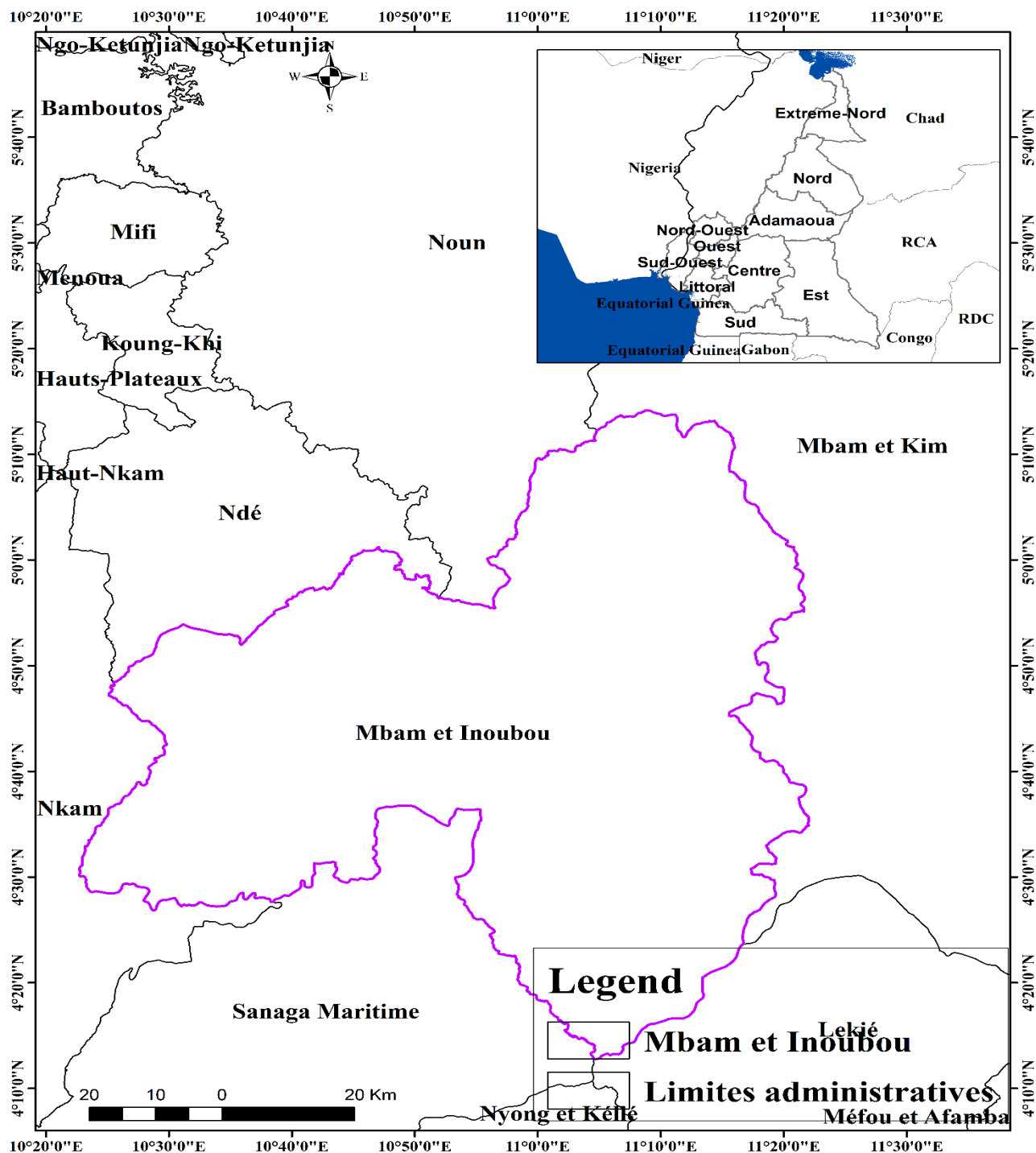


Figure 3: Localisation de la zone d'étude. . (Bisso et al.,2004 modifiée)

1.4.2 Relief et hydrographie

La zone d'étude appartient à un vaste plateau sud camerounais, son relief est constitué de surfaces plates et des plateaux, arrondis aux sommets rocheux, de montagnes aux pentes raides, de falaises escarpées, et de vallées enfoncées. Les plateaux d'altitude moyenne de 850 m couvrent 1/3 de la surface de la zone. Parmi les hauts sommets on peut citer : l'ongoduim au Sud de Ndikiminikiet de Nekond à l'Ouest.

1.4.3 Climat (Bagnouls & Gaussen (1957)).

Au Cameroun deux domaines climatiques sont observable : le domaine tropical et le domaine équatorial. Le climat qui règne dans la ville de Bafia et ses environs est de type équatorial avec quatre variabilités saisonnières, donc deux pluvieuses et deux sèches répartissent ainsi :

- Une grande saison sèche de décembre à mi-mars
- Une petite saison de pluie de mi-mars à juin
- Une petite saison sèche de mi-juin à août
- Une grande saison de pluies de septembre à novembre. Ce climat se caractérise par un total pluviométrique annuel qui varie entre 1500 et 2000 mm/an, des températures élevées et stables dont les moyennes mensuelles varient entre 23 et 26 °C. L'analyse des températures et des précipitations de la localité de Bafia montre que, les températures varient très peu avec un minimum qui se situe à 23,5 °C en août et un maximum à 26,5 °C en février. Les précipitations sont élevées en octobre. Elles peuvent jouer un rôle important dans le mécanisme de renflouement des aquifères ainsi que celui de leur pollution potentielle

1.4.4 Hydrographie

Sur le plan hydrographie, Bafia et ses environs possèdent un réseau hydrographique dense et hétérogène et s'étendent partiellement sur le bassin versant du Mbam. Elle est arrosée par trois grands cours d'eaux :

- La rivière de Makombé qui draine l'arrondissement de Ndikiminiki et Nikoutou ;
- Le Mbam (principal affluent de la Sanaga) qui draine le centre et l'ouest du département.
- La Sanaga qui régule presque tous les écoulements d'eau souterraine avec une influence accentuelle sur les arrondissements d'Ombessa et Bokito.

1.5 Contexte géologique et tectonique de la zone d'étude

Les travaux de tectonique, géochronologique et géochimie menés ces quatre dernières années ont conduit à une vision globale de la géologie du Cameroun à l'échelle de la plaque africaine, ainsi le Cameroun distingue cinq ensembles structuraux ; le craton, la couverture du craton, la chaîne panafricaine, les bassins phanérozoïques et la ligne du Cameroun. Notre zone d'étude est une portion camerounaise de la chaîne panafricaine Nord équatoriale intercalée entre les linéaments de la Sanaga au Sud, de l'Adamaoua au Nord, de Kribi au Sud-Ouest et du craton du Congo.

1.5.1 La chaîne panafricaine

La chaîne panafricaine est une zone située entre le craton ouest africain au Nord-Ouest et le craton du Congo au Sud, également appelée chaîne des Oubanguides (Ngako, 1999).

Les roches appartenant à ce domaine sont celles qui ont été soumises à la tectonique panafricaine, dont la géochronologie montre un rajeunissement à 500-600Ma. Elle est subdivisée en trois domaines géodynamiques distincts (Figure 3) ; du Nord au Sud nous avons : le domaine du Nord Cameroun, le domaine Centre Camerounais et le domaine Sud Camerounais.

Notre zone d'étude appartient au domaine Sud Cameroun, elle est représentée par le groupe Yaoundé Nord. La série étant les différentes formations morphologiques d'une zone, le groupe Yaoundé en comporte trois : la série de Bafia, la série de Lom et la série de Poli.

1.5.2 Série de Bafia

Elle a d'abord été considérée comme une écaille du socle chevauchement du groupe de Yaoundé (Toteu et al., 2006). Elle est proche des formations identifiées comme étant d'âge paléprotézoïque dans la région de Makénéné (Toteu et al., 1994). Elle a ensuite été assimilée aux granulites de Yaoundé bien qu'elle s'en distingue par sa disposition structurale et lithologique (Tchameni et al., 2001). La zone de Bafia est constituée de gneiss plus ou moins migmatique (gneiss à hornblende et biotite, grenat et biotique et à plagioclase et biotite) contenant des bandes d'amphibolite, de quartzites associés à des plutonites d'âge panafricaine. Sa composition chimique des gneiss rappelle une séquence sédimentaire, à protolite immature, constituées de grauweekes de shale. Les critères cinématiques attestent un transport de nappe vers le SSW (Toteu et al., 1994, 2006).

Bien que leurs évolutions tecto-métamorphiques soient similaires, le groupe de Bafia se distingue de celui de Yaoundé par l'abondance des méta grauweekes et la rareté des méta élite d'une autre part et par une forte rétro-morphose des assemblages granulitiques dans le faciès amphibolite d'autre part (Tchameni et al., 2001). Le zircon détritique daté à 1617 ± 16 M dans les métas

sédimentaires. Le groupe de Bafia montre que le protolite du méta sédimentaire provient des sources d'âge fini-paléoproterozoïque à l'évolution crustale de la chaîne panafricaine d'Afrique centrale. Il est plus vraisemblable que les sources ayant alimenté les sédiments du groupe de Bafia aient été situées au Nord (domaine de l'Adamaoua) plutôt qu'au Sud dans le craton du Congo (Ngako et al., 2003).

