Desjardins Développement international

Baastel

ELLESadAPt

Projet d'adaptation aux changements climatiques des femmes dans les aires protégées au Congo et au Tchad (ELLESadAPt)

Diagnostic synthétique sur les caractéristiques des ressources en eau du Complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré (CAPBL) au Tchad

N° de commande AMC : 7454448 | N° de projet AMC : P011753

21 juillet 2024



En collaboration avec

NOÉ Congo et Tchad

En partenariat avec Canada

TABLE DES MATIÈRES

Page

1. INTRODUCTION 3
2. CADRE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE 4
   - 2.1. Localisation de la zone 4
   - 2.2. Contexte géologique 4
   - 2.3. Les caractéristiques pédologiques de la plaine 6
   - 2.4. Contexte hydrogéologique 6
   - 2.5. Contexte hydrologique 7
     - 2.5.1. Le Mayo-Kebbi 7
     - 2.5.2. Les Affluents du Mayo-Kebbi 8
     - 2.5.3. Les Lacs de la Région 8
   - 2.6. Dynamique des Écoulements et Érosion 8
3. DISPONIBILITE DES DONNEES SUR LA RESSOURCE EN EAU 8
   - 3.1. Inventaires des stations hydrométriques 8
4. CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES 9
5. CARACTERISATION CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE DES EAUX 11
   - 5.1. Mission de terrain et collecte de données 11
   - 5.2. Analyse des paramètres physico-chimiques 12
   - 5.3. Analyse des éléments chimiques 12
     - 5.3.1. Nitrate 12
     - 5.3.2. Fer 13
     - 5.3.3. Chlorure 13
     - 5.3.4. Potassium 13
   - 5.4. Indice de qualité de l'eau potable 14
   - 5.5. Indices de qualité de l'eau d'irrigation 15
   - 5.6. ANALYSE BACTÉRIOLOGIQUE 16
     - 5.6.1. Coliformes totaux 16
     - 5.6.2. Escherichia coli 16
     - 5.6.3. Coliformes fécaux 16
   - 5.7. USAGES DES RESSOURCES EN EAU 17
6. CONCLUSIONS 18
7. ANNEXES 21
   - 7.1. Références bibliographiques 21
   - 7.2. Points d'échantillonnage des eaux et paramètres in situ 23
   - 7.3. Résultats des analyses physicochimiques et bactériologiques des eaux 25
   - 7.4. Résultats sur l'évaluation sur la qualité des eaux 27
   - 7.5. Données sur les niveaux statistiques des nappes de la région du Mayo Kebbi 29

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 2. Les caractéristiques moyennes des lacs Léré, Tikem et Tréné (SDEA, 2004).....9
Tableau 3. Ressources en eau renouvelables des principaux aquifères (BRGM, 1987) 11
Tableau 4. Classification de la qualité de l'eau potable pour la consommation 14
Tableau 5. Classification de la qualité des eaux souterraines pour les sites étudiés sur la base de l'IQWI (Meireles, et al., 2010). 15

LISTE DES FIGURES

Figure 1. Carte de localisation de la zone de CAPBL (source : carte réalisée par A. Bodian, 2024).....4
Figure 2. Carte géologique du Mayo-Kebbi d'après Kasser (1995) 5
Figure 4. Points de mesure des niveaux statiques des forages et des puits 9
Figure 5.Variation des niveaux statiques des différents points d'eau.....10
Figure 6. Distribution spatiale des niveaux statiques de la zone CAPBL 10
Figure 7. Carte de points d'échantillonnage des eaux dans la zone du projet.....11
Figure 8. Répartition des paramètres physico-chimiques chimiques des eaux de la zone du CAPBL .12
Figure 9. Répartition des éléments chimiques des eaux de la zone de CAPBL 13
Figure 10. Distribution spatiale des Indices de Qualité de l'eau Potable (DWQI) 14
Figure 11.Carte de distribution de l'indice de l'eau pour l'irrigation (IWQI) de la zone du projet 16

LISTE DES ACRONYMES

AMC : Affaires mondiales Canada
BARES : Bureau Africain de Recherches, d'Études et de Stratégies
CAPBL : Complexe d'Aires Protégées de Binder Léré
CC : Changement Climatique
DID : Développement International Desjardins (DID)
TDR : Termes de Référence
OMD : Objectifs du Millénaire pour le développement
SDEA : Schéma Directeur de l'Eau et de L'Assainissement

1. INTRODUCTION

Le Tchad est divisé en plusieurs zones bioclimatiques, dont au nord se trouvent les zones désertiques (zone saharienne), steppe arbustive avec une ceinture semi-aride au centre et au sud, une zone de savane forestière plus fertile. Ces zones bioclimatiques sont en grande partie causées par les différences dans les précipitations annuelles, qui régissent également l'utilisation des terres par les hommes et l'abondance de la faune. La variété des habitats existant dans ce spectre de conditions climatiques a permis à l'origine d'abriter une richesse et une diversité d'oiseaux, de grands mammifères et d'autres vertébrés comparables à celles de la faune d'Afrique orientale et australe. Il est soumis à une pluviométrie variable avec une forte saisonnalité et des inégalités interannuelles. Le Tchad dispose d'importantes ressources en eau mais dont l'exploitation est limitée par un manque des connaissances sur ces ressources et l'absence d'une politique de l'eau. Aussi, en raison de ces besoins de développement, d'une pression démographique croissante estimée à 3,6% par an et des conditions climatiques de plus en plus difficiles, une gestion concertée des ressources hydriques est cruciale au Tchad.

Les lacs de Léré et Tréné sont situés à l'exutoire du bassin tchadien du Mayo Kebbi. La cuvette qui les retient comprend le lac de Tréné (7 km^2) à l'Est et le lac de Léré (40 km^2) à l'Ouest. Elle est traversée par le Mayo Kebbi qui rejoint la Bénoué. C'est une cuvette tectonique post - Mésozoïque où les lacs sont retenus en position d'angle de faille. Le réseau hydrographique qui l'alimente est organisé en trois sous – bassins versants à savoir El Dallah, El Ouaya et le Mayo Binder. En outre, le Mayo Kebbi alimente ces lacs qu'il traverse avant de rejoindre le bassin de la Bénoué au Cameroun. Le modelé de surface est dominé par des collines arrondies. C'est une cuvette qui subit l'influence des reliefs environnants dont les hauts plateaux et les inselbergs de Pala à l'Est, les monts Mandara au Nord-Nord-Est, le plateau de l'Adamaoua au Sud-Ouest et ses hauts sommets qui se prolongent jusqu'à Guider (Cameroun), à l'Ouest. Toutes ces données prédisposent l'écosystème lacustre à une menace des phénomènes d'érosion hydrique qui mobilisent d'importants matériels détritiques vers la cuvette.

Ces lacs constituent des écosystèmes uniques et sont menacés d'une dégradation grave et irréversible, due à une mauvaise gestion des ressources en eau, à l'épuisement progressif et au déclin de la fertilité des sols agricoles, à l'intensification de la production agricole et à l'empiètement des établissements humains sur les forêts naturelles, la dégradation des sols, la déforestation et le déclin des quantités et qualités des ressources en eau. La dégradation des écosystèmes entraîne des effets socioéconomiques de plus en plus évidents, à mesure que la productivité et la disponibilité des ressources diminuent. Ces lacs sont situés dans la réserve de faune de Binder-Léré, une des plus importantes aires protégées au Tchad (Beakgoubé, 2011). Ils sont alimentés par la rivière le Mayo-Kebbi couvrant une superficie d'environ 46,7 km^2.

Afin de répondre à ces enjeux socioéconomiques que la population riveraine rencontre dans la zone, le projet ELLESadAPt financé par Affaires Mondiales Canada est mis en exécution par un consortium formé de Baastel et Développement International Desjardins (DID) en collaboration avec l'association Noé. C'est ainsi, qu'une étude de diagnostique synthétique sur les caractéristiques des ressources en eau du Complexe d'Aires Protégées de Binder Léré (CAPBL) à partir des données et connaissances disponibles actuellement a été confiée au Bureau Africain de Recherche et d'Enseignement Scientifique (BARES). Les objectifs de cette étude sont les suivants :

- Réaliser un diagnostic synthétique de l'état des ressources en eau de surface et souterraine du CAPBL (qualité, quantité, disponibilité, accès, inventaires des ouvrages hydrauliques etc.);
- Effectuer un état des lieux (cartographie) des stations hydrologiques/hydrographiques disponibles dans la zone du CAPBL et des données historiques disponibles ;
- Réaliser un diagnostic synthétique des principaux effets des actions anthropiques (activités agricoles, prélèvement sur les ressources en eau, pollution, etc.) sur les ressources en eau du CAPBL ;
- Appuyer l'analyse de la vulnérabilité au changement climatique des ressources en eau du CAPBL :
  - Faire un état des lieux des méthodologies d'analyse de vulnérabilité climatique des ressources en eau réalisable pour la zone du CAPBL ;

- Appuyer l'Hydrologue International dans la réalisation de l'étude de vulnérabilité climatique des ressources en eau du CAPBL :
  - Facilitation de l'accès aux données ;
  - Collecte de données de terrain dans la zone du CAPBL.

2. CADRE GÉNÉRAL DE LA ZONE D'ÉTUDE

2.1. Localisation de la zone

Le Parc National de Zah-Soo, situé au sud-ouest du Tchad dans la province du Mayo-Kebbi Ouest, créé en mars 2022, est issu d'un processus de conversion de la zone cœur de la Réserve de Faune de Binder-Léré (RFBL) et sa périphérie (Nord, Sud-Est) en zones intégralement protégées. Le Complexe d'Aires Protégées de Binder-Léré (CAPBL) est constitué du Parc National de Zah Soo (PNZS) et de la Réserve de Faune de Binder-Léré (RFBL) se situe entre 9°30 et 9°50 de latitude Nord et 14°10 et 14°40 de longitude Est (Figure 1), le CAPBL couvre une superficie d'environ 1.715 km^2. Il s'étend à cheval entre 6 cantons à savoir : Binder, Léré, Guélo, Lagon, Gouin et Tikem.

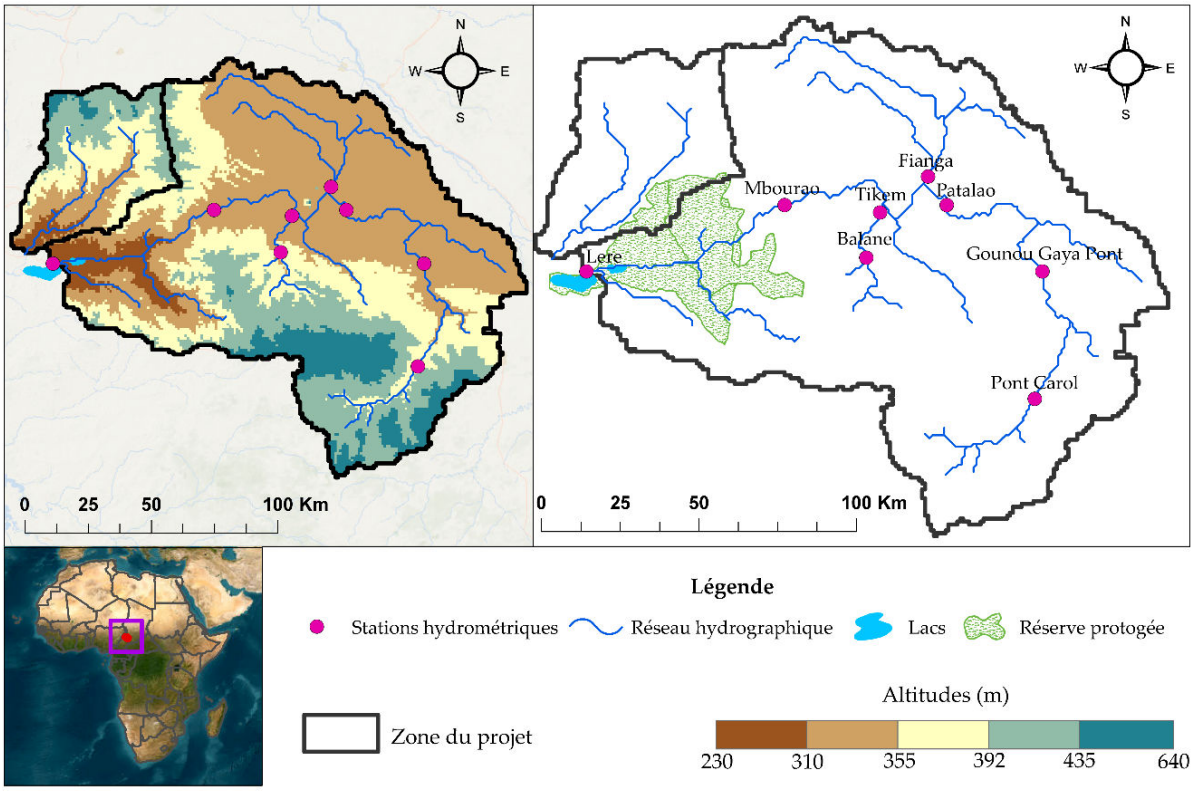


Figure 1. Carte de localisation de la zone de CAPBL (source : carte réalisée par A. Bodian, 2024)

2.2. Contexte géologique

La zone de Binder- Léré est caractérisée par une diversité de formations géologiques comprenant principalement des roches métamorphiques protérozoïques et des formations de couverture, incluant des sédiments, des formations volcano-sédimentaires, volcaniques et détritiques, ainsi que des formations superficielles ferrallitiques et des alluvions (Figure 2).

Les formations métamorphiques de la zone se subdivisent en plusieurs types lithologiques : des métavolcanites basiques et des métabrèches volcaniques, des méta-argilites, des méta-formations calcareuses et des amphibolites. Ces formations sont distinctes par leur composition minéralogique et leur degré de métamorphisme, avec une prépondérance de granitoïdes, de batholites et de granites. Parmi les séries notables figurent celles de Goueyegoudoum, de Gong Djalingo et de Zalbi. La série de Zalbi, en particulier, se compose principalement de roches vertes et de métasédiments et constitue la

formation géologique la plus importante de la zone, traversant le lac Léré du Nord au Sud. Des roches ultramafiques apparaissent parfois sous forme de petites collines de quelques centaines de mètres de longueur, affleurant aux contacts entre la série de Zalbi et la série amphibologneissique. La zone présente également des intrusions tectoniques accompagnées de groupes granitiques à affinité alcaline, de monzonites à orthopyroxène et de granodiorites contenant des enclaves d'amphibolites.

Les formations sédimentaires de couverture se rattachent à la série de Léré, s'étendant à l'ouest du lac Léré vers la piste reliant Léré et Figuil (Cameroun), et à la série de Lamé, située à l'ouest de Pala dans la région de Lamé. Au sud et au sud-est, ces formations sont recouvertes par des grès ferrugineux tertiaires, particulièrement présents dans la zone de Pala.

Enfin, les formations superficielles ferrallitiques et les alluvions, principalement constituées de latérites, dominent la partie sud-est de la zone de Léré-Binder. Elles se développent sur les formations métamorphiques ainsi que sur les terrains du Tertiaire et du Crétacé. Les alluvions, quant à elles, sont généralement composées de sables remaniés présents dans les lits des cours d'eau ou sous forme de sédiments détritiques dans les zones inondables pendant les crues. Ces alluvions sont particulièrement abondantes dans les rivières, notamment le Mayo-Binder et le Mayo-Ndeli.

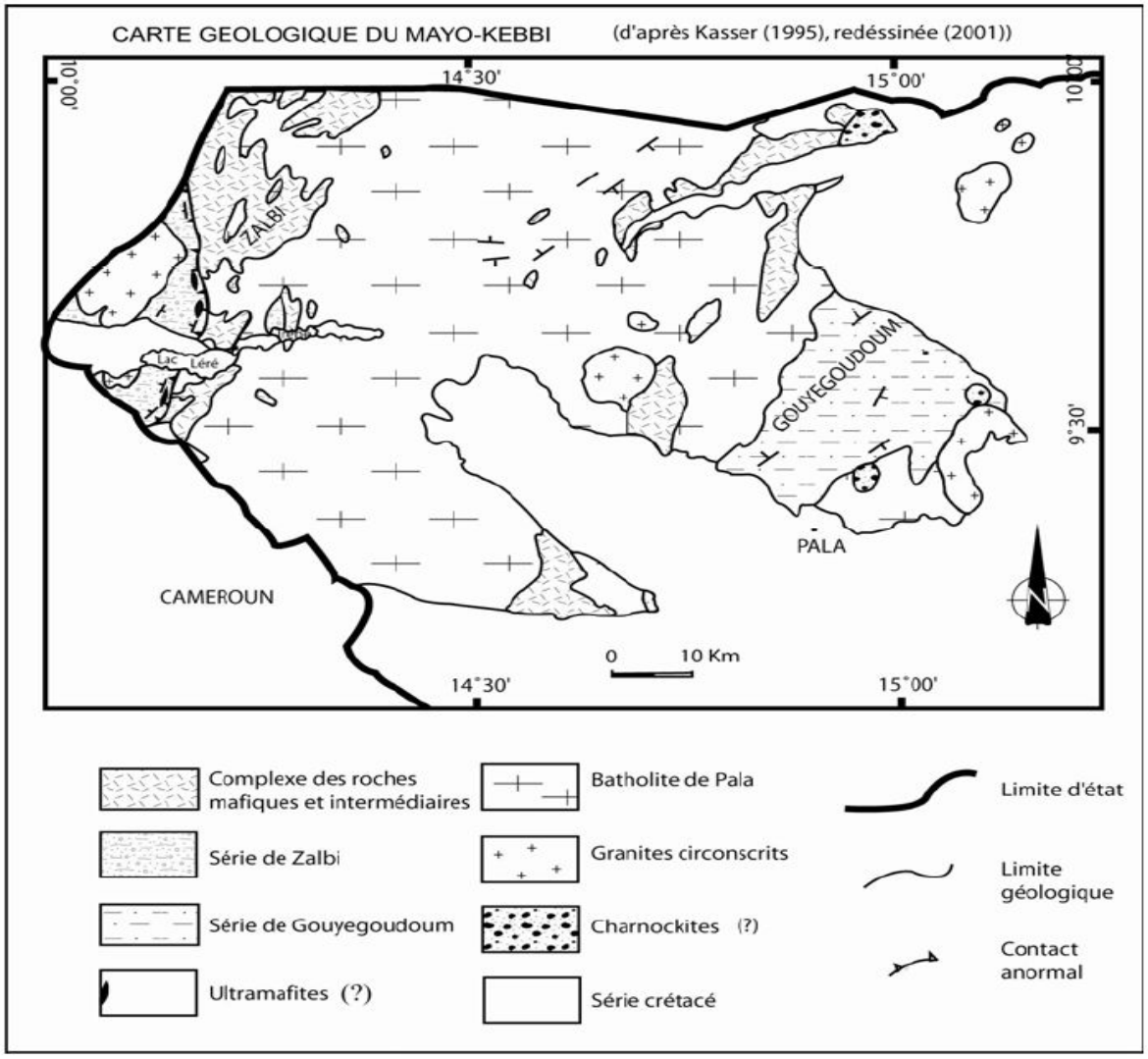


Figure 2. Carte géologique du Mayo-Kebbi d'après Kasser (1995)

2.3. Les caractéristiques pédologiques de la plaine

La pédologie de la plaine fluvio-lacustre de la zone de Binder-Léré comprend quatre (04) unités de sol distinctes chacune caractérisée par des propriétés spécifiques influençant la dynamique pédologique et l'utilisation des terres :

- **Vertisols hydromorphes :** Ces sols se forment sur des schistes argileux de la série de Léré et sur des alluvions argileuses récentes. Ils sont caractérisés par leur forte teneur en argile, ce qui les rend particulièrement sensibles à l'hydromorphie, créant des conditions de saturation en eau qui influencent la structure du sol et la croissance végétale.
- **Vertisols lithomorphes :** Ces formations pédologiques se développent sur des roches métamorphiques basiques ou sur des granites alcalins. Elles présentent une structure fine en surface et montrent des signes de pédogenèse initiale, avec des fissures caractéristiques des vertisols, qui se referment et s'ouvrent selon les cycles de mouillage et de dessèchement.
- **Sols peu évolués d'apport :** Cette unité regroupe trois catégories de sols :
  - **Sols sur arène** ou produits dérivés du schiste et de granodiorites : Ces sols proviennent de la dégradation mécanique des roches mères et sont peu développés.
  - **Sols sur alluvions argileux ou argileux-limoneux** : Ils se forment le long des cours d'eau, résultant de la sédimentation des matériaux transportés par les crues.
  - **Sols sur matériaux argileux-sableux** : Présents en bandes étroites le long des principaux cours d'eau, ces sols mélangent des fractions d'argile et de sable, offrant une texture variée.
- **Association des sols peu évolués d'érosion et des sols ferrugineux tropicaux :** Ces sols se développent sur des matériaux argilo-sableux et sont souvent accompagnés de cuirasse ou de fragments de cuirasse ferrugineuse peu profonds. Les sols ferrugineux tropicaux sont typiques des zones tropicales, avec une accumulation de fer qui forme des couches durcies, influençant la rétention d'eau et la fertilité.

Le triangle Pala-Tikem-Léré présente des caractéristiques pédologiques supplémentaires, notamment:

- Cailloux quartzeux : Abondants en de nombreux endroits, ces cailloux se retrouvent dans les profils de sols formés postérieurement, souvent surplombant la cuirasse ferrugineuse. Ils indiquent des épisodes d'érosion et de dépôt, modifiant la structure et la fertilité des sols.
- Argiles à nodules calcaires et zones limoneuses : Ces sols sont dominés par une végétation graminéenne, profitant des propriétés de rétention d'eau et de nutriments des argiles et limons. Les inondations saisonnières (1 à 1,5 mètre d'eau) enrichissent ces sols en matière organique et minéraux.
- Buttes exondées : Ces zones surélevées, où se situent les villages, sont occupées par des sols beiges hydromorphes, adaptés à une hydrologie fluctuante avec une bonne capacité de drainage et une fertilité suffisante pour l'agriculture.

2.4. Contexte hydrogéologique

La zone de Binder-Léré présente un contexte hydrogéologique varié, influencé par la diversité des formations géologiques présentes. On distingue principalement trois types de formations géologiques susceptibles de renfermer des aquifères aux caractéristiques différentes.

- ❑ **Roches du Socle Précambrien**

Lithologie : La zone située à l'ouest de la ligne Fianga-Pala est composée de formations précambriennes comprenant des granitoïdes, des roches métamorphiques (quartzites, schistes divers) et des roches basiques et ultrabasiques.
Aquifères : Les eaux souterraines dans ces roches sont localisées dans les altérites et les zones de fracture. La profondeur du niveau statique des nappes dépend de l'épaisseur des altérites. Ces aquifères présentent généralement des débits modérés, souvent influencés par la pluviométrie.

- **Formations Sédimentaires du Continental Terminal**

Les aquifères se situent dans les couches les plus perméables de ces formations. Dans la région, les profondeurs des nappes et les niveaux statiques sont modérés, avec des débits souvent importants et localement intéressants. Ces formations assurent une bonne productivité des forages grâce à leur perméabilité.

- **Formations du Crétacé**

Données disponibles : