



Caractérisation hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre du socle du bassin versant du Mayo-Kani A Yolde (extreme-nord) Cameroun.

Prosper Djaldebne¹, Lucas Bouba², Felix Zieba Watang ¹ and Sylvain Daoua Aoudou¹

¹Université de Maroua, Cameroun, Faculté des Arts, Lettres et Sciences Humaines, BP 46, Maroua Cameroun. Courriels : *;

²Université de Maroua, Cameroun, Faculté des Sciences, BP 814, Maroua, Cameroun. Courriel : aée

Résumé

L'année hydrologique septembre 2022 à août 2023, une étude ayant pour objectif une caractérisation du comportement hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani a été menée. Les travaux de terrain ont consisté en un suivi piézométrique mensuel des 66 puits expérimentaux et 20 forages d'observation. Les résultats montrent que les niveaux piézométriques varient entre 490,44 et 361,24 m pendant la période maximale ; et entre 477,66 et 357,02 en période minimale. Les fluctuations piézométriques varient ainsi entre -2 m et 13,2 m soit une fluctuation moyenne annuelle de 3,96 m. Le niveau piézométrique minimal annuel est observé au mois de mai et le niveau maximal est atteint au mois de septembre, la remontée du niveau commence au mois de juin. L'analyse des cartes piézométriques révèle deux grands types de nappe : la nappe peu profonde ou superficielle au Nord-Ouest et la nappe profonde et perçée dans la partie Sud-Est et Nord-Est du bassin versant, avec une convergence des lignes de courant d'eau vers le cours d'eau Mayo-Kani selon l'orientation NW-SW qui en est le principal axe de drainage de l'aquifère à nappe. L'analyse de la productivité des forages révèle que les aquifères de socle du bassin versant du Mayo-Kani ont, en général, une faible fonction conductrice. Les résultats de l'analyse statistique des linéaments à l'aide des rosaces directionnelles sont venus confirmer les résultats de l'analyse piézométrique soit une répartition particulière de l'orientation de ces derniers selon la direction préférentielle NW-SW avec 75% de fréquence. La dynamique piézométrique établie, montre que le réservoir d'altérites se recharge au mois d'avril à novembre sous l'action de l'excédent pluviométrique et se vide au mois de décembre à mars lors de l'étiage. Ainsi, le comportement hydrodynamique de la nappe est étroitement lié aux fluctuations pluviométriques.

Mots clés : Hydrodynamique, Aquifère, niveau piézométrique, Bassin versant, Extrême-nord Cameroun

Hydrodynamic characterization of the unconfined aquifer of the base of the Mayo-Kani watershed in yolde (far north Cameroon).

Abstract

The hydrological year September 2022 to August 2023, a study aimed at characterizing the hydrodynamic behavior of the unconfined aquifer of the Mayo-Kani watershed was conducted. The field work consisted of monthly piezometric monitoring of the 66 experimental wells and 20 observations boreholes. The results show that the piezometric levels vary between 490.44 and 361.24 m during the maximum period; and between 477.66 and 357.02 in the minimum period. The piezometric fluctuations thus vary between -2 m and 13.2 m, i.e. an average annual fluctuation of 3.96 m. The minimum annual piezometric level is observed in May and the maximum level is reached in September, the rise in the level begins in June. The analysis of the piezometric maps reveals two main types of aquifer: the shallow or superficial aquifer in the Northwest and the deep and perched aquifer in the Southeast and Northeast part of the watershed, with a convergence of the water current lines towards the Mayo - Kani watercourse according to the NW-SW orientation which is the main drainage axis of the aquifer with aquifer. The analysis of the productivity of the boreholes reveals that the basement aquifers of the Mayo - Kani watershed have, in general, a weak conductive function . The results of the statistical analysis of the lineaments using directional rosettes confirmed the results of the piezometric analysis, namely a particular distribution of the orientation of the latter according to the preferential NW-SW direction with 75% frequency. The established piezometric dynamics show that the alterite reservoir recharges from April to November under the action of excess rainfall and empties from December to March during low water. Thus, the hydrodynamic behavior of the water table is closely linked to rainfall fluctuations.

Keywords: Hydrodynamic, Aquifer, Piezometric level, Watershed, Far nord, Cameroon.

¹ Corresponding author: prosperdjaldebne5@gmail.com

INTRODUCTION

L'eau est une ressource naturelle vitale. Elle est à la base du système écologique (SELVAM et al., 2013 ; ABDOU N et al., 2020). Elle contribue significativement pour les êtres vivants notamment dans le développement socioéconomique et les écosystèmes (LACHASSAGNE P. et al. ; 2005 ; AN et al., 2014 ; MA et al., 2014 ; ESHTAWI et al., 2016 ; EWODO M. al. ; 2017). Lors du Sommet Mondial sur le Développement Durable (SMDD) tenu à Johannesburg en 2002, un constat global s'est dégagé à savoir l'amenuisement progressif des ressources en eau disponibles et mobilisables. Cette diminution est liée à une forte croissance démographique, au développement industriel, urbain et agricole auxquels s'ajoutent les aléas de la variabilité et du changement climatiques qui entraînent une augmentation sans cesse des besoins en eau (SANDRA ARDOIN-BARDIN., 2004) ; MINEE-GWP, 2009 ; LAHCEN ZOUHRI et al., 2010 ; FREUBA., (2015).

L'extrême-nord en général et le bassin versant du Mayo-Kani en particulier, à l'instar de la majorité des villes subsahariennes a été marquée au cours des deux dernières décennies par de grandes mouvances notamment sur le plan démographique et environnemental.

L'exploitation des ressources en eaux souterraines à l'Extrême-nord en général et dans le bassin versant du Mayo-Kani en particulier permet de faire face au problème de l'alimentation en eau potable des populations rurales. Le Gouvernement camerounais, appuyé par les bailleurs de fond, investi de nombreux capitaux à travers divers programmes pour pallier ce problème (DJEUDA TCHAPNGA et al., 2001). En effet, le programme Pays Pauvre Très Endetté (PPTE) et le plan d'urgence ont permis d'accroître le nombre de forages et puits modernes en zones périurbaine et rurale. Malgré ces efforts, le bassin versant du Mayo-Kani au Cameroun connaît toujours des problèmes d'approvisionnement en eau potable surtout dans les localités situées en zone de socle. En effet, comparativement aux milieux sédimentaires où les aquifères sont, en général, continus, l'eau souterraine des régions de socle (métamorphique/plutonique) est localisée dans les aquifères discontinus et compartimentés (DEWANDEL et al.).

Ces aquifères sont isolés les uns des autres et sont associés à des couloirs de fracturation plus ou moins verticaux hérités de l'histoire tectonique de la région (GANDOLFI et al., 2010). La productivité de ces aquifères est liée à la conjonction d'une couverture meuble, à fonction essentiellement capacitive (lorsqu'elle est saturée en eau), et d'un réseau de fissures connectées et ouvertures, drainant les formations meubles sus-jacentes. (DEVANDEL al., 2006 ; LACHASSAGNE et al., 2011).

Dans le cadre des programmes d'hydraulique en zone rurale de l'Extrême Nord, les forages et les puits modernes, implantés en zone de socle, doivent fournir un débit minimum de 1 m³/h pour être déclaré positif. Cependant, un nombre assez élevé de ces ouvrages sont souvent déclarés négatifs car n'ayant pas atteint ce débit minimum ou abandonnés après leur mise en service pour « tarissement ». Ces constats suscitent beaucoup d'intérêt sur le plan de la recherche hydrogéologique. En effet, les caractéristiques de ces aquifères et les profondeurs optimales productives des formations géologiques sont connues de façon sommaire ou totalement méconnues (TILLEMENT, 1970, DETAY, 1987). Une meilleure connaissance de ces aquifères est nécessaire pour une bonne connaissance hydrodynamique de l'aquière à nappe libre et son fonctionnement. En effet, les ressources en eau dans le bassin versant du Mayo-Kani sont rares, les écoulements des mayos (rivières à écoulements temporaires) sont saisonniers, tarissent à un moment de l'année. De même, les forages et les puits tarissent également. Les mares artificielles en raison des fortes insolations subissent le tarissement sous l'effet des fortes évaporations à une période de l'année (avril-mai). Nous notons également que ce bassin est dominé par des formations du socle cristallin précambrien illustrant un aquière discontinu, lié à l'altération et la fraction sous ces altérites. A cela, s'ajoute les aléas climatiques se caractérisant par une variabilité spatio-temporelle de la pluviométrie dans le temps et dans l'espace, perturbant les saisons de pluies et affectant significativement les cycles de recharge et de vidange de la nappe. Il faut ajouter en plus de l'augmentation des charges en bétail (cheptels) et la démographie ; A ce titre « **Caractérisation hydrodynamique des aquifères à la nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani à Yoldé** » est une stratégie qui vise non seulement à améliorer des connaissances structurales et piézométriques sur le fonctionnement hydrodynamique des aquifères à nappe libre du bassin versant du Mayo Kani ; mais et surtout permettre aux populations de cette localité d'optimiser la gestion de leurs ressources hydrologiques et hydroagricoles afin de faire face aux divers enjeux de changement climatique planétaire et de lutter contre la pauvreté à L'extrême-nord Cameroun.

DONNEES ET METHODES

DONNES

Présentation de la zone d'étude

Le bassin versant du Mayo-Kani à Yoldé situé entre le 10°19 et le 10°48 de la latitude Nord et entre 14°19 et 14°33 de longitude Est (figure 1).

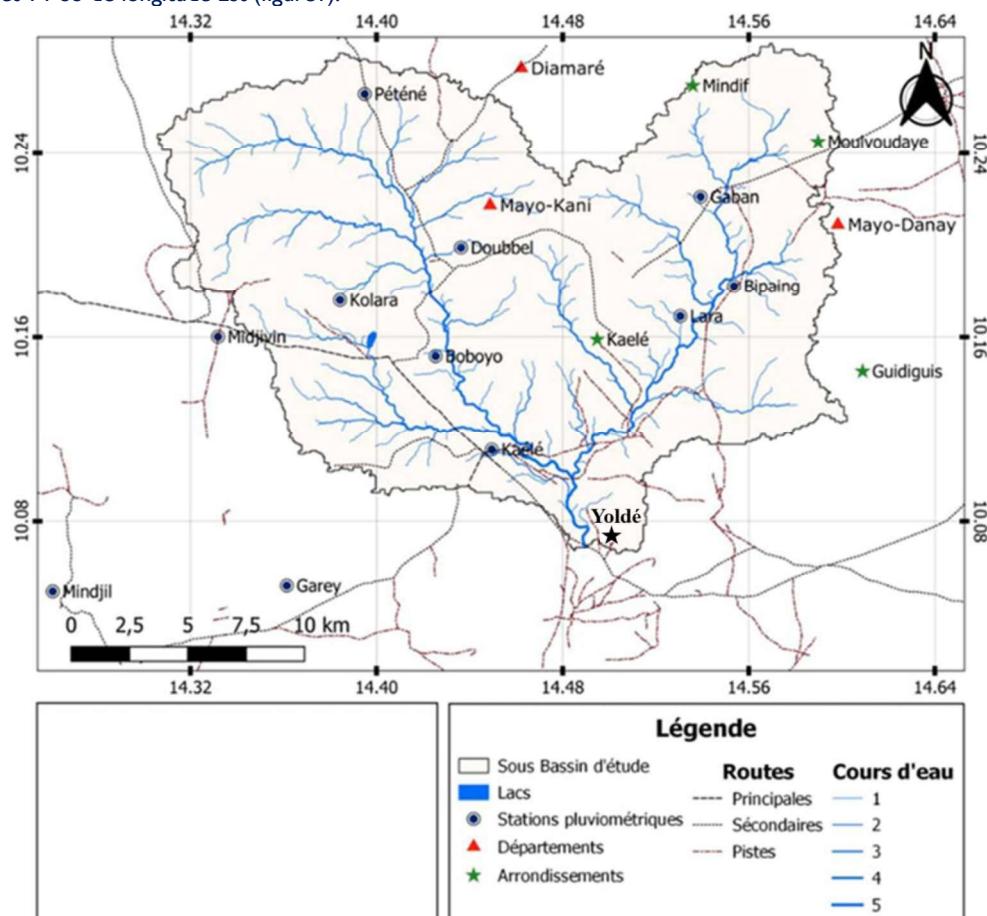


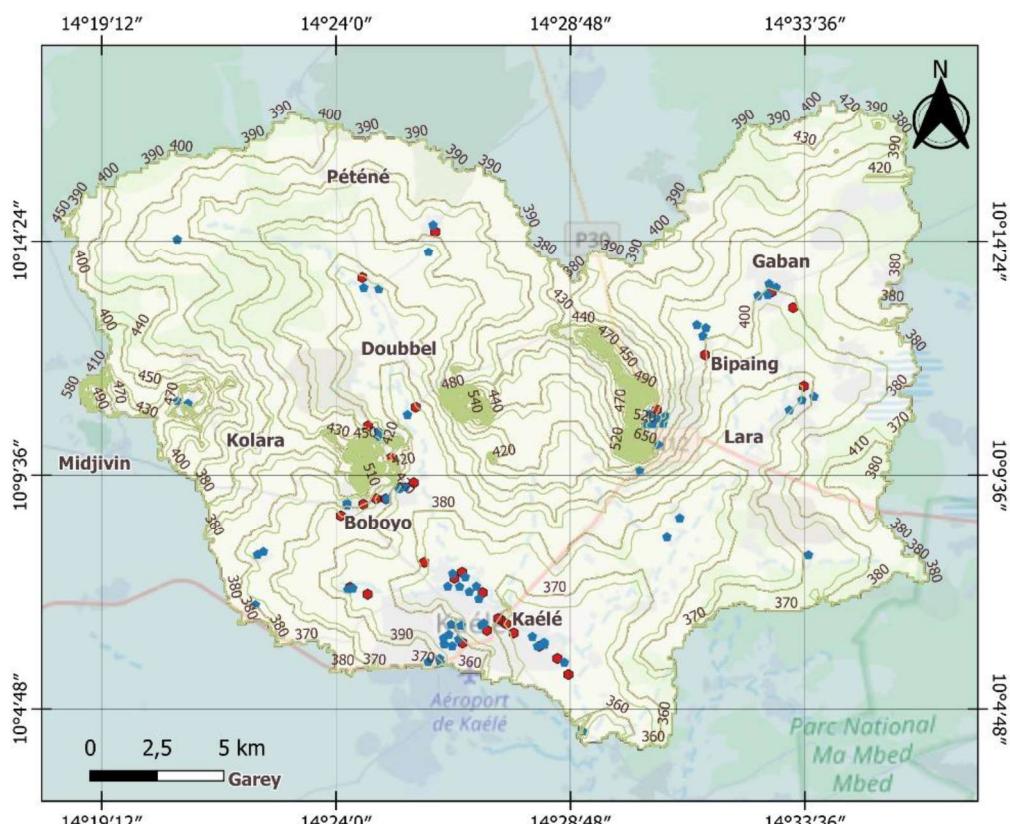
Figure 1 - Localisation du bassin versant à Yoldé

Le climat est de type tropical avec une tendance soudano-sahélienne. Celui-ci est caractérisé par deux saisons inégalement réparties : une saison sèche longue d'environ huit (08) mois et va d'Octobre à Mai et une courte saison de pluie de quatre (04) mois qui couvre les mois de Juin à Septembre. Les précipitations varient entre 700mm et 900mm par an.

Le bassin versant du Mayo Kani fait partie d'un grand ensemble hydrologique africain qui est le bassin versant du Niger. Le Mayo Kani constitue un affluent du Mayo Kebi, tributaire de la rivière Bénoué. La Bénoué est une rivière qui constitue directement aux écoulements du Niger. Comme l'ensemble des cours d'eau de l'extrême -Nord Cameroun (excepté le Logone), le Mayo Kani et ses affluents disposent d'un écoulement saisonnier dont la durée et l'amplitude des crues sont intimement liées à l'importance de la pluviométrie (OLIVRY, 1986). La période concernée par les crues est comprise entre juillet et septembre ; tandis que les étiages débutent généralement en octobre après quoi les lits des mayos (rivières à écoulement temporaire) s'assèchent complètement.

L'hydrologie du bassin versant du Mayo Kani est ponctuée par la présence des marécages (Kani, Gadas, Poukiebi) et des lacs artificiels (lacs de Boboyo) qui assurent de nombreuses fonctions touristiques et écosystémiques pendant la durée de leur existence.

La géomorphologie du bassin versant du Mayo Kani est en effet constituée à plus de 95% des plaines, 1% des plateaux et 4% des montagnes (JEBKALBE, 2014). Ce bassin versant forme à peu près un ensemble morphologique homogène. Il s'incline du sud au nord en une pente très faible. L'altitude varie entre 300 et 600m. Or, l'altitude est un paramètre géomorphologique qui est à la base de la typologie et quantités des pluies tombées dans une région donnée (ZWIEBEL, 2015 ; WANG et al., 2023).



Légende

- | | | |
|-------------------------|-----------------------|-----------------------------|
| ● Forages d'observation | — Courbes maîtresses | □ Contour du bassin-versant |
| ● Puits d'observation | — Courbes secondaires | |

Source: Base de données OSM, Brabant et al., 1984 et levées de terrain

Projection: WGS 1984, UTM Zone 33N

Réalisé par: Djoldebe Prosper

Date: mars 2025

Figure 2- Carte topographique du bassin versant du Mayo-Kani à Yoldé

La géologie du bassin versant du Mayo Kani est représentée par les formations du socle cristallin précambrien (DUMORT et PERONNE, 1966) et des formations volcaniques. Le socle cristallin précambrien affleure, de façon continue, dans les zones montagneuses. Le bassin versant est dominé majoritairement par le gneiss et la syénite.

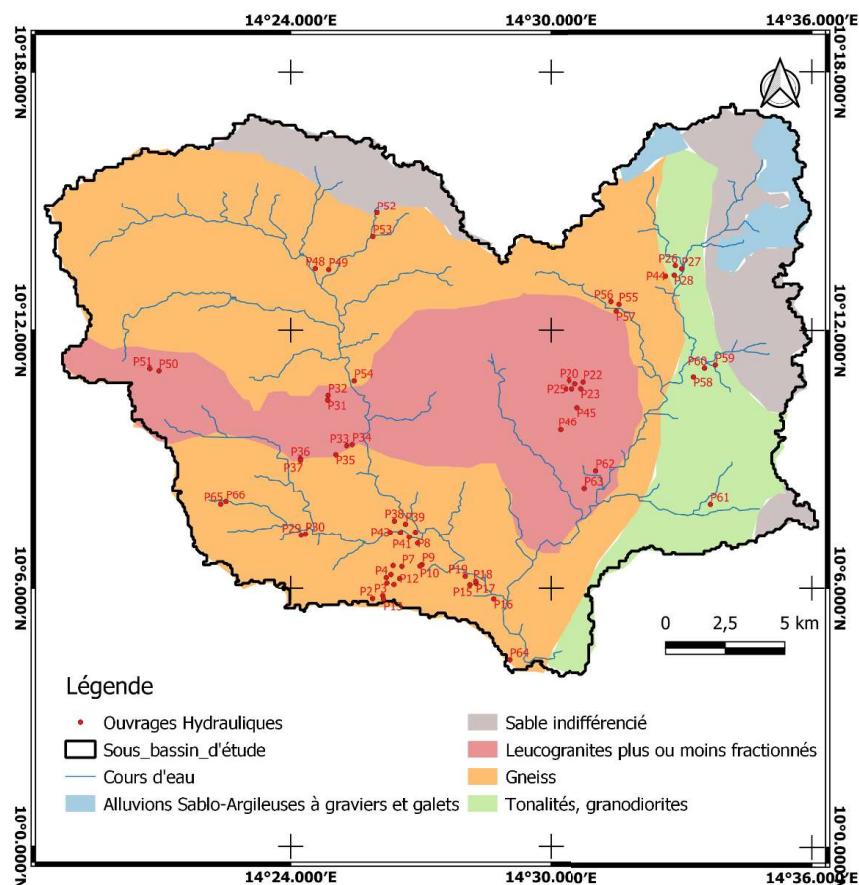


Figure 3- Carte géologique du bassin versant du Mayo-Kani à Yodé

L'hydrogéologie du bassin versant du Mayo-Kani, est caractérisée par un socle cristallin précambrien, des formations infracambriennes et primaires illustrant un aquifère discontinue, lié à l'altération et à la fracturation. Sous ces altérites, on passe progressivement au socle par le biais d'un front d'altération qui dépasse rarement 40 mètres d'épaisseur (TILLEMENT, 1970). Le modèle conceptuel d'aquifère de socle de LACHASSAGNE et WYNS, (2005) peut être admis dans cette zone au vu de conditions environnementales semblables. Ce modèle est constitué d'un recouvrement semi-perméable qui engendre un aquifère d'altérites alimenté par la surface. Cet aquifère surmonte un aquifère de fissures ou de failles, drainant la couverture d'altérité à fonction essentiellement capacitive. Le rôle des altérites saturées est donc primordial.

La population vivant dans ce bassin versant du Mayo Kani a été estimée à 16 millions d'habitants en 2021. Celle-ci est en majorité rurale. Les principales activités humaines sont l'agriculture et l'élevage auxquels s'ajoutent les Petites et Moyennes Entreprises (PME).

MATERIELS ET METHODES

Cette étude est basée sur une approche méthodologique pluridisciplinaire qui consiste conjointement en

- (1) Méthode d'évaluation de la productivité des forages
- (2) un suivi piézométrique des ouvrages hydrauliques (puits choisis) et les données climatologiques ; (3) l'élaboration des cartes piézométriques et (4) les cartes de linéaments.

Données piézométriques et séries pluviométriques

Cette étape a consisté à recenser préalablement à l'aide d'un fond de carte topographique et d'un récepteur GPS (Global Positioning System) les coordonnées géographiques (longitude, latitude et altitude) de tous les ouvrages hydrauliques existants (puits) dans le bassin versant du Mayo-Kani. A l'issu de cette investigation 288 puits ont été recensés. En raison d'une homogénéité dans la répartition des ouvrages hydrauliques, 66 puits ont fait l'objet d'un suivi piézométrique bimensuel. Les critères de choix de ces ouvrages portent sur l'accèsibilité, la représentativité, la répartition spatiale, la topographie, l'accord du propriétaire, le débit relativement élevé et la sollicitation pour des besoins de consommation par la population pour certains ouvrages.

La campagne du suivi piézométrique s'est déroulée durant une année hydrologique allant de septembre 2022 à août 2023 à une cadence mensuelle. Le niveau piézométrique H(m) a été déterminé suivant la formule dans le cas d'une nappe libre (CASTANY, 1998) et la profondeur d'eau (p) dans l'ouvrage a été déterminée à partir d'une sonde électrique sonore. $H = Z - Ns - Hm$ Avec : H= Niveau piézométrique (m) ; Z = altitude de la surface topographique(m) ; Ns = Niveau Statique des puits(m) ; Hm= Hauteur de la Margelle. (m)

En ce qui concerne les données climatologiques, Elles ont été collectées à travers onze stations pluviométriques dont huit stations situées à l'intérieur du bassin versant et trois stations situées dans les localités environnantes. Ces données nous ont été fournies pour l'essentiel, par la Direction Générale de la Société de Développement de Coton (SODECOTON) à Garoua de 1990 à 2022. Celles-ci ont été complétées par les données issues du portail numérique NASA-Power-data-access-viewers, accessibles sur le site internet <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>.

Ces données nous ont permis de mettre en relation la dynamique pluviométrique avec les données piézométriques pour en dégager leur impact.

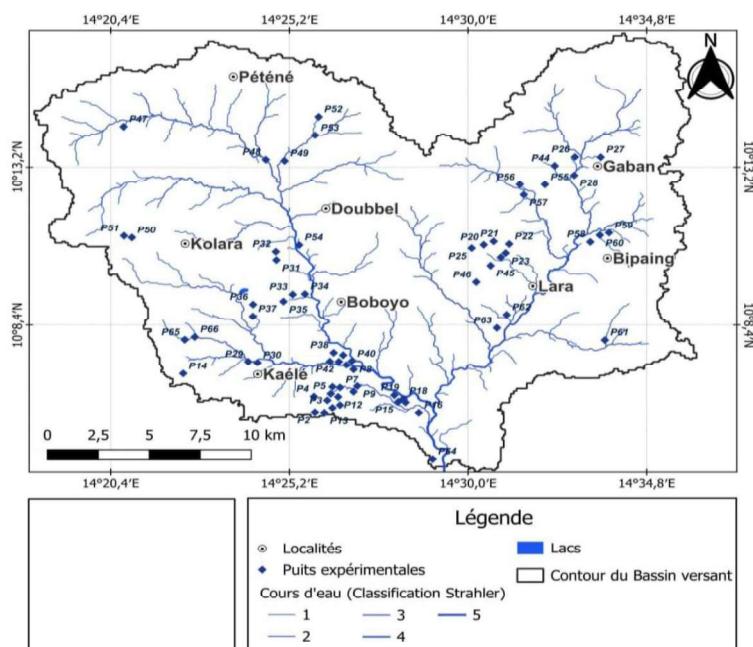


Figure 4 -Localisation des ouvrages d'observation dans le bassin versant du Mayo-Kani à Yolde

METHODES

Méthode d'évaluation de la productivité des forages

La productivité des ouvrages de la zone de socle de la région de l'Extrême Nord a été évaluée à partir d'une analyse comparative entre les débits et les paramètres physiques des forages (profondeur totale, épaisseur d'altérites) d'une part et, d'autre part, entre les débits de forages et les transmissivités. La distribution de ces débits et de ces transmissivités a été faite suivant la classification proposée par divers auteurs (Lasm, 2000 ; Dibi et al., 2004 ; Yao et al., 2010). : Pour les débits :

- de 0 à 1 m³/h : débits très faibles
- de 1 à 2,5 m³/h : débits faibles
- de 2,5 à 5 m³/h : débits moyens
- supérieur à 5 m³/h : débits forts.

Pour la transmissivité :

- classe faible : $T < T < 10-4 \text{ m}^2/\text{s}$;
- Classe moyenne : $10-5 \text{ m}^2/\text{s} < T < 10-4 \text{ m}^2/\text{s}$;
- classe forte : $T > 10-4 \text{ m}^2/\text{s}$.

Elaboration des cartes piézométriques

L'élaboration des cartes piézométriques de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani a été faite par la méthode d'interpolation par krigage. C'est une méthode géostatistique qui permet de réaliser l'interpolation approximative, spatiale d'une variable régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du Vario-gramme expérimental. Le logiciel QGISS 3.12 est utilisé à cet effet. L'établissement de la carte piézométrique aura pour but de déterminer les principales directions de l'écoulement souterrain et les aires d'alimentation de la nappe. Ces cartes schématiseront d'une part les fonctions capacitives et conductrices des réservoirs, et d'autre part le comportement hydrodynamique de l'aquifère. Les cartes piézométriques minimale, maximale et moyenne annuelle seront ainsi été élaborées correspondant respectivement au mois de l'année ayant les niveaux piézométriques minimale, maximale et du niveau piézométrique moyen de chaque ouvrage hydraulique durant l'année d'étude.

Elaboration des cartes des linéaments

L'élaboration des cartes des linéaments dans le bassin versant du Mayo-Kani a été faite par la méthode géostatistique. Nous avons procédé d'abord par télécharger les Landsat 09 OLI, comprenant 07 bandes ; créer une bande composite à 07 bandes sur ArcGIS ; découper la zone d'étude pour réduire le temps de calcul. Ensuite, par exporter la bande composite découpée au format tif, nous avons également procéder à l'étalonnage directionnel sur Géo-Montaj, exporté la bande sur PCI Géomatica pour procéder à l'extraction des linéaments en reconfigurant les bandes RGB sur 5, 4,3. Les différentes densités sont extraites sur le format shp et le calcul des coordonnées de départ et d'arrivée de chaque ligne sur Argis et la table au format CAD sur ROCKWORKS pour les calculs des directions et la longueur des lignes et sortir la rosace des directions homogènes. La mise en page et le mosaïquage des cartes ont été faites par Ggis.

RESULTATS ET DISCUSSIONS

RESULTATS

Eléments structuraux

Sur l'ensemble du bassin d'étude, les éléments structuraux les plus évidents qui affectent la roche saine sont les failles, les filons, les diaclases, la foliation et la schistosité. Les principales directions du réseau hydrographique sont similaires à celles de la tectonique (diaclases et foliation principalement). La carte de synthèse des linéaments représente l'ensemble des segments résultant de la superposition de l'information continue dans les trois images filtrées. Elle regroupe au total 720 linéaments. Cette carte de linéaments apparaît polymodale. En effet, elle nous révèle trois familles importantes d'orientation de linéaments : NS-WS ; VE et EW.

L'orientation NS-WS est prédominante, regroupant en elle seule 75% de l'information. Les linéaments appartenant à la famille VE regroupent 6,25%. Quant à la direction EW, elle est représentée à 18,75%. Les

principales directions du réseau hydrographique sont similaires à celles de la tectonique (diaclasses et foliation principalement). La figure présente les cartes de linéaments ainsi que la rosace directionnelle.

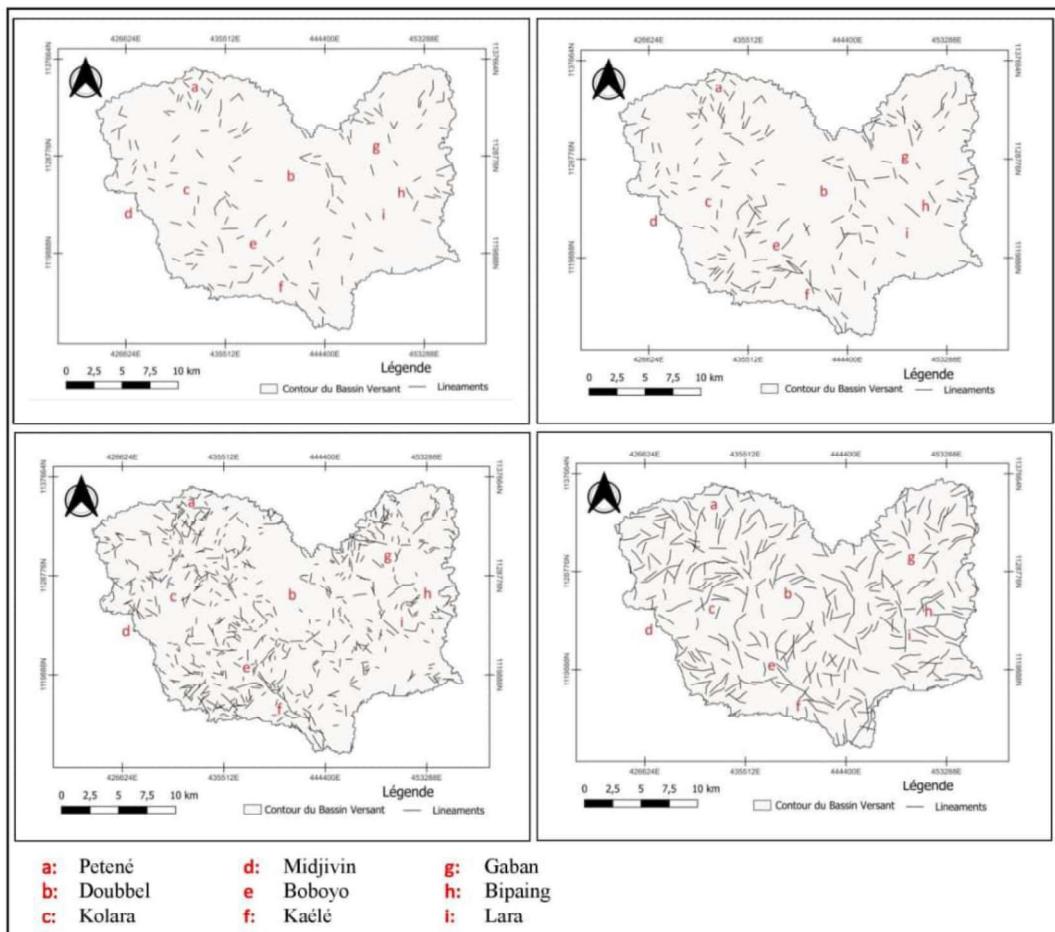


Figure 6- Image du rehaussement et du filtrage directionnel NW-SW, NE, SE et la carte de synthèse des linéaments

Rose Diagram

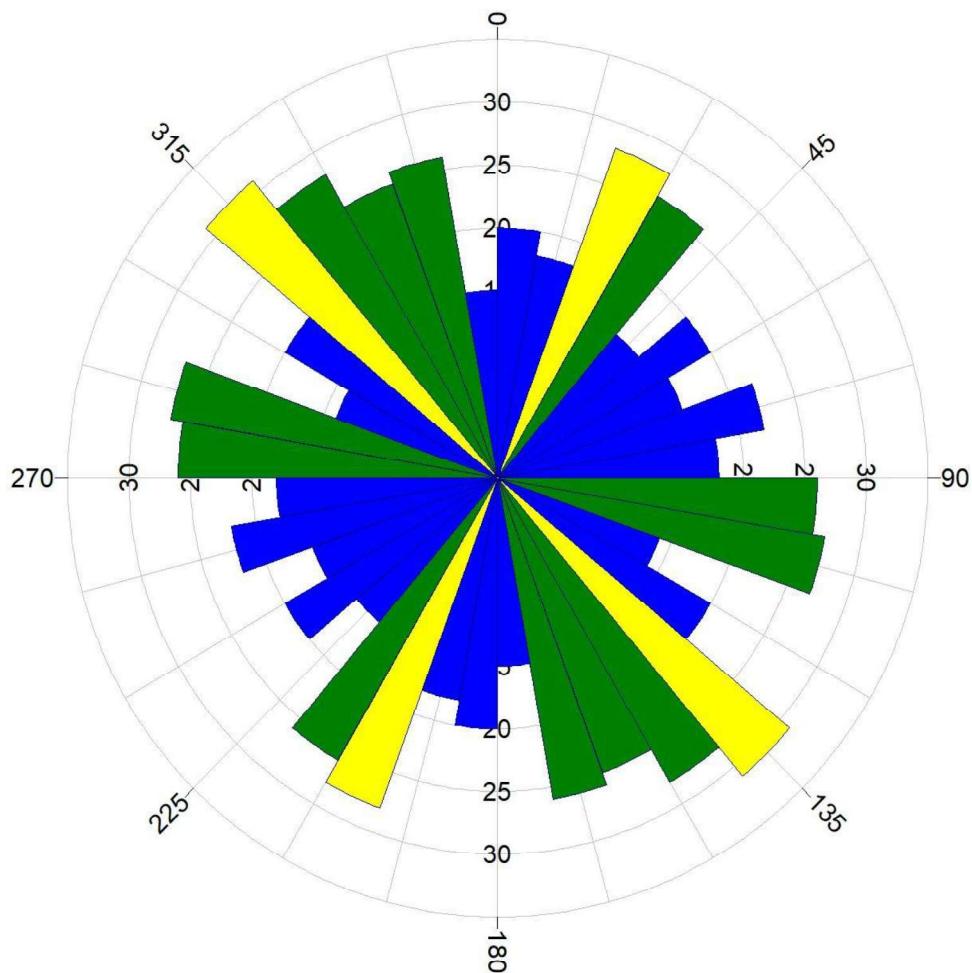


Figure 7 - Rosace directionnelle des linéaments du bassin versant du Mayo-Kani à Yoldé

Caractéristiques hydrodynamiques de l'aquifère à nappe du socle

Lithologie et conductivité hydraulique des produits d'altération

La nature du réservoir latéritique est constituée de gneiss et un petit cordon de sable indifférencié (nord et sud), de leuco granités plus ou moins fractionnés (centre), les tonalités granodiorites, sable indifférencié et un petit cordon des alluvions sablo-argileuses à graviers et galet (est) du bassin versant étudié.

L'analyse de la productivité des forages en fonction des paramètres hydrodynamiques montre que les débits spécifiques dans cette zone de socle varient de $1,02$ à $2,09\text{ m}^3/\text{h}$, la moyenne est de $1,59\text{ m}^3/\text{h}$, l'écart type de $0,28\text{ m}^3/\text{h}$. Dans cette zone de socle, les valeurs de transmissivité varient entre $0,75 \times 10^{-7}\text{ m}^2/\text{s}$ et $2,29 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ avec une moyenne de $1,44 \times 10^{-5}\text{ m}^2/\text{s}$. L'écart type est de $1,14 \times 10^{-4}\text{ m}^2/\text{s}$ et le coefficient de variation est de $2,27$ (Tab I). Ces résultats montrent que les transmissivités sont hétérogènes dans cette zone de socle. Tous les forages de ce bassin versant appartiennent à la classe faible, ce qui témoigne que ces forages ont un faible taux de transmissibilité. Ceci illustre que les aquifères de socle du bassin versant du Mayo-Kani ont, en général, une faible fonction conductrice.

Le tableau I. Caractérisation de la productivité des forages du socle du bassin versant du Mayo-Kani.

Ouvrages	Prof T (m)	Ep alt (m)	Q/S en m ² /h	T en m ² /S	Qexp m ³ /h
F1	61,8	8	1,95	1,08	1,85
F2	59,17	9	1,33	0,37	2,83
F3	52,95	11	1,89	0,49	2,23
F4	75	10	2,09	2,24	3,35
F5	45	9	1,78	1,38	1,36
F6	65	10	1,8	1,76	1,07
F7	60	7	1,02	1,23	1,92
F8	47	6	1,14	1,61	2,18
F9	58	9	1,66	2,11	1,28
F10	60	8	1,28	2,18	3,03
F11	55	7	2,01	2,08	2,46
F12	50	7	1,68	1,44	2,69
F13	68	10	1,16	0,97	3,17
F14	62	9	1,93	1,46	2,78
F15	59	9	1,43	1,93	3,46
F16	54	7	1,69	1,78	3,01
F17	63	8	2	0,95	3,05
F18	55	6	1,18	1,2	2,16
F19	51	7	1,53	1,58	2,3
F20	53	8	1,25	1,14	3,63
Moy	57,69	8,25	1,59	1,44	2,49
Max	75	11	2,09	2,29	3,46
Min	47	6	1,02	0,37	1,07
Ecart-type	8,13	1,14	0,28	0,75	0,78

Caractérisation piézométrique

Les niveaux piézométriques varient entre 490,44 et 361,24 m pendant la période maximale, et entre 477,66 et 357,02 en période minimale. Les fluctuations piézométriques varient ainsi entre -2 m et 13,2 m soit une fluctuation moyenne annuelle de 3,96 m (Tableau II).

Tableau II. Synthèse des données piézométriques du bassin versant du Mayo-Kani

Ouvrages	NPMA(m)	NPC(m)	NPE(m)	VNP(m)
P1	362,4	362,78	361,24	1,5
P2	362,31	363,63	361,16	2,4
P3	366,27	367,08	364,96	2,1
P4	366,11	366,68	364,84	1,8
P5	361,43	364,56	362,31	2,2
P6	365,15	365,88	364,4	1,4
P7	366,82	367,52	365,42	2
P8	359,59	360,53	358,46	2
P9	366,76	367,62	365,57	2
P10	368,33	369,1	366,97	2,1
P11	375,02	376,09	373,22	2,8
P12	378,68	378,7	378,47	0,2
P13	389,71	390,05	390,27	-0,2
P14	355,96	357,39	354,81	2,5
P15	357,71	358,2	356,6	1,6
P16	356,06	357,37	354,49	2,8
P17	358,685	360,52	357,47	3
P18	361,06	362,33	359,14	3,1
P19	359,3	360,46	358,15	2,3
P20	400,47	412,01	398,78	13,2
P21	402,88	403,55	400,75	2,8
P22	393,75	392,98	388,79	4,1
P23	396,21	398,95	392,25	6,7
P24	403,04	404,89	399,32	5,5
P25	396,54	397,66	393,47	4,1
P26	381,39	383,09	379,91	3,1
P27	396,41	400,58	390,69	9,8
P28	402,82	403,26	401,42	1,8
P29	394,27	397,68	393,28	4,3
P30	382,98	385,66	380,72	4,9
P31	386,11	389,43	382,15	7,2
P32	383,34	389,03	379,3	9,7
P33	367,43	368,46	364,53	3,9
P34	371,1	372,8	370,05	2,7
P35	371,19	373,91	365,82	8
P36	383,78	384,86	381,86	2,9
P37	384,59	389,44	380,21	9,2
P38	359,49	360,63	358,36	2,2
P39	355,36	356,4	354,13	2,2
P40	356,17	357,75	354,32	3,4
P41	358,97	360,46	357,25	3,2
P42	363,99	364,02	362,98	1

P43	362,98	362,77	361,88	0,8
P44	391,44	392,86	390,14	2,7
P45	391,1	392,41	389,25	3,1
P46	396,99	404,56	393,13	11,4
P47	420,7	423,25	417,77	5,4
P48	402,66	406,1	399,47	6,6
P49	429,6	432,92	426,63	6,2
P50	481,68	485,25	477,84	7,4
P51	478,61	481,52	475,37	6,1
P52	436,74	437,37	436,61	0,7
P53	432,61	434,97	428,68	6,2
P54	419,76	417,49	419,55	-2
P55	402,98	406,11	400,89	5,2
P56	402,88	402,77	401,85	0,9
P57	413,25	415	412	2,9
P58	387,21	384,16	374,88	9,2
P59	380,25	381,66	378,37	3,2
P60	382,2	383,12	381,89	1,2
P61	375,18	378,81	370,97	7,8
P62	388,97	390,11	387,1	3
P63	368,3	370,01	366,1	3,9
P64	355,71	355,75	353,43	2,3
P65	369,28	374,78	364,94	9,8
P66	397,37	399,39	394,91	4,4
Moy.	384,81	386,62	382,6	3,96
'Méd.	381,79	383,1	378,88	3
Max.	481,68	485,25	477,84	13,02
Min.	355,41	354,27	355,4	-2
Ecart-T.	2,3	1,87	1,88	0,35
CV.	0,006	0,005	0,005	-0,175

**NPMA : Niveaux piézométriques moyens annuels ; NPC : Niveaux piézométriques de crue ;
 NPE : Niveaux piézométriques d'étage ; VNP : Variations des niveaux piézométriques ; Moy.
 Moyenne ; Méd. : Médiane ; Max. Maximum ; Min. : Minimum ; ET. Ecart-Type ; CV. Coefficient
 de Variation.**

L'évolution des niveaux piézométriques mensuels en fonction des pluies montre que le mois de septembre représente la période des hautes eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani et mai celle des basses eaux (Figure 12, 13, 14, 15 et 16). Les cartes piézométriques de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Mayo-Kani montre un écoulement uniforme des eaux souterraines. Cela est caractérisé sur les cartes par une direction variée des lignes de courant qui sont convergentes (Figures 8, 9 et 10).

L'analyse des cartes piézométriques porte sur l'orientation des lignes de courant et la courbure des arcs des cercles. Ces cartes révèlent ainsi des zones à arc de cercle concentrique portant des lignes de courant convergentes. Ces zones constituent respectivement des zones de stockage et d'alimentation de l'aquifère à nappe du bassin versant du Mayo-Kani. Il faut noter que les zones de stockage de l'aquifère constituent des zones propices à l'implantation des ouvrages hydrauliques. D'une manière générale les lignes de courant convergent vers le cours d'eau Mayo-Kani qui constitue à cet effet le principal axe de drainage de l'aquifère à nappe du bassin versant du Mayo-Kani. Ce cours d'eau peut donc être alimenté par la nappe en période d'étiage.

La différence d'altitude entre les données piézométriques maximale (27 septembre 2022) et minimale (31 mai 2023) a permis de tracer la carte de fluctuation annuelle de la surface piézométrique. Cette dernière montre que les puits localisés sur les flancs de collines ont des fluctuations plus importantes que ceux situés dans les bas-fonds près du lit du cours d'eau Mayo-Kani. C'est l'exemple des puits P20 (13,2 m) P46 (11,4 m) situés à Lara ; le P32 avec 9,7m à Kassilé ; le P37 avec 9,2m à Boboyo ; le P58 avec 9, 2 m à Bipaing et le P65 avec 9, 8 m à Poudama. Cela s'expliquerait par la présence d'une matrice argileuse présente dans les bas-fonds qui réduit par ses propriétés de rétention et d'imperméabilité l'infiltration efficace. Cette zone est caractérisée par l'occupation pérenne de la nappe à faible profondeur.

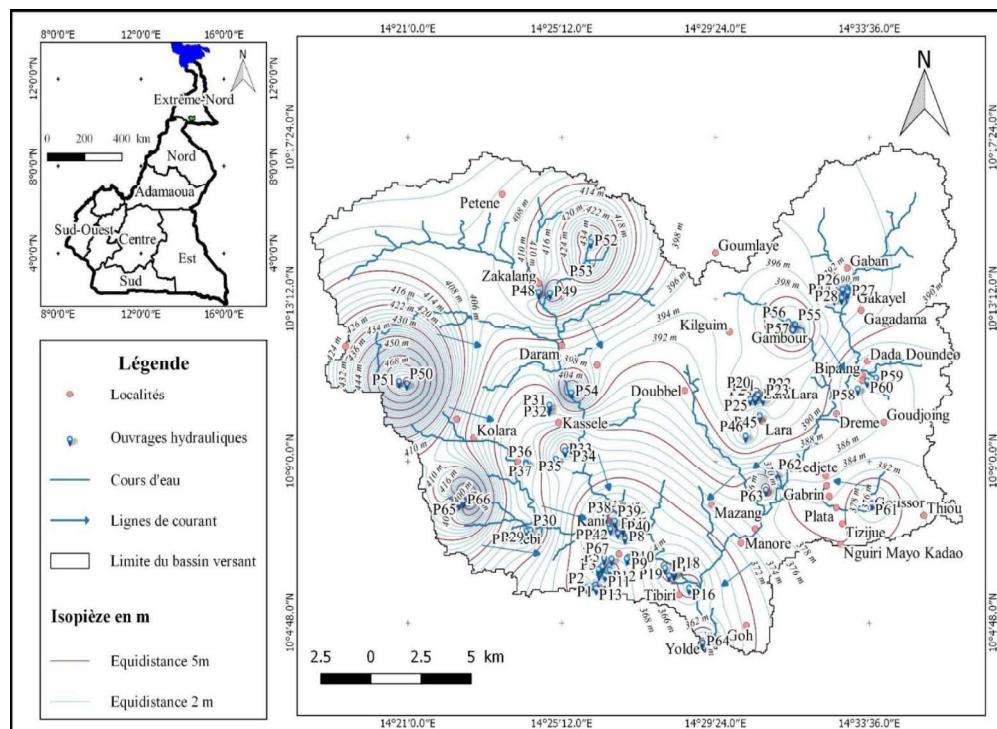


Figure 8 -Carte piézométrique minimale du bassin versant du Mayo-Kani

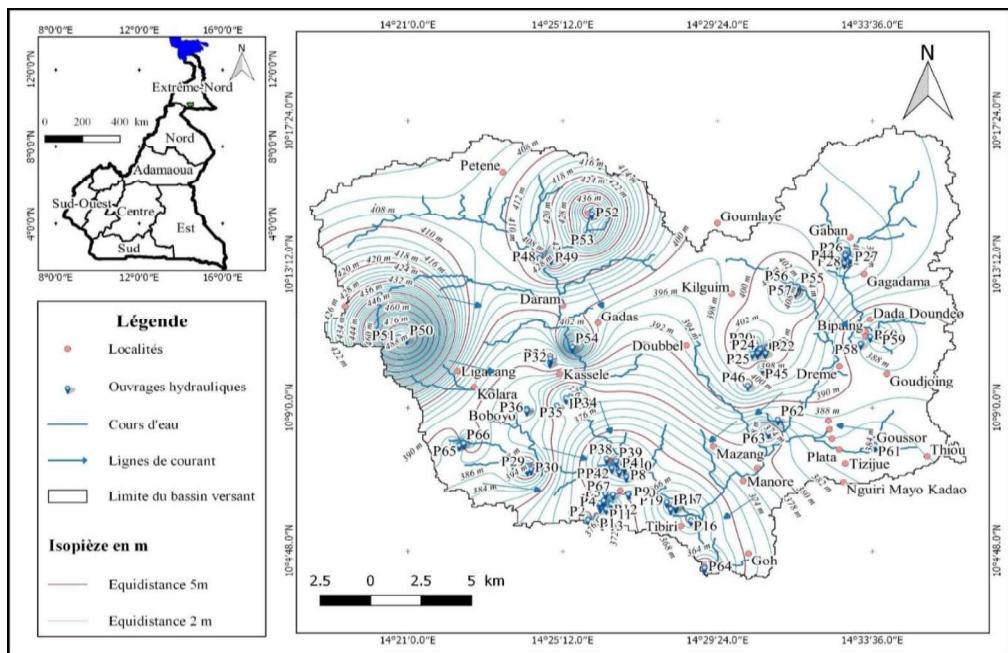


Figure 9- Carte piézométrique maximale du bassin versant du Mayo-Kani

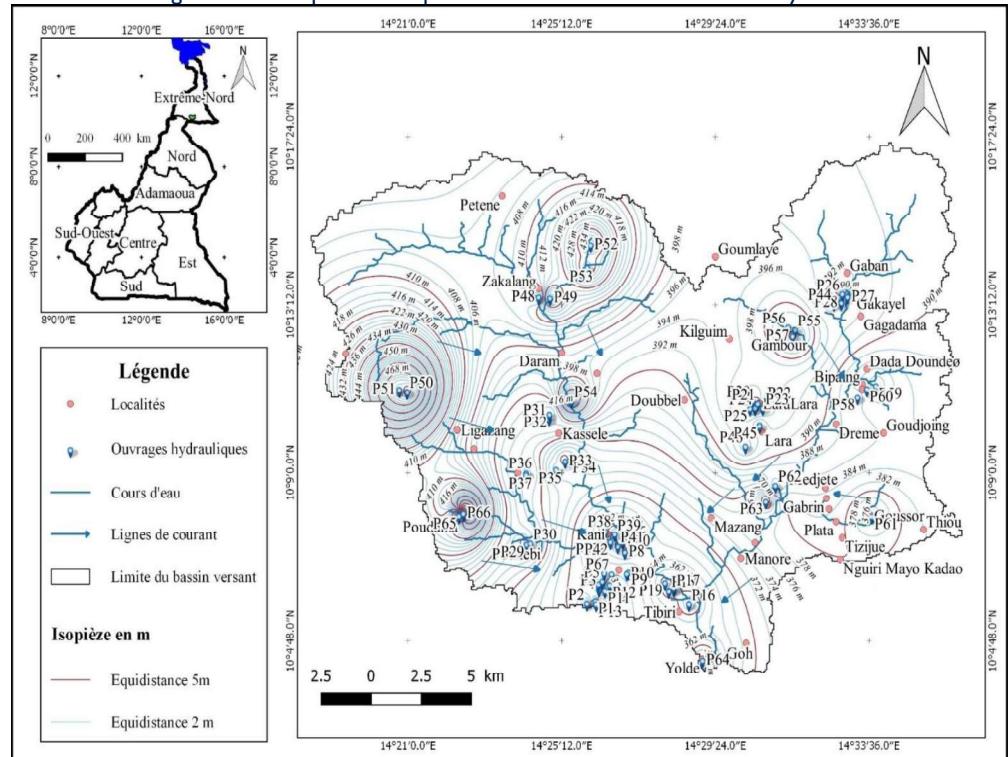


Figure 10- Carte piézométrique moyenne annuelle du bassin versant du Mayo-Kani

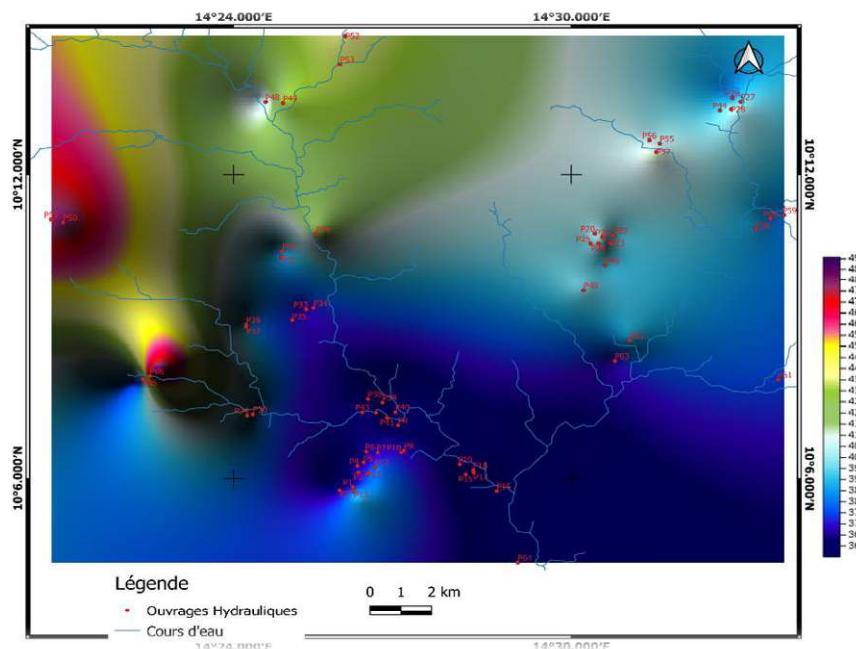


Figure 11- carte piézométrique du bassin versant du Mayo-Kani

L'analyse de la figure 11 présente la carte piézométrique avec une emphase sur les différentes nappes du bassin versant du Mayo-Kani. Le bassin versant est caractérisé par une alternance de la période sèche et de pluie saisonnières. La géologie étant dominée par les formations cristallines et des recouvrements sédimentaires variés, influençant la distribution et la nature des nappes aquifères. Cette figure permet de distinguer deux types de nappe dans ce bassin versant. La première est la nappe de profonde et perchée. Elles sont souvent confinées et leur recharge est moins directe, se produisant principalement lors des périodes de crues ou par infiltration latérale depuis les nappes superficielles. Ces nappes sont généralement moins vulnérables à la pollution, mais leur exploitation nécessite des infrastructures adaptées. Nous pouvons observer cette nappe vers le Sud-Est et Nord-Est du bassin versant avec une valeur de 360 à 400 m du niveau piézométrique. Plus de 96% de nos puits expérimentaux se retrouvent dans ce type de nappe. La deuxième, c'est la nappe peu profonde ou superficielle. Elles sont alimentées par les précipitations et les eaux de surface, notamment lors des saisons des pluies. La recharge de ces nappes est influencée par l'infiltration directe des eaux de surfaces. Nous les observons vers le Nord-Ouest et le nord du bassin versant avec une hauteur du niveau piézométrique de 400 à 500 m. Elle représente environ 4% des puits d'observation.

Relation pluie-niveau piézométrique

Les précipitations influencent directement le niveau piézométrique en rechargeant les nappes phréatiques. En période de fortes pluies, les sols saturés limitent l'infiltration, favorisant le ruissellement. Cependant, une partie de l'eau s'infiltra et contribue à la recharge des nappes. La nature argileuse des sols dans certains zones réduit les zones d'infiltration, concentrant les apports dans les principaux axes d'écoulement. Les figures 12, 13, 14, 15 et 16 présentent la relation pluie-niveaux piézométriques dans les espaces du bassin versant du Mayo-Kani

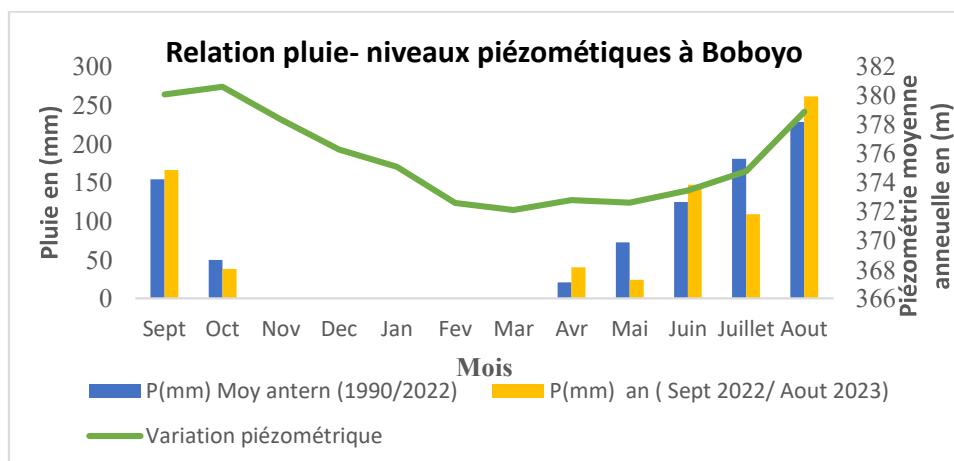


Figure 12- Relation pluie- niveaux piézométrique mensuels à Boboyo

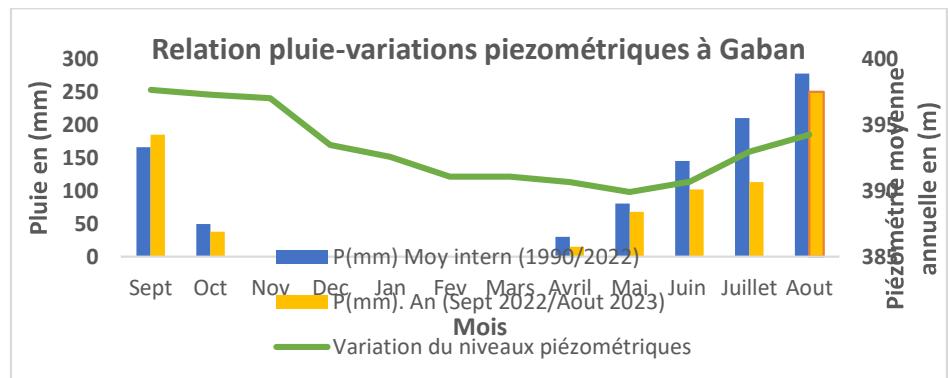


Figure 13 -Relation pluie- niveaux piézométriques mensuels à Gaban

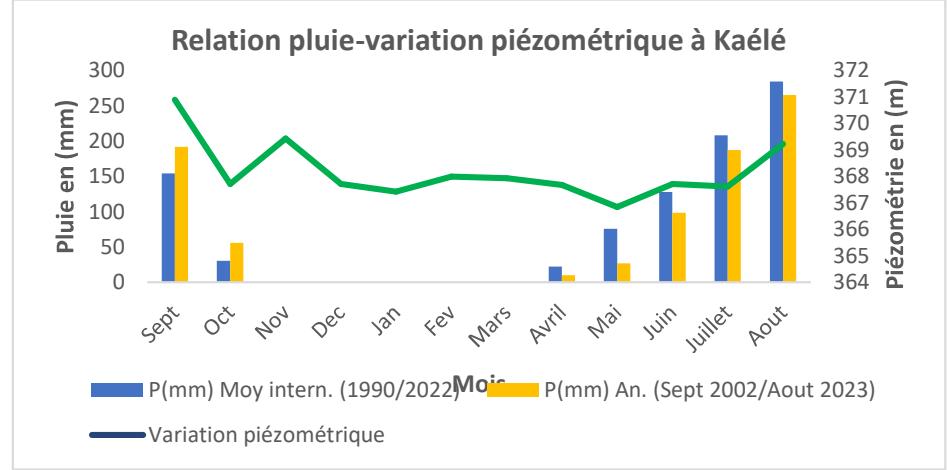


Figure 14- Relation pluie- niveaux piézométrique mensuels à Kaélé

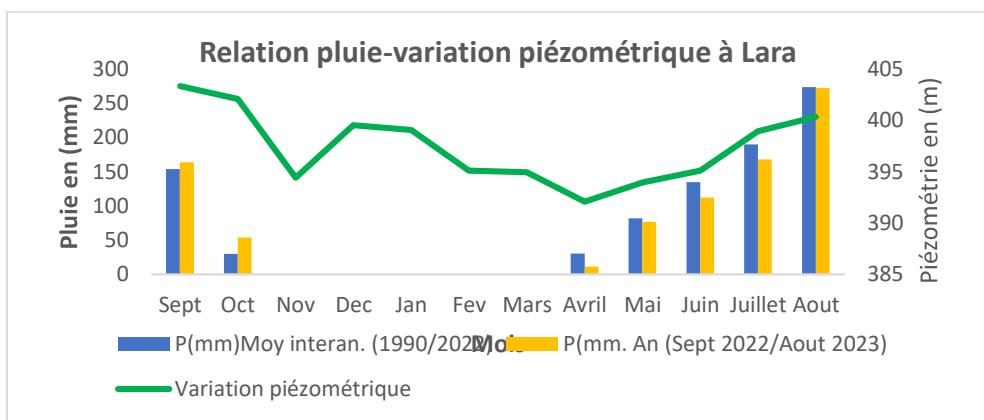


Figure 15 - Relation pluie- niveaux piézométriques mensuels à Lara

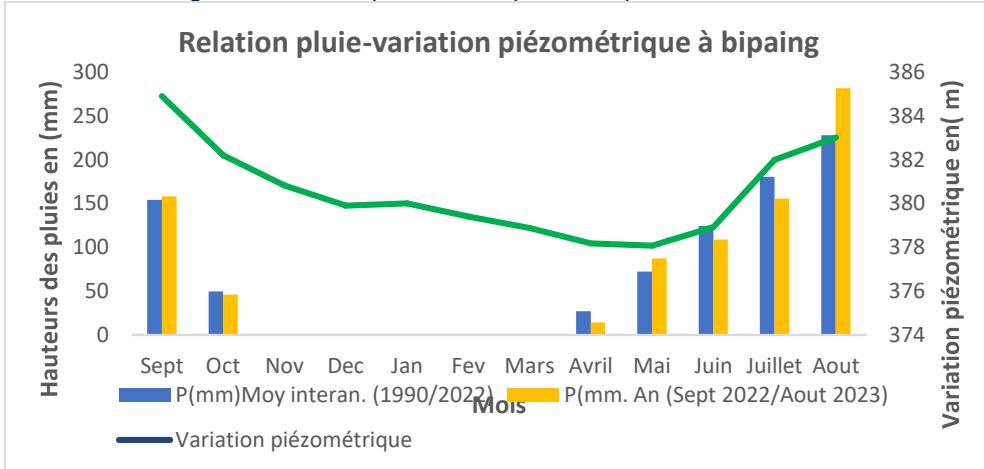


Figure 16 - Relation pluie-variation piézométrique à bipaing

L'analyse de la figure 12, 13, 14, 15 et 16 mettent en lumière le lien qui existe entre la pluviométrie et les fluctuations piézométriques dans le bassin versant du Mayo-Kani. Les figures révèlent un diagramme ombrothermique présentant d'une part les hauteurs de pluies de 1990 à 2022 à travers histogramme en jaune, de septembre 2022 à août 2023 à travers l'histogramme en bleue. D'autre part, une courbe de variation du niveau piézométrique en couleur verte. Il ressort que non seulement les pluies mensuelles ont connues une diminution dans le temps et dans l'espace dans presque toutes les stations présentées ; mais et surtout le caractère tributaire du niveau piézométrique par les pluies dans le sens où ces dernières participent fortement à la recharge de la nappe à travers l'infiltration et de la percolation. Les figures 12, 13, 14, 15 et 16 démontrent à suffisance ce caractère tributaire du niveau piézométrique par la pluviométrie. En effet, nous observons dans toutes les stations évoquées que la nappe se recharge à partir du mois de juin à septembre avec les crues prononcées ; et se vide partir d'octobre à mai pendant l'étiage. Le caractère singulier de la variation piézométrique des localités étudiées dépend de la structure géologique et de la topographie de ces milieux. Nous notons ici les écarts de la variation piézométrique annuelle sont les suivants : Kaélé (4,06 m) ; Lara (9,38 m) ; Gaban (7,72 m) ; Bipaing (5,87 m) et Boboyo (7,45 m). Alors que la pluviométrie annuelle enregistrée dans les stations est la suivante : Kaélé (835mm) ; Lara (859,1mm) ; Gaban (771mm) ; Bipaing (852mm) et Boboyo (785mm). Les fluctuations du niveau piézométrique sont fortement liées à la dynamique spatio-temporelle de la pluviométrie dans ce bassin versant.

DISCUSSIONS

La région de l'extrême-nord en générale et le bassin versant du Mayo-Kani en particulier n'a pas assez fait l'objet véritable des études hydrogéologiques. Les résultats des analyses piézométriques révèlent que les niveaux piézométriques varient entre 490,44 et 361,24 m pendant la période maximale, et entre 477,66 et 357,02 en période minimale. Les fluctuations piézométriques varient ainsi entre -2 m et 13,2 m soit une fluctuation moyenne annuelle de 3,96 m (Tableau 1). Cette fluctuation est relativement supérieure à celles trouvées dans d'autres bassins hydrographiques du mfoundi comme ceux de l'Ekozoa (FEUMBA, 2005) soit 0,55 à 1,65m. ; de Ntem (KALLA, 2007) soit 0,1 à 1,91m ; de l'Ebogo-Ewé (PRISO, 2007) soit 0,08 à 0,88m ; de Nkié (ABDOU, 2020) soit 0,1 à 7,48 m. L'analyse des cartes piézométriques nous présente un écoulement uniforme des eaux souterraines, caractérisé par une direction variée des lignes de courant qui sont convergentes. Les résultats de (ABDOU, N. et al., 2020) sur « Caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé-Cameroun) » nous démontre au contraire l'analyse cartes piézométriques, le bassin versant du Nkié présentant un écoulement non uniforme des eaux souterraines, caractérisé sur les cartes par une direction variée des lignes de courant qui sont soit convergentes soit divergentes similaires à celles généralement observées au sein de la majorité des nappes d'altérites des formations de socle, sous-climat tropical humide.

La nature du réservoir latéritique est constituée de gneiss et un petit cordon de sable indifférencié (nord et sud), de leuco granités plus ou moins fractionnés (centre), les tonalités granodiorites, sable indifférencié et un petit cordon des alluvions sablo-argileuses à graviers et galet (est) du bassin versant étudier. Cette constatation confirmerait la répartition des éléments structuraux selon deux secteurs tectoniques d'apparence morphologique différentes : l'axe NS-WS représentant l'étirement de la chaîne dominée par les structures souples marquée par la quasi-totalité des linéaments. L'axe WE et EW représentant la compression dominée par des structures fragiles (SAINT-JEAN, 1991). De ces analyses, il ressort que nous pouvons associer une bonne partie de nos observations à des structures déjà existantes avec une plus grande précision.

Les résultats sur la productivité des forages en fonction des paramètres hydrodynamiques montrent que les débits spécifiques dans cette zone de socle varient de 1,02 à 2,09m³/h, la moyenne est de 1,59 m³/h, l'écart type de 0,28 m²/h. Dans cette zone de socle, les valeurs de transmissivité varient entre $0,75 \times 10^{-7}$ m²/s et $2,29 \times 10^{-4}$ m²/s avec une moyenne de $1,44 \times 10^{-5}$ m²/s. L'écart type est de $1,14 \times 10^{-4}$ m²/s et le coefficient de variation est de 2,27. Ces résultats sont inférieurs à ceux de Ewodo et al, (2017) sur la caractérisation de la productivité des aquifères du socle de la région de (l'Extrême-nord- Cameroun) soit 0,04 m³/h et 4m³/h avec une moyenne de 1,66 m³/h, avec une épaisseur d'altérite qui varie entre 1 et 14 m ; une profondeur totale comprise entre 30 et 75 m. Par ailleurs, Les travaux de André Firmin et al, (2015) dans le bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé ont souligné les facteurs à l'origine des écoulements souterraines qui sont influencé par les facteurs physiques et hydrauliques des terrains, c'est la même réalité dans le bassin versant du Mayo-Kani. Par contre, Adua kopa et al. (2012), dans le bassin sédimentaire de Douala mettent l'accent sur la lithologie dont la profondeur varie entre 0 et 100 m qui présente deux principaux aquifères : les nappes superficielles (de 0 à 17m) et les nappes profondes (de 20 à 73 m).

CONCLUSION

Le présent travail avait pour objectif d'effectuer, une caractérisation hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre, Les principaux résultats sont les suivants :

Les niveaux piézométriques varient entre 490,44 et 361,24 m pendant la période maximale, et entre 477,66 et 357,02 en période minimale. Les fluctuations piézométriques varient ainsi entre -2 m (zone de bas-fond) et 13,2 m (pour P3 situé au sommet des versants), soit une fluctuation moyenne annuelle de 3,96 m. Les cartes piézométriques de l'aquifère à nappe libre montre un écoulement non uniforme des eaux souterraines. Cela est caractérisé sur les cartes par une direction variée des lignes de courant qui sont soit divergentes soit convergentes. Ces cartes révèlent ainsi des zones à arc de cercle concentrique portant des lignes de

courant convergentes et celles à arc de cercle concentrique et portant des lignes de courant divergentes. Ces zones constituent respectivement des zones de stockage et d'alimentation de l'aquifère à nappe. La carte de synthèse des linéaments représente l'ensemble des segments résultant de la superposition de l'information continue dans les trois images filtrées. Elle regroupe au total 720 linéaments. Cette carte de linéaments apparaît polymodale. En effet, elle nous révèle trois familles importantes d'orientation de linéaments : NW-SW ; NE et SE. L'orientation NW-SW est prédominante, regroupant en elle seule 75% de l'information. Les linéaments appartenant à la famille NE regroupent 6,25%. Quant à la direction SE, elle est représentée à 18,75%.

En perspective, au regard des résultats obtenus, la dynamique piézométrique dans les aquifères du socle libre sont en lien direct avec la dynamique pluviométrique notamment le cycle de recharge et de vidange. Compte-tenu du contexte hydrogéologique de la zone, il est impératif qu'une étude doive faire sur la qualité de l'eau dans ce bassin versant.

REFERENCES BIBIOGRAPHIQUES

- [1] ABDOU, N.N., (2020). Caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant du Nkié (Yaoundé-Cameroun) : European Scientific Journal May 2020 edition vol. No.15ISSN : 1857-7881 (Print) e-ISSN1857-7431 ;
- [2] AN, T.D., TSUJIMURA, M., LE-PHU, V., KAWACHI, A., HA, D.T. (2014). Chemical characteristics of surface water and groundwater in coastal watershed, Mekong Delta, Vietnam. Procedia Environ Sci 20 :712– 721. <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2014.03.085>.
- [3] A ZGHIBI, J TARHOUNI, L ZOUEHRI., (2013). Assessment of seawater intrusion and nitrate contamination on the groundwater quality in the Korba coastal plain of cap-Bon (Nord-east of Tunisia) : Journal of African Earth Sciences 87, 1-12p ;
- [4] BON, A. F., NDAM NGOUPAYOU, J. R., EWODO MBOUDOU, G. & EKODECK, G. E. (2016). Caractérisation hydrogéologique des aquifères de socle altéré et fissuré du bassin versant de l'Olézoa à Yaoundé, Cameroun. Revue des sciences de l'eau / Journal of Water Science, 29(2), 149–166. <https://doi.org/10.7202/1036545ar>
- [5] CASTANY, G. (1998). Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Éd. Dunod, Paris V, 236p
- [6] DETAY M., (1987). Identification analytique et probabiliste des paramètres numériques et non numériques et modélisation de la connaissance en hydrogéologie subsahélienne – Application au Nord Cameroun. Univ. De Nice, Thèse de doct. Ès-sciences, 456 p.,
- [7] DETAY M. (2000). Hydrogéologie : Atlas de la province Extrême-Nord Cameroun, Minrest, INC, IRD, Paris, pp 30-37
- [8] DUMORT J-C ET PERONNE Y., (1966). Notice explicative sur la feuille de Maroua. 67p
- [9] DEWANDEL B., P. LACHASSAGNE, R. WYNS, J.C. MARECHAL ET N.S. KRISHNAMURTHY (2006). A generalized 3-D geological and hydrogeological conceptual model of granite aquifers controlled by single or multiphase weathering. Hydrology J., 330, 260-284.
- [10] DJEUDA-TCHAPNGA, H.B., TANAWA, E., NGNIKAM, E. (2001). L'eau au Cameroun : Tome I : Approvisionnement en eau. Éd. Press. Univ.de Yaoundé, 356 p.
- [11] ESHTAWI, T., EVERIS, M., TISCHBEIN, B. (2016). Quantifying the impact of urban area expansion on groundwater recharge and surface runoff. Int Assoc Sci Hydrol Bull 61(5) :826–843.<https://doi.org/10.1080/02626667.2014.1000916>.
- [12] EWODO M. et al (2017). Caractérisation de la productivité des aquifères du socle de la Région de l'Extrême-Nord, Cameroun : JOURNAL OF THE CAMEROON ACADEMY OF SCIENCES vol. 14 No.1 (2017) ;
- [13] FEUMBA, R. (2005). Hydrogéologie en zone de socle cristallin : Cas du bassin versant de l'Ekozoa, secteur nord de la ville de Yaoundé – Cameroun. Mém. DEA. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 94p.
- [14] FREUBA, R. (2015). Hydrogéologie et évaluation de la vulnérabilité des nappes dans le bassin versant de Besseke (Douala Cameroun), Thèse de Doctorat/phD en Sciences de la Terre ;
- [15] GANDOLFI J.M., WYNS R. et DAMY P.C. (2010). Diagnostic des potentialités aquifères des formations de socle en région Mid-Pyrénées. Rapport BRGM/RP-58808-FR. 141p

- [16] JEBKALBE P. (2010). Les agriculteurs face aux enjeux de la conservation de l'environnement dans la région de l'Extrême-Nord du Cameroun. ISDA, Montpellier, 10p
- [17] KALLA-MPAKO, F. (2007). Caractérisation physique et hydrodynamique de l'aquifère à nappe libre du bassin versant de Ntem à Yaoundé Cameroun. Mém. DEA. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 99 p
- [18] MA, F.S., WEI, A.H., DENG, Q.H., ZHAO, H.J. (2014). Hydrochemical characteristics and the suitability of groundwater in the coastal region of Tangshan, China. *J Earth Sci* 25(06) :1067–1075. <https://doi.org/10.1007/s12583-014-0492-9>
- [19] MINEE-GWP, (2009). Plan d'Action National de Gestion Intégrée des Ressources en Eau : Etat des lieux du secteur de l'eau au Cameroun, p 213.
- [20] LACHASSAGNE P. et WYNNS R. (2005). Aquifères de socle : nouveaux concepts. Application à la prospection et la gestion de la ressource en eau. *Géosciences*, 2, 32-37.
- [21] OLIVRY, J.C. (1986). Fleuves et rivières du Cameroun. Monographies hydrologiques, MESRES/ORSTOM, n° 9, 733 p.
- [22] SAMIRA et SAÏD (2014). Hydrodynamique et minéralisation des eaux de la nappe plio-quaternaire du plateau TIMAHDITE-Alnus GUIGOU (Moyen Atlas, Maroc. European Scientific Journal July 2014 edition vol. 10, No.20 ISSN :1857(Print) C-ISSN 1857-7431.
- [23] SANDRA ARDOIN-BARDIN. (2004). Variabilité hydro-climatique et impacts sur les ressources en eau de grands bassins hydrographiques en zone soudano-sahélienne. *Hydrologie*. Université Montpellier II Sciences et Techniques du Languedoc.
- [24] SELVAM, S., Iruthayajeba Dhana Mala R., Muthukakshmi V. (2013). A hydrochemical analysis and evaluation of groundwater quality index in Thoothukudi district, Tamilnadu, South India. *Int J Adv Eng Appl* 2(3) :25–37.
- [25] TILLEMENT B. (1970) : Hydrogéologie du Nord Cameroun. *Bull. Dir. Mines et Géol.*, Cameroun.
- [26] WANG L., NIU H., CHEN R., SUN W., HUAI B., HAN C., ZHAO Y. (2023) - Different maximum precipitation altitudes and precipitation gradient characteristics of different basins in the Third Pole region. *Journal of hydrology*, vol. 626 (2023) 130343.
- [27] ZWIEBEL J. (2015) - Etude de l'impact orographique sur la structure microphysique horizontale et verticale des précipitations. Thèse de doctorat de l'Université Blaise Pascal – UFR Sciences et Technologie. 179p.