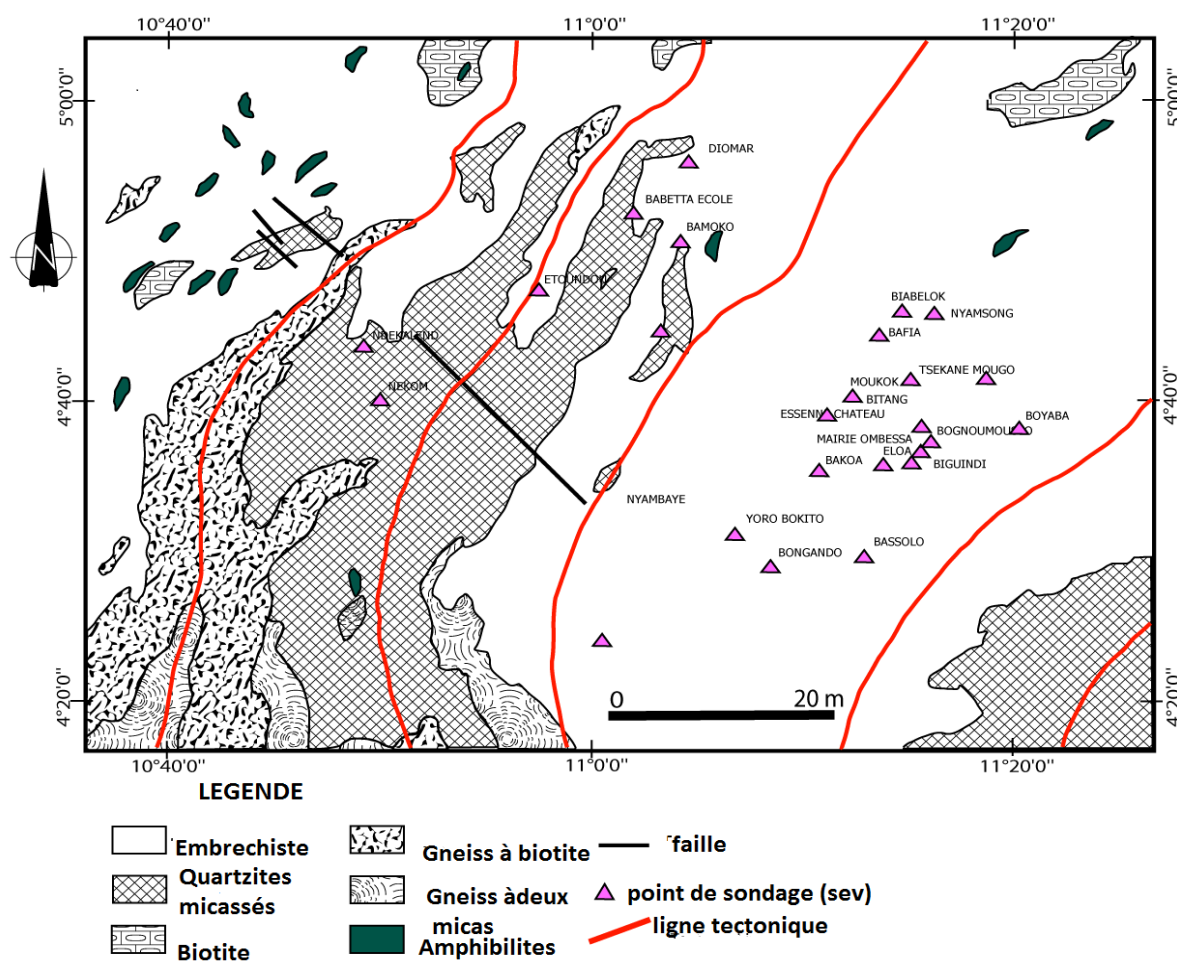


Figure 4: Carte géologique du sud Cameroun (Mvondo Ondoua et al., 2007).

1.5.2 Contexte hydrogéologique de Bafia

On distingue dans la zone d'étude le système aquifère de la zone de socle, la plus grande partie de notre eau se trouve sous nos pieds dans des aquifère de profondeurs variable situés au sein de deux unités aquifères : celle des altérites et celle du milieu fissuré ou fracturé (Tepoule et al., 2021). Ces deux types d'aquifères sont superposés ou isolés selon les cas et nourris par les précipitations par filtrations dans les roches. En milieu cristallin, les fonctions capacitives et conductrices

coexistent au sein de chaque aquifère, le milieu altéré étant essentiellement capacitif, et le socle étant à tendance conductrice (Djeuda, 1988). Les potentialités de ces

- **Aquifère d'altérites**

L'aquifère d'altérites se caractérise par la porosité interstice élevée mais une porosité efficace faible avec une faible perméabilité. Il est le premier à rencontrer sous la surface du sol. Cet aquifère fait l'objet de beaucoup de sollicitations en vue de répondre aux problèmes d'eau en Afrique. Il est surmonté par une zone non saturée. C'est un aquifère à nappe libre et continu ; l'eau souterraine y circule à travers une porosité d'interstice qui assure la continuité du domaine d'écoulement. L'aquifère d'altérites est alimenté par les précipitations efficaces, en particulier par l'infiltration efficace. Ses potentialités dépendent par conséquent des caractéristiques du bassin versant qui influencent les paramètres du bilan, de la pluviométrie et de l'épaisseur de la couche l'altérité. Mais la teneur en minéraux argileux élevée de ces altérites donne une eau de qualité médiocre et un débit élevé.

- **Aquifère fissuré ou de fracture**

La ressource est localisée et circule à travers les failles/fractures des roches massives du socle : granite, dolérites, calcaires, grès, ou dans les roches plastiques ; contrairement aux altérites, le socle a une porosité matricielle pratiquement nulle sauf dans la zone superficielle correspondant à la limite inférieure des arènes grenues, s'agissant de la fracturation.

La transmissivité est très inégale d'un point à un autre du fait des variations très rapides de l'épaisseur de la zone fracturée.

Les aquifères de fissure sont les plus recherchés lors des prospections hydrogéologiques, car ils concentrent l'essentiel des réserves d'eaux souterraines et sont censés être à l'abri des fluctuations saisonnières. (Gamba et al., 2014). L'hydrologie des milieux fissurés ou discontinus a connu durant ces dernières années un grand essor grâce à l'utilisation de nouveaux matériels et prospection. Cet aquifère est exploité par des forages dont la profondeur atteint très rarement les 100 m. Il est beaucoup sollicité pour ces eaux dotées d'une bonne qualité sanitaire.

1.6 Travaux antérieurs

Avant le début de cette étude, de nombreuses études avaient déjà été réalisées sur le site avec plusieurs approches, à savoir, les méthodes gravimétriques, géo électriques et les techniques de télédétection. Quoiqu'ayant des objectifs différents, elles ont contribué à fournir des éléments qui permettent l'amélioration de la connaissance de la structure géologique et une meilleure compréhension du fonctionnement de l'aquifère, parmi lesquels les travaux de (Nyam et al., 2014)

qui portaient sur l'exploitation de l'eau souterraine à l'aide de la méthode géo électrique et géochimique dans la localité de Bafia. L'interprétation a permis de distinguer dans la zone d'étude, les modèles de terrain, les zones favorables à l'exploitation des eaux souterraines pour rendre la ressource en eau utilisable par les populations. Plus récemment, les travaux d'Enyegue et al., 2020 se sont focalisés sur l'évaluation et la caractérisation de la qualité de l'eau souterraine pour la distribution domestique à l'aide des méthodes et la statistique multivariée dans la localité de Bafia afin de comprendre les processus liés à l'origine de la minéralisation des eaux souterraines. Ngouokouo et al., 2025 ont fait une étude sur la cartographie des zones potentielles en eau souterraine, en s'appuyant sur seize (16) couches thématiques. Six (6) cartes des zones potentielles en eau souterraine ont été élaborées de quatre méthodes statistiques à savoir, le rapport de fréquence, l'entropie de Shannon, les poids de preuves et le facteur de certitude

La ville de Bafia est située entre les latitudes 04'20 et 05' Nord et les longitudes 10'40 et 11'20 Est. Elle est soumise à un climat équatorial avec quatre répartitions saisonnières. Les précipitations varient de 1500 à 1200 mm d'eau par an et les températures annuelles varient de 23,7 ° à 26,5. Les roches du socle sont constituées de gneiss et leur altération à la formation des sols ferrallitiques rouges et jaunes. L'hydrogéologie est caractérisée par la superposition d'un aquifère d'altérité et d'un aquifère de fracture. A présent nous allons présenter le matériel et les méthodes utilisés.

CHAPITRE 2: MATERIEL ET METHODES

La réalisation de ce travail demande un matériel approprié et une méthodologie stricte et rigoureuse sur la complexité et la télédétection. Ainsi la méthode de complexité à partir de pente positionnée sur un modèle ordinal (COPPS) utilisée dans cette étude permettra d'évaluer la variation en eau de surface.

2.1 Acquisitions des données et matériel utilisés.

Les données utilisées dans le cadre de cette étude sont constituées des images satellitaires à savoir, GLDAS et modèle numérique de terrain (DEM). Les images satellitaires se sont avérées très utiles à la cartographie numérique.

2.2 Systèmes GLDAS earthdata.nasa.gov.

Dans la présente étude la donnée métrologique a été utilisée. Le système GLDAS-2 (Global Land Data Assimilation System version 2) de la NASA est composé de trois versions : GLDAS-2.0, GLDAS-2.1 et GLDAS-2.2 et sont utilisés des données météorologiques de 1948 à 2014. Le système GLDAS-2.1, est actif depuis 2000, et combine des données de modèle numérique de terrain et d'observations, et est également disponible en deux versions. Les produits de données GLDAS-2.1 sont distribués toutes les 3 heures et fournissent des informations sur 36 variables de surface terrestre depuis janvier 2000. Ces données sont générées avec le modèle NOAH 3.6 et archivées au format NetCDF. En 2020, les données ont été corrigées avec un masque terrestre pour éliminer les valeurs incorrectes au-dessus des zones d'eau.

Les images de résolution 0,25 x 0,25 ° ont été téléchargés et exportés en format Netcdf. La création d'un compte dans le site web earthdata.nasa.gov est impérative pour la suite de l'exploitation des données.

2.2.1 Modèle numérique de terrain ou Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM)

Un modèle numérique de terrain (MNT) est une représentation de la surface d'un terrain ou d'une planète, créée à partir des données d'altitude du terrain. Le MNT ne prend pas en compte les objets présents à la surface du terrain tels que les plantes et les bâtiments. Avec 30 m de résolution, la donnée SRTM a été acquise sur le site web (<http://srtm.csi.cgiar.org>). De cette image ont été extraits les linéaments, les pentes et le réseau de drainage.

2.3 Logiciels

Les logiciels ont facilité les traitements d'images, la conception des systèmes d'information géographique (SIG), la production des couches thématiques et l'analyse de la complexité à partir de pentes positionnées. Le traitement des images issues de SRTM a été réalisé avec le logiciel ArcGIS 10.7. Les données météorologiques issues de GLDAS ont été réalisés dans le logiciel MATLAB (Matrix Laboratory).

2.4 Méthode utilisée

Conformément aux objectifs fixés, cette section débute par des préparations des facteurs de conditionnement des eaux souterraines et se termine par la complexité à partir des pentes positionnées.

2.4.1 Préparation des facteurs de conditionnement des eaux souterraines

En hydrogéologie, certains paramètres peuvent renseigner sur la nature et l'aptitude d'un aquifère à former de bons réservoirs d'eaux souterraines. La sélection et la classification des paramètres ont tenu compte d'un examen exhaustif de la documentation.

- **Pente**

La pente a une grande influence sur l'accumulation d'eau souterraine. Les pentes faibles facilitent l'infiltration des pluies et le ruissellement de surface. Le gradient de pente influence directement l'infiltration des précipitations (Etikala et al., 2019). La pente influence considérablement l'infiltration des pluies, et plus elle est élevée, plus le ruissellement est élevé et le potentiel en eau souterraine devient très faible (Abijith et al., 2020; Yeh et al., 2016). Le MNT a permis de générer la carte de pente à partir de l'équation suivante :

$$PT = \frac{H}{L_b} \quad (1)$$

H est la différence d'élévation entre deux points et L_b est la distance entre deux points.

- **Densité de drainage**

La densité de drainage est un facteur clé dans la localisation des lieux de stockage des eaux souterraines. Le ruissellement de surface, la porosité et la perméabilité d'un sol sont fortement liés à la densité de drainage (Kanagaraj et al., 2019; Pourghasemi et al., 2020). La densité de drainage est la longueur totale du segment de flux de tous les ordres par unité de surface. La carte des densités de drainage a été obtenue à partir du réseau de drainage issu du SRTM. Elle a été générée à partir de l'équation suivante :

$$DD = \frac{\sum Di}{A} \quad (2)$$

D_i est la longueur totale du drainage (km) et A est la surface de zone d'étude (km^2).

- **Densité de linéament**

Les fractures dans des roches augmentent la porosité et accélèrent ainsi la pénétration de l'eau pour recharger les aquifères. La combinaison d'une forte densité de linéaments avec des sols topographiquement bas peut constituer les meilleurs zones d'aquifères (Muralitharan et Palanivel, 2015). Les linéaments extraits manuellement ont été superposés à des données auxiliaires telles que des routes et pistes de manière à éviter de les prendre en compte lors de l'extraction. L'outil density line du logiciel ArcGIS 10.7 a été utilisé pour dresser la carte des densités de linéament à partir de l'équation 3 :

$$DL = \frac{\sum_{i=1}^{k=n} Li}{A} \quad (3)$$

Avec, DL s'exprime en km/km^2 , L_i est la longueur totale des linéaments (km) et A la surface de la zone d'étude (km^2).

2.5 La complexité

Dans cette étude, la méthode de la complexité à partir de pentes positionnées sur un modèle ordinal a été utilisé. C'est une nouvelle méthode d'analyse de données qui permet de caractériser les systèmes complexes. Elle est très utile pour comprendre leur comportement interne, pour prédire des nombreux phénomènes tels que, les transitions de phase, la synchronisation, les points de basculement ou les événements extrêmes (Eyebe Fouda et al., 2024). C'est une technique qui présente une approche basée sur les pentes ordinales de précision qui représentent la pente de la droite de régression qui passe par les points de données et qui est utilisée pour estimer la valeur d'une variable en fonction d'une autre variable.

2.5.1 La mesure proposée par la complexité à partir de pentes positionnées

2.5.2 Définition de base

Considérons une série temporelle $\{x_t\}_{t=0,1,\dots,T-1}$ de longueur T , ou t est l'indice temporel, et une dimension d'intégration n . En comparant les valeur P voisines triées par ordre croissant dans les vecteurs d'intégration $(x_k; x_{k+t} \dots x_{k+(n-1)t})$, ou $0 \leq k \leq T - (n-1)\tau - 1, n \in N_{\geq 3}$, on obtient des permutations π_k de longueur n et r étant le temps de retard des échantillons (Bandt, 2005; Bandt et Pompe, 2002; Eyebe Fouda et Koepf, 2015). En effet, chaque vecteur

d'intégration est associé au vecteur ordonné de positions $\pi^o = (1, 2, \dots, n)$; le tri de X_k dans l'ordre croissant donne le vecteur trié X_k^o et le réarrangement des valeurs de π en fonction de leur position précédente dans X_k conduit au motif ordinal π_k . Lorsqu'on considère la permutation π_k comme une fonction d'interpolation linéaire par morceaux, la pente de chaque fonction d'interpolation est définie comme suit :

$$\theta_k(i) = \pi_k(i+1) - \pi_k(i), 1 \leq i \leq n-1, \quad (4)$$

Ou $\theta_k(i)$ est la différence entre les paires de valeurs voisines dans π_k .

Le codage de la pente ordinale positionnée a été défini en considérant la plus grande pente S_K de $\theta_k = (\theta_k(i))$ comme $S_k = \max(\{\theta_k(i)\}_{1 \leq i \leq n-1})$ sur i . Il a été montré dans le cas d'une dynamique périodique de période L que $|S_K| = L$ pour $n > L$ (Eyebe Fouda et al., 2013; Eyebe Fouda et Koepf, 2015). Le nombre maximal de plus grandes pentes distinctes est n , et toutes appartiennent à l'ensemble $S = \{-1, 1, 2, \dots, n-1\}$ des plus grandes pentes. À présent nous combinons la plus grande pente avec sa position i_k dans $(\theta_k(i))$ pour définir le codage OPPS. Les symboles correspondants sont donc désignés par $P_k = (i_k, S_K)$. Un exemple est donné pour $(X_t) = (3, 2, 3, 1, 3, 5, 2, 7, 4, 5)$, $n=4$ et $\tau=1$. Dans le cas du premier vecteur d'intégration, le tri par ordre croissant de $X_0 = (3, 2, 3, 1)$ conduit à $X_0^o = (1, 2, 3, 3)$, tandis que le vecteur ordonné de position correspondant $\pi^o = (1, 2, 3, 4)$ conduit à la pente ordinale $\pi_0 = (4, 2, 1, 3)$, en réarrangeant ses valeurs comme indiqué ci-dessus. L'application de l'Eq. (1) à π_0 donne $\theta_0 = (-2, -1, 2)$. La plus grande pente correspondante est alors $S_0 = 2$ et sa position est $i_0 = 3$ ce qui conduit donc à la pente ordinale positionnée $P_0 = (3, 2)$. Le processus complet de codage de la pente ordinale positionnée est illustré à la figure 5 suivante.

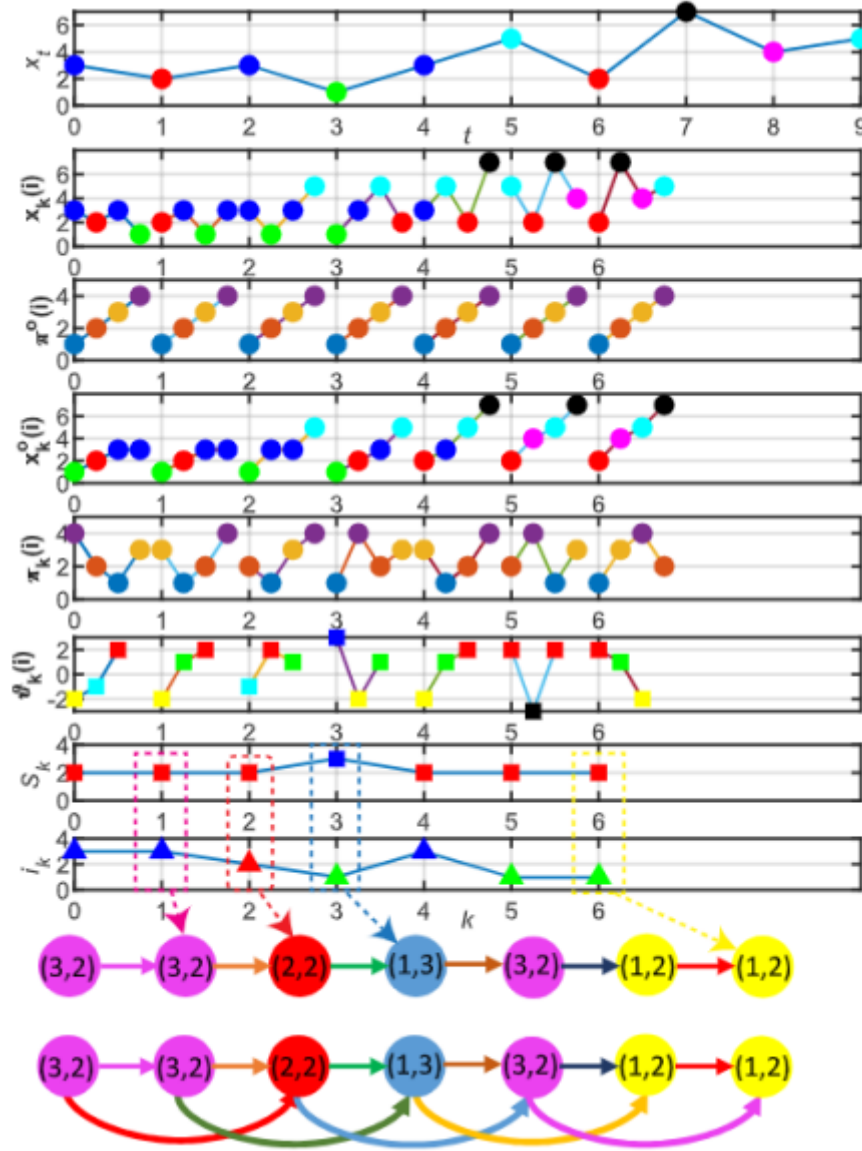


Figure 5: Exemple de codage de la pente ordinale positionnée.

On observe dans cette figure qu'il y a $n-1$ positions de pentes possibles et n pentes possibles. Dans le cas des valeurs redondantes de la plus grande pente en θ_k , le plus petit indice i est utilisé comme position de pente i_k . Un tel cas est observé pour $\pi_5 = (2,4,1,3)$ dans la figure 7, où la plus grande pente $S_5 = 2$ apparait aux positions $i=1$ et $i=3$. En prenant cette précaution, la pente $S = -1$ apparait toujours à la position $i_k = 1$. Par conséquent la cardinalité de l'ensemble des pentes ordinales positionnées est $A_b(n) = (n-1)^2 + 1$.

2.6 La mesure de la pente ordinale positionnée

Dans la présente étude, nous ne nous intéressons pas à la distribution de probabilité des pentes ordinales positionnées, mais seulement à leur occurrence. Par conséquent, un système est complexe lorsqu'il produit l'ensemble des pentes ordinales positionnées possible. Une telle définition permet de quantifier la complexité des systèmes dynamiques même à partir de temps d'observation courts. Dans notre hypothèse, la complexité d'un système dynamique correspond à sa capacité à générer de nouveaux modèles au fil du temps. L'approche est équivalente à la prise en compte de la complémentarité du nombre de motifs interdits /manquants telles que définis dans le cas de PE (Cuesta-Frau et al., 2019; Rosso et al., 2012). Il a été établi que les motifs interdits ont la capacité potentielle de distinguer le comportement déterministe (chaos) de l'aléatoire dans des séries temporelles finies contaminées par un bruit blanc d'observation (Amigó et al., 2006; Carpi et al., 2010). Certains systèmes peuvent produire leur ensemble complet de motif en très peu de temps, tandis que la distribution de ces motifs peut continuer à varier dans le temps. Soit $R(n, \tau)$, le nombre de motifs distincts générés par le système étudié dépendant de la dimension d'intégration, et du décalage temporel, pour un système dont la dynamique est monotone (uniformément constante, croissante ou décroissante), un seul motif ($R = 1$) est généré. Pour une source purement aléatoire, l'ensemble des motifs est généré comme suit ($R = (n - 1)^2 + 1$). En considérant, une dynamique de période L , choisissant $\tau = L$ permet également d'obtenir $R=1$ comme dans le cas d'une dynamique monotone.

Nous exploitons ensuite les informations contenues dans les séries temporelles en regroupant les pentes ordinales positionnées consécutifs pour former de nouveaux modèles. Cette approche est similaire à la construction d'un réseau de transition avec les pentes ordinales positionnées comme nœuds. Un exemple de regroupement est illustré à la figure 5. Soit $s+1$ le nombre de pentes ordinales positionnées regroupées, le nombre de groupes/modèles possibles est $A_s(n) = ((n-1)^2 + 1)^{s+1}$. Par conséquent, nous pouvons définir le groupe moyen $r_s(n)$ comme suit :

$$r_s(n) = (\prod_{\tau=1}^{\tau_{max}} r_E(n, \tau))^{\frac{1}{\tau_{max}}} \quad (5)$$

Ou $r_E(n, \tau) = \frac{R(n, \tau) - 1}{((n-1)^2 + 1)^{s+1}}$ et $R(n, \tau)$ sont des données normalisées. Selon cette définition, une dynamique régulière est détectée avec $r_s(n) = 0$ car il existe $1 \leq \tau_d \leq \tau_{max}$ tel que $R(n, \tau_d) = 1$ et $r_E(n, \tau_d) = 0$.

Nous définissons s comme l'ordre de complexité ou la profondeur du réseau. Le cas $S = 0$ correspond à la moyenne des nœuds $r_0(n)$. La moyenne du lien $r_s(n)$, $s > 0$, est efficacement évaluée avec $T \gg T_{min}$, avec $T_{min} = A_s(n)$. L'approche par regroupement donne la possibilité d'augmenter le nombre de modèles et de mieux distinguer les systèmes complexes. En considérant l'équation 6 nous définissons la mesure de la pente ordinale positionnée comme le ratio de r_s lorsque l'on augmente le nombre de liens. Elle est obtenue à partir de l'équation suivante :

$$\lambda_s(n) = \frac{r_{s+1}(n)}{r_s(n)}, s > 0. \quad (6)$$

Comme la probabilité conditionnelle, est le λ_s conditionnel garantissant que deux motifs similaires pour r_s points restent similaires à un point suivant. L'augmentation de s permet d'accroître le nombre de motifs possibles et donc leur diversité, afin de mieux évaluer la complexité de la série temporelle. Les dynamiques régulières sont caractérisées par $\lambda_s(n) = 0$, alors que $\lambda_s(n) = 1$ pour les dynamiques purement aléatoires $\lambda_s(n) = 0$, dans le cas $r_s(n) = r_{s+1}(n) = 0$, la mesure de pente ordinale positionnée ainsi définie peut également être considérée avec le codage ou seules les plus grandes pentes sont prises en compte.

Les images satellitaires (GLDAS et SRTM) ont permis de mener à bien cette étude. Cette base de données a été traitée avec les logiciels appropriés, à savoir ArcGIS 10.7 et MATLAB et a abouti à la préparation des couches thématiques et la complexité à partir des pentes. Les méthodes utilisées dans ce travail sont complémentaires et concourent à une meilleure connaissance des aquifères de la zone d'étude. Les résultats obtenus à la suite de ces traitements et analyses sont présentés au chapitre suivant.

CHAPITRE 3: RÉSULTATS ET DISCUSSION

Après avoir décrit la méthodologie utilisée dans le chapitre précédent, dans ce chapitre, il sera question pour nous de présenter les résultats des facteurs de conditionnement des eaux souterraines et la variation de la mesure de la complexité à partir des pentes positionnées et d'en faire une discussion.

3.1 Présentation des résultats et interprétation

Les résultats de cette étude ont révélé des variations significatives du stockage en eau à Bafia. Le stockage en eau de surface est fortement influencé par les précipitations, tandis que l'évapotranspiration contribue à des pertes importantes. Les niveaux d'eaux souterraines sont également sujets à des variations, reflétant les fluctuations des précipitations et les prélèvements d'eau.

3.1.1 Couches thématiques

Les densités de linéaments (DL), la densité de drainage (DD) et les pentes (PT) ont été considérées comme des facteurs de conditionnement pouvant influencer la recharge des eaux souterraines.

- **Densité des linéaments**

Les failles influencent considérablement la répartition des mouvements de masse lorsqu'elles sont actives. Les forces de contrainte de fracturation et de cisaillement influencent de manière cruciale l'instabilité des pentes. Les valeurs de densité de failles dans la zone d'étude vont de 0 à 9 km/km² et ont été divisées en quatre catégories : 9 - 6,8 km/km² (élevée), 6,8 - 4,5 km/km² (modéré), 4,5 - 2,3 km/km² (faible) et 2,3 - 0 km/km² (très faible) (Figure 8). Les zones à forte densité de failles ont les effets les plus importants sur le potentiel des eaux souterraines.

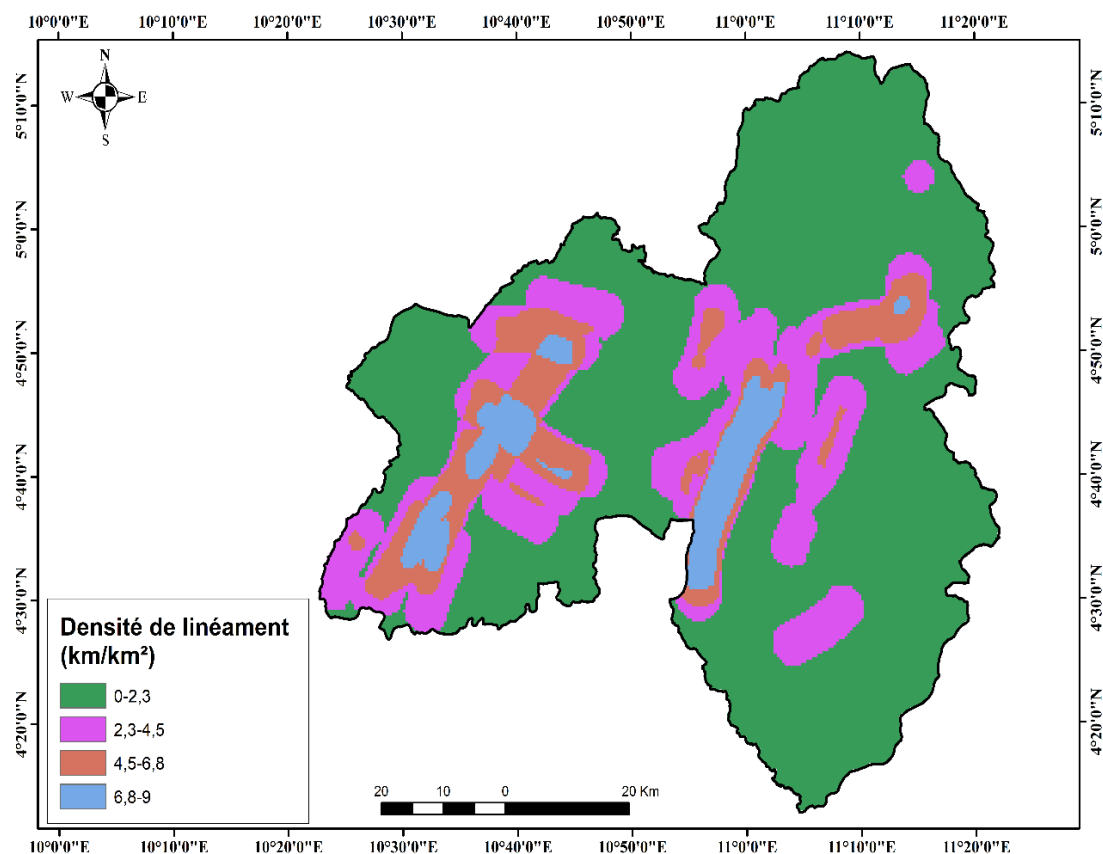


Figure 6: Carte de la densité des linéaments.

- **Densité de drainage**

Le drainage est l'un des facteurs les plus fondamentaux dans les études des eaux souterraines, car il contrôle le ruissellement et le taux d'infiltration. La densité de drainage est un facteur clé dans la localisation des emplacements de stockage des eaux souterraines. Dans la zone d'étude, la densité de drainage varie de 0 à 7,6 km/km² et a été reclassée en 4 zones distinctes : 0 - 1,9 km/km² (très faible), 1,9 - 3,8 km/km² (faible), 3,8 - 5,7 km/km² (modérée), 5,7 - 7,6 km/km² (très élevée) (Figure 9). Les zones à forte densité de drainage ont un ruissellement élevé, ce qui entraîne une faible recharge des eaux souterraines (Doke et al., 2021a; Murmu et al., 2019). Plus le réseau de drainage est dense, plus le ruissellement est important et plus le taux de recharge est faible. Néanmoins, un milieu assez fracturé avec un réseau de drainage dense favorise la recharge des eaux souterraines

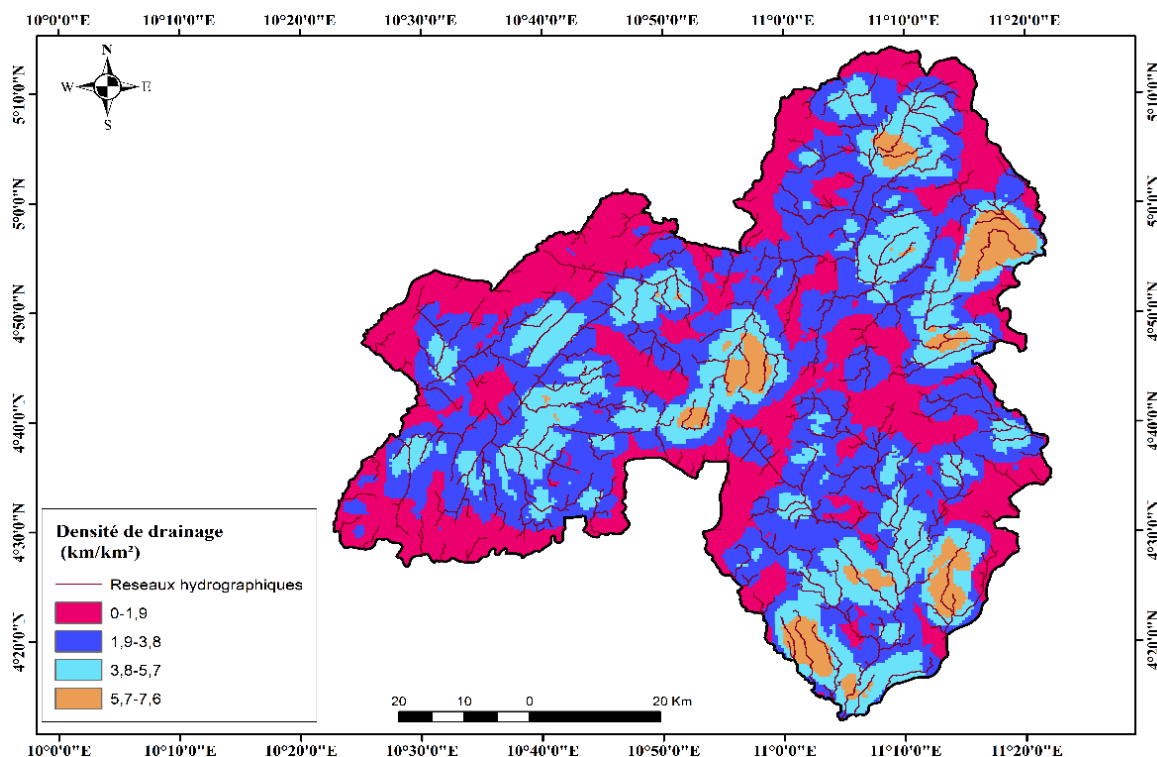


Figure 7: Carte de la densité de drainage.

- **Pentes**

La pente est l'un des facteurs les plus importants dans la recharge des eaux souterraines et est largement utilisée dans de nombreuses études (Kouamou Njifen et al., 2022). Elle influence le ruissellement de surface, la couche d'altération et la répartition des contraintes dans la pente. La pente est un élément important du sol qui indique un changement d'élévation (Githinji et al., 2022). La zone d'étude a été subdivisée en quatre zones selon leurs pentes : 0° - 4° (très faible), 4° - 10° (faible), 10° - 20° (modérée), 20° - 30° (élevée) (Figure 10). Les pentes très faibles couvrent la plus grande superficie, suivies des pentes faibles, modérées et fortes. La pente influence fortement l'infiltration des précipitations, et plus elle est élevée, plus le ruissellement est important.

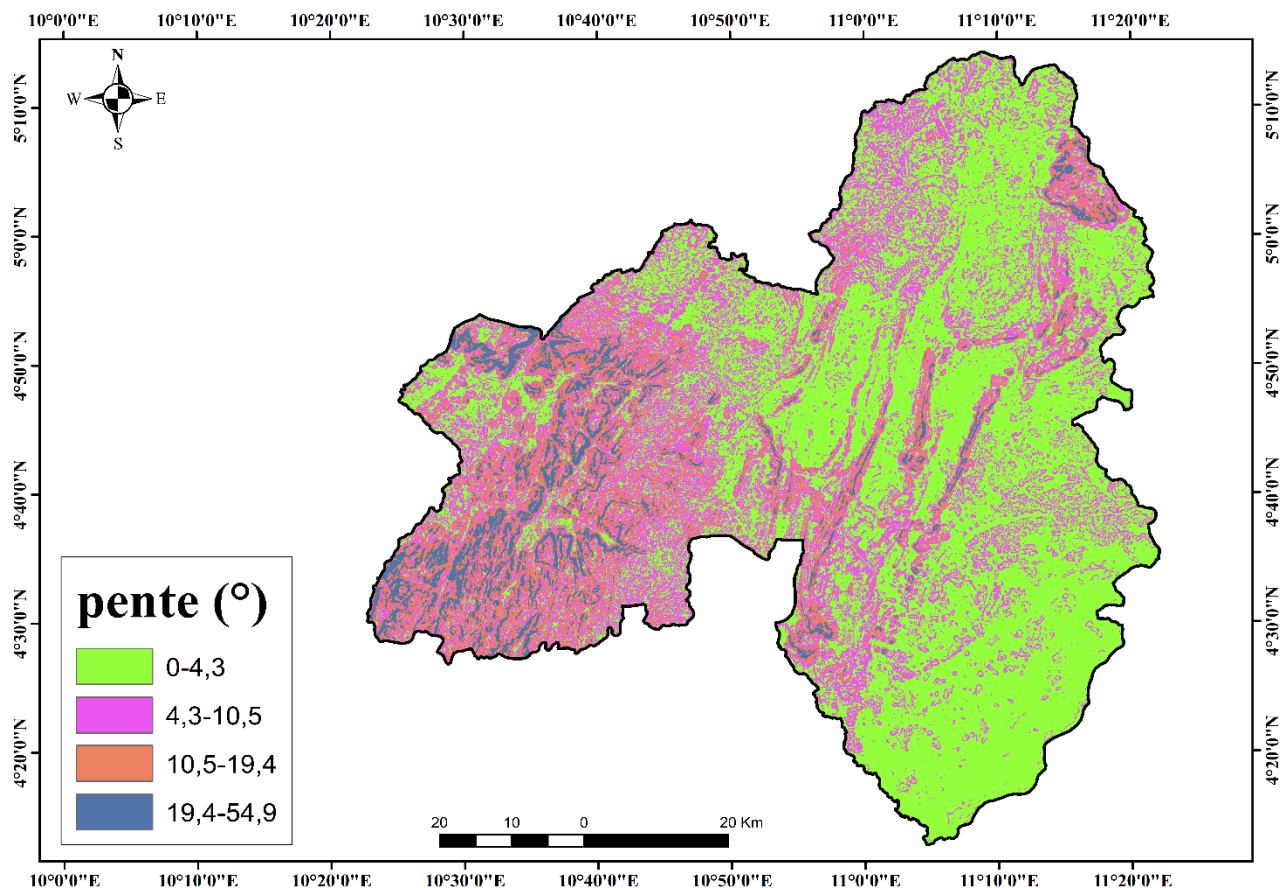


Figure 8: Carte de pentes.

3.2 Courbe de variation de la quantité en eau surfacique.

La figure 9 présente la variation de la quantité en eau surfacique durant chaque mois dans la localité de Bafia. Cette figure met en exergue les variations en eau surfacique entre les années 2002 et 2005 de la zone d'étude. D'après le résultat, on observe trois (3) phases de variation. Une forme de cloche, où la complexité décroît jusqu'à atteindre une valeur minimale de contenance en eau très faible (2000 mm). Par la suite, les valeurs de la contenance croient progressivement jusqu'à atteindre une valeur de précipitation de 2500 mm. Dans la dernière phase les valeurs des précipitations décroissent légèrement durant les mois de novembre et décembre. C'est dans la zone intermédiaire, avec une contenance en eaux surfacique, que l'on observe généralement la plus grande complexité.

L'analyse de cette figure peut permettre d'identifier les zones où le taux d'infiltration en eau surfacique est prédominant. Elle aide également à comprendre les emplacements durant l'année où le contenu en eau de surface est le plus complexe et diversifié. Ce résultat pourrait guider les décisions en matière d'aménagement du territoire, de protection de l'espace naturel ou de gestion de l'eau.

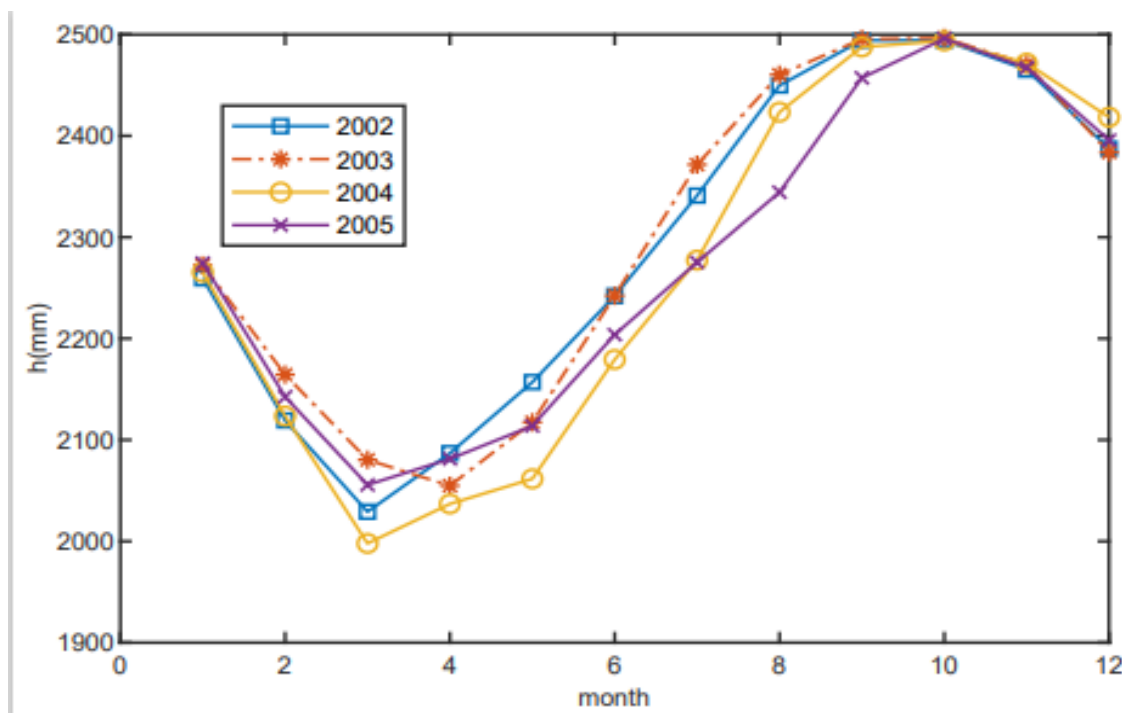


Figure 9 : Courbe des variations de la quantité en eau surfacique.

On observe de manière générale que toutes ces courbes ont un pic élevé au mois de novembre pour les quatre dernières années. Cela signifie que le mois de novembre présente une grande complexité et cela se traduit par la présence d'une importante quantité d'eaux surfaciques. La complexité est observée lorsqu'il y a un grand écart considérable de la quantité de précipitation entre deux mois et la présence d'une zone de transition appelée zone intermédiaire. Le graphe présente quatre courbes pour les quatre années allant de 2002 à 2005. Elle est répartie comme suit :

La première répartition part de janvier à mars ; cette section de la courbe présente une décroissance qui signifie que la complexité décroît progressivement donc la contenance en eau diminue en surface, cela pouvant être dû au changement de saison (période de sécheresse).

La seconde répartition va de mars à septembre ; cette partie de la courbe montre une progression exponentielle. Cela pourrait signifier que la complexité augmente progressivement d'où la présence de l'eau en surface.

La troisième répartition est observée pendant les mois de septembre à novembre. Elle présente une complexité élevée, cela montre la présence excessive en eau en surface, due à la présence de la grande saison de pluie.

La dernière période est de novembre à décembre qui présente une légère décroissance de la complexité ; on constate que nous sommes toujours en période de petite saison de pluie, car on se rapproche déjà de la saison sèche.

Ces répartitions correspondent aux quatre saisons illustrées dans la littérature existante. En somme, le contexte climatique de la localité de Bafia est constitué de quatre saisons, à savoir deux saisons sèches et deux saisons de pluie. La petite saison de pluie s'étend de septembre à novembre ; on observe une complexité élevée. La petite saison sèche de janvier à mars est marquée par une contenance en eau surfacique faible, ceci due au manque de pluie. La grande saison de pluie de mi-mars à août est marquée par une forte variation de la quantité en eaux surfaciques. Cette quantité en eaux surfaciques est fortement liée aux précipitations et au contexte géomorpho-tectonique.

3.3 Courbe de variation de la mesure de la complexité

La figure 10 présente la variation de la mesure de la complexité en fonction des douze mois de l'année pour une période de 2002 à 2005. La mesure de la complexité permet de caractériser les systèmes complexes et de prédire des phénomènes importants. Dans cette étude, elle a permis de comprendre la variation du taux d'infiltration des eaux.

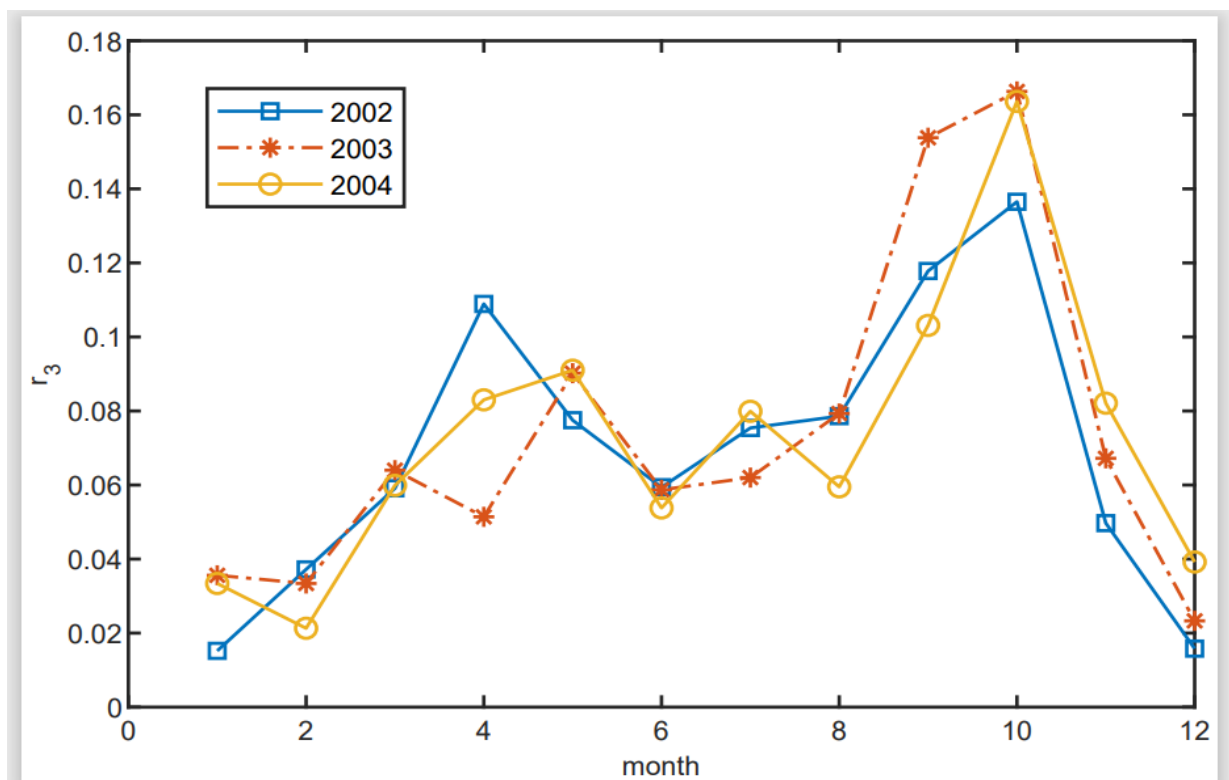


Figure 10: Courbe de variation de la complexité des eaux surfaciques en fonction des mois.

Ce graphe présente les variations de la mesure de la complexité des pentes en fonction des mois pour les années 2002 ; 2003 et 2004. D'après le résultat, elle varie entre 0,02 et 0,16. On constate que plus la valeur de la complexité est élevée, plus la contenance en eau surfacique est considérable.

L'analyse du graphe montre que, pour l'année 2002 au mois de janvier, on observe des zones stables ; ceci pourrait traduire que durant ces mois de l'année, le niveau d'eau est stable. On peut constater à partir de ce résultat que durant ce mois les niveaux statiques des forages sont plus stables. On remarque, par la suite qu'au mois d'avril, on observe une zone instable ; cela traduit que le niveau d'eau surfacique est variable donc on ne peut pas forer un puits en ce mois de l'année. L'analyse du graphe montre que durant ce mois si on fore un puits on peut trouver de l'eau avec un débit faible ou obtenir un forage sec. Par contre, aux mois de juin à septembre, on observe une remontée de la variation de la mesure de la complexité traduisant une quantité en eau surfacique considérable dans la zone d'étude. Au mois de novembre, on observe une instabilité traduisant ainsi l'invariabilité du niveau d'eau. Par ailleurs, au mois de décembre on observe un point stable traduisant ainsi le niveau de stabilité des eaux en surface.

De ce qui précède, la variabilité de la mesure de complexité à partir de pente présente quatre phases importantes :

Un point stable au mois de Janvier qui est le point le plus proche de zéro traduisant le niveau de stabilité d'eaux en surface. Elle peut être due à la sécheresse ou à des fortes évaporations ;

Des pics aux mois d'avril et novembre sont des points les plus proches de 1 (un), cela explique qu'en cette période de l'année le niveau d'eau est instable. Elle peut provenir des événements climatiques tels que, de fortes précipitations et d'humidité élevée.

L'analyse du graphe de l'année 2003 illustre de manière générale que durant l'année la variation de la mesure de la complexité à partir de pente présente des points stables, cela traduit le niveau stable en eau de surface de la zone d'étude. Au mois d'avril on observe une décroissance de la mesure de la complexité et cela traduit toujours un point stable. Par la suite au mois de mai on observe un pic présentant un point instable donc à ce mois le niveau d'eau surfacique est instable. Pour ce fait l'on ne peut rien prédire sur l'évolution de ce niveau d'eau durant l'année. En outre, de juin à septembre une croissance montrant une variation instable du niveau d'eau

surfacique ; d'octobre à novembre on observe une instabilité qui pourrait traduire un niveau instable. En somme, cette courbe présente quatre (4) périodes de stabilité à savoir, janvier, avril, juin et décembre qui représentent des périodes pour lesquelles l'on peut prédire l'évolution du niveau d'eau surfacique. La variation de la mesure de la complexité d'eau surfacique renseigne si la quantité d'eau est stable ou instable. On remarque également trois (3) périodes instables à savoir, mars, mai, novembre montrant les périodes pour lesquelles niveau d'eau est instable.

L'analyse du graphe de l'année 2004 illustre de manière générale que le mois de janvier est une période instable due à la sécheresse. Par contre, aux mois de mai à juillet on observe également un pic qui traduit une période d'instabilité. Le mois de décembre est marqué par une faible présence en eau ou recharge en eau souterraine.

3.4 Influence des changements climatiques sur la contenance en eaux surfaciques

Les précipitations, l'évapotranspiration, le pompage des eaux souterraines, la recharge des nappes phréatiques et l'utilisation des terres sont les principaux facteurs influençant les variations du stockage en eau. La variation climatique exacerbe à la fois la rareté de l'eau et les risques liés à l'eau (tels que les inondations et les sécheresses), car la hausse des températures perturbe les régimes des précipitations et l'ensemble du cycle de l'eau. Il existe un lien indissociable entre l'eau et les changements climatiques. Les changements climatiques ont des répercussions complexes sur l'eau dans le monde. Qu'il s'agisse de l'imprévisibilité des précipitations, du rétrécissement des calottes glaciaires, de l'élévation du niveau de la mer, des inondations ou des sécheresses, la plupart des conséquences des changements climatiques sont liées à l'eau et l'ensemble du cycle de l'eau. Environ deux milliards de personnes dans le monde n'ont pas accès à l'eau potable et près de la moitié de la population mondiale connaît de graves pénuries d'eau pendant au moins une partie de l'année (Aykut, 2021). Les changements climatiques et la croissance démographique devraient exacerber ces chiffres.

Seul 0,5 % de l'eau sur Terre est douce, utilisable et disponible, une ressource que les changements climatiques mettent dangereusement en péril (Doke et al., 2021b). Au cours des vingt dernières années, le stockage de l'eau terrestre à travers l'humidité du sol, la neige et la glace a reculé d'un centimètre par an, ce qui a des conséquences majeures pour la sécurité de l'approvisionnement en eau. Les réserves d'eau stockées dans les glaciers et la couverture neigeuse devraient continuer à diminuer au cours du siècle (Masroor et al., 2021), ce qui entraînera une réduction de la disponibilité de l'eau pendant les périodes chaudes et sèches dans les régions alimentées

par les eaux de fonte des principales chaînes de montagnes, où vit actuellement plus d'un sixième de la population mondiale. L'élévation du niveau de la mer devrait étendre la salinisation des eaux souterraines, réduisant ainsi la disponibilité de l'eau douce pour les besoins humains et les écosystèmes des zones côtières. En limitant le réchauffement de la planète à 1,5 °C, plutôt qu'à 2 °C, on réduirait approximativement de moitié la proportion de la population mondiale qui subira des pénuries d'eau, bien qu'il existe une variabilité considérable entre les régions.

La qualité de l'eau est également affectée par les changements climatiques, car la hausse de la température de l'eau et la fréquence accrue des inondations et des sécheresses vont exacerber de nombreuses formes de pollution de l'eau – des sédiments aux agents pathogènes et aux pesticides. Les changements climatiques, la croissance démographique et la raréfaction de l'eau exerceront une pression sur l'approvisionnement en denrées alimentaires. En effet, la majeure partie de l'eau douce utilisée, environ 70 % en moyenne, est orientée vers la production agricole (il faut entre 2 000 et 5 000 litres d'eau pour produire la nourriture quotidienne d'une personne).

En somme, ce chapitre était consacré à mettre en exergue les résultats des facteurs de conditionnement des eaux souterraines sélectionnés, la variation de la quantité en eau surfacique et la variation de la mesure de la complexité à partir des pentes positionnées dans la localité de Bafia Cameroun.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

L'eau souterraine est l'une des ressources naturelles précieuses pour la santé et la survie des êtres vivants. En raison de la croissance rapide de la population et de l'urbanisation, la demande en eau potable se fait ressentir au Cameroun et en particulier dans la zone de Bafia Centre-Cameroun. Les études antérieures prédisposent la zone à une disponibilité des eaux souterraines au vu de la présence d'un socle fracturé. Dans cette étude il était question d'analyser le contenu en eaux surfacique et souterraine dans la zone de Bafia en utilisant une approche innovante basée sur la mesure de complexité et le modèle numérique de terrain (MNT).

Les images satellitaires ont été utilisées pour la préparation des cartes de facteurs de conditionnement et pour mettre en exergue la variation de la mesure de la complexité. La densité de linéaments, la pente et la densité de drainage ont été sélectionnées comme facteurs de conditionnement des eaux souterraines.

Les facteurs de conditionnement ont été classés en quatre zones distinctes : très faible, faible, modérée et élevée. Les résultats obtenus montrent que la mesure de complexité, appliquée aux données météorologiques, permet d'identifier des périodes de l'année où l'accumulation d'eau est significativement influencée par les caractéristiques topographiques. Cette étude a également mis en évidence des enjeux importants liés à la gestion de l'eau dans la région. Les pressions exercées par les activités humaines, notamment l'agriculture et l'urbanisation ainsi que les effets du changement climatique, semblent affecter la disponibilité et la qualité des ressources en eau. Ainsi, il est essentiel de développer des stratégies de gestion durable qui intègrent les résultats de cette recherche. Pour garantir la pérennité des ressources en eau à Bafia, il est impératif de renforcer les efforts de surveillance et d'adopter des pratiques de gestion basées sur des données scientifiques solides.

Les résultats obtenus peuvent être utilisés par les autorités administratives de la région du Centre Cameroun pour la gestion, la planification et le développement durable en eau potable dans la région. Cette étude s'ouvre ainsi sur plusieurs perspectives de recherche, dont la relation entre la géomorphologie et la mesure de la complexité dans la zone d'étude.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Abijith, D., Saravanan, S., Singh, L., Jennifer, J. J., Saranya, T., and Parthasarathy, K. S. S., (2020). GIS-based multi-criteria analysis for identification of potential groundwater recharge zones—A case study from Ponnaniyar watershed, Tamil Nadu, India. *HydroResearch*, 3, 1-14. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2020.02.002>
- Amigó, J. M., Kocarev, L., and Szczepanski, J., (2006). Order patterns and chaos. *Physics Letters A*, 355(1), 27-31. <https://doi.org/10.1016/j.physleta.2006.01.093>
- Avtar, R., Singh, C. K., Shashtri, S., Singh, A., et Mukherjee, S. (2010). Identification and analysis of groundwater potential zones in Ken–Betwa river linking area using remote sensing and geographic information system. *Geocarto International*, 25(5), 379-396. <https://doi.org/10.1080/10106041003731318>
- Aykut, T., (2021). Determination of groundwater potential zones using Geographical Information Systems (GIS) and Analytic Hierarchy Process (AHP) between Edirne-Kalkansogut (northwestern Turkey). *Groundwater for Sustainable Development*, 12, 100545. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100545>
- Bandt, C., (2005). Ordinal time series analysis. *Ecological Modelling*, 182(3), 229-238. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2004.04.003>
- Bandt, C., and Pompe, B., (2002). Permutation Entropy : A Natural Complexity Measure for Time Series. *Physical Review Letters*, 88(17), 174102. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.88.174102>
- Bonn, F., and Rochon, G. ,(1992). Précis de télédétection volume 1: Principes et méthodes. *Sainte-Foy: Presse de l'Université du Québec/AUPELF*.
- Carpi, L. C., Saco, P. M., and Rosso, O. A., (2010). Missing ordinal patterns in correlated noises. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 389(10), 2020-2029. <https://doi.org/10.1016/j.physa.2010.01.030>
- Cuesta-Frau, D., Molina-Picó, A., Vargas, B., and González, P., (2019). Permutation Entropy : Enhancing Discriminating Power by Using Relative Frequencies Vector of Ordinal Patterns Instead of Their Shannon Entropy. *Entropy*, 21(10), Article 10. <https://doi.org/10.3390/e21101013>

- Doke, A. B., Zolekar, R. B., Patel, H., and Das, S. (2021a). Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach in a hardrock basaltic terrain in India. *Ecological Indicators*, 127, 107685. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107685>
- Doke, A. B., Zolekar, R. B., Patel, H., and Das, S., (2021b). Geospatial mapping of groundwater potential zones using multi-criteria decision-making AHP approach in a hardrock basaltic terrain in India. *Ecological Indicators*, 127, 107685. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107685>
- Djeuda-Tchapnga, H. B. (1988). *Géologie et hydrogéologie d'un secteur de la zone mobile d'Afrique centrale, région de Poli, Nord-Cameroun* (Doctoral dissertation, ANRT).
- Enyegue A Nyam, F. M., Yomba, A. E., Tchikangoua, A. N., Bounoung, C. P., and Nouayou, R., (2020). Assessment and characterization of groundwater quality under domestic distribution using hydrochemical and multivariate statistical methods in Bafia, Cameroon. *Groundwater for Sustainable Development*, 10, 100347. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2020.100347>
- Etikala, B., Golla, V., Li, P., and Renati, S., (2019). Deciphering groundwater potential zones using MIF technique and GIS : A study from Tirupati area, Chittoor District, Andhra Pradesh, India. *HydroResearch*, 1, 1-7. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2019.04.001>
- Eyebe Fouda, J. S. A., Effa, J. Y., Kom, M., and Ali, M., (2013). The three-state test for chaos detection in discrete maps. *Applied Soft Computing*, 13(12), 4731-4737. <https://doi.org/10.1016/j.asoc.2013.07.020>
- Eyebe Fouda, J. S. A., and Koepf, W. (2015). Detecting regular dynamics from time series using permutations slopes. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 27(1), 216-227. <https://doi.org/10.1016/j.cnsns.2015.03.008>
- Eyebe Fouda, J. S. A., Koepf, W., Marwan, N., Kurths, J., and Penzel, T., (2024). Complexity from ordinal pattern positioned slopes (COPPS). *Chaos, Solitons & Fractals*, 181, 114708. <https://doi.org/10.1016/j.chaos.2024.114708>
- Gamba, C., Jones, E. R., Teasdale, M. D., McLaughlin, R. L., Gonzalez-Fortes, G., Mattiangeli, V., ... and Pinhasi, R. (2014). Genome flux and stasis in a five millennium transect of European prehistory. *Nature communications*, 5(1), 5257.

- Gaikwad, S., Pawar, N. J., Bedse, P., Wagh, V., and Kadam, A., (2021). Delineation of groundwater potential zones using vertical electrical sounding (VES) in a complex bedrock geological setting of the West Coast of India. *Modeling Earth Systems and Environment*, 1-15.
- Githinji, T. W., Dindi, E. W., Kuria, Z. N., and Olago, D. O. ,(2022). Application of analytical hierarchy process and integrated fuzzy-analytical hierarchy process for mapping potential groundwater recharge zone using GIS in the arid areas of Ewaso Ng'iro – Lagh Dera Basin, Kenya. *HydroResearch*, 5, 22-34. <https://doi.org/10.1016/j.hydres.2021.11.001>
- Hamidu, N. P. (2013). Pengaruh kinerja keuangan terhadap pertumbuhan laba pada perbankan di BEI. *Jurnal EMBA: Jurnal Riset Ekonomi, Manajemen, Bisnis dan Akuntansi*, 1(3).
- Jha, M. K., Chowdary, V. M., and Chowdhury, A., (2010). Groundwater assessment in Salboni Block, West Bengal (India) using remote sensing, geographical information system and multi-criteria decision analysis techniques. *Hydrogeology Journal*, 18(7), 1713-1728. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0631-z>
- Kanagaraj, G., Suganthi, S., Elango, L. and ,Magesh, N. S. ,(2019). Assessment of groundwater potential zones in Vellore district, Tamil Nadu, India using geospatial techniques. *Earth Science Informatics*, 12(2), 211-223. <https://doi.org/10.1007/s12145-018-0363-5>
- Kouamou Njifen, S. R., Enyegue A Nyam, F. M., Bikoro, M. B.-A., Ngouokouo, A. T., and Tabod, C. T., (2022). Modeling groundwater potential zones in the Kribi-Campo region, South Cameroon using geospatial techniques and statistical models. *Modeling Earth Systems and Environment*. <https://doi.org/10.1007/s40808-022-01544-x>
- Magesh, N. S., Chandrasekar, N., and Soundranayagam, J. P., (2012). Delineation of groundwater potential zones in Theni district, Tamil Nadu, using remote sensing, GIS and MIF techniques. *Geoscience Frontiers*, 3(2), 189-196. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2011.10.007>
- Mahato, S., and Pal, S., (2019). Groundwater Potential Mapping in a Rural River Basin by Union (OR) and Intersection (AND) of Four Multi-criteria Decision-Making Models. *Natural Resources Research*, 28(2), 523-545. <https://doi.org/10.1007/s11053-018-9404-5>
- Masroor, M., Rehman, S., Sajjad, H., Rahaman, M. H., Sahana, M., Ahmed, R., and Singh, R., (2021). Assessing the impact of drought conditions on groundwater potential in Godavari Middle Sub-Basin, India using analytical hierarchy process and random forest machine learning algorithm. *Groundwater for Sustainable Development*, 13, 100554. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2021.100554>

- Muralitharan, J., and Palanivel, K.,(2015). Groundwater targeting using remote sensing, geographical information system and analytical hierarchy process method in hard rock aquifer system, Karur district, Tamil Nadu, India. *Earth Science Informatics*, 8(4), 827-842.
- Murmu, P., Kumar, M., Lal, D., Sonker, I., and Singh, S. K., (2019). Delineation of groundwater potential zones using geospatial techniques and analytical hierarchy process in Dumka district, Jharkhand, India. *Groundwater for Sustainable Development*, 9, 100239. <https://doi.org/10.1016/j.gsd.2019.100239>
- Ngako, V. (1999). Les déformations continentales panafricaines en Afrique centrale : Résultat d'un poinçonnement de type himalayen. *Doct. d'Etat thesis, Univ. Yaoundé I*.
- Ngako, V., Affaton, P., Nnange, J. M., and Njanko, T., (2003). Pan-African tectonic evolution in central and southern Cameroon : Transpression and transtension during sinistral shear movements. *Journal of African Earth Sciences*, 36(3), 207-214.
- Ngouokouo Tchikangoua, A., Enyegue A Nyam, F. M., Kouamou Njifen, S. R., Teikeu, W. A., Ndougsa Mbarga, T. and ,Perilli, N., (2025). Bivariate statistical and neural network models to map groundwater potential zones in Bafia area (Central Cameroon). *Modeling Earth Systems and Environment*, 11(1), 44.
- Njifen, S. R. K., Nyam, F. M. E. A., Fossi, D. H., Bikoro, M. B.-A., Tchikangoua, A. N. and, Tabod, C. T., (2024). Groundwater potential mapping and mineralization assessment in Campo aquifers, Cameroon using AHP and multivariate statistical analysis. *Environment, Development and Sustainability*, 26(6), 16095-16127. <https://doi.org/10.1007/s10668-023-03289-8>
- Nyam, F. M. E. A., Mbarga, T. N., Nouck, P. N., Assembe, S., and Dicoum, E. M. (2014). Ground water exploration using geoelectrical investigation in Bafia Area, Cameroon. *J Earth Sci Geotech Eng*, 4(3), 61-75.
- Pourghasemi, H. R., Sadhasivam, N., Yousefi, S., Tavangar, S., Ghaffari Nazarlou, H., and Santosh, M., (2020). Using machine learning algorithms to map the groundwater recharge potential zones. *Journal of Environmental Management*, 265, 110525. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110525>
- Pradhan, B. (2009). Groundwater potential zonation for basaltic watersheds using satellite remote sensing data and GIS techniques. *Central European Journal of Geosciences*, 1(1), 120-129.

- Rosso, O. A., Carpi, L. C., Saco, P. M., Ravetti, M. G., Larrondo, H. A., and Plastino, A. (2012). The Amigó paradigm of forbidden/missing patterns : A detailed analysis. *The European Physical Journal B*, 85(12), 419. <https://doi.org/10.1140/epjb/e2012-30307-8>
- Shanmugasundharam, A., Kalpana, G., Mahapatra, S. R., Sudharson, E. R., and Jayaprakash, M., (2017). Assessment of Groundwater quality in Krishnagiri and Vellore Districts in Tamil Nadu, India. *Applied Water Science*, 7(4), 1869-1879. <https://doi.org/10.1007/s13201-015-0361-4>
- Tchameni, R., Mezger, K., Nsifa, N. E., and Pouclet, A., (2001). Crustal origin of Early Proterozoic syenites in the Congo craton (Ntem complex), South Cameroon. *Lithos*, 57(1), 23-42.
- Tepoule, N., Kenfack, J. V., Ndikum Ndoh, E., Koumetio, F. and Tabod Tabod, C., (2021). Delineation of groundwater potential zones in Logbadjeck, Cameroun : An integrated geophysical and geospatial study approach. *International Journal of Environmental Science and Technology*. <https://doi.org/10.1007/s13762-021-03259-5>
- Thapa, R., Gupta, S., Guin, S., and SSSSQ Kaur, H., (2017). Assessment of groundwater potential zones using multi-influencing factor (MIF) and GIS : A case study from Birbhum district, West Bengal. *Applied Water Science*, 7(7), 4117-4131. <https://doi.org/10.1007/s13201-017-0571-z>
- Toteu, S. F., Penaye, J., Deloule, E., Van Schmus, W. R., andss Tchameni, R., (2006). Diachronous evolution of volcano-sedimentary basins north of the Congo craton : Insights from U–Pb ion microprobe dating of zircons from the Poli, Lom and Yaoundé Groups (Cameroon). *Journal of African Earth Sciences*, 44(4), 428-442. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.011>
- Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., Penaye, J., and Nyobe, J. B., (1994). U–Pb and Sm–Nd evidence for Eburnian and Pan-African high-grade metamorphism in cratonic rocks of southern Cameroon. *Precambrian research*, 67(3-4), 321-347.
- Verma, N., et Patel, R. K., (2021). Delineation of groundwater potential zones in lower Rihand River Basin, India using geospatial techniques and AHP. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science*, 24(3, Part 2), 559-570. <https://doi.org/10.1016/j.ejrs.2021.03.005>
- Wagh, V. M., Panaskar, D. B., Muley, A. A., and Mukate, S. V., (2017). Groundwater suitability evaluation by CCME WQI model for Kadava River Basin, Nashik, Maharashtra, India.

Modeling Earth Systems and Environment, 3(2), 557-565. <https://doi.org/10.1007/s40808-017-0316-x>

- Yeh, H.-F., Cheng, Y.-S., Lin, H.-I., and Lee, C.-H., (2016). Mapping groundwater recharge potential zone using a GIS approach in Hualian River, Taiwan. *Sustainable Environment Research*, 26(1), 33-43. <https://doi.org/10.1016/j.serj.2015.09.005>
- Yeh, H.-F., Lee, C.-H., Hsu, K.-C., and Chang, P.-H., (2009). GIS for the assessment of the groundwater recharge potential zone. *Environmental geology*, 58(1), 185-195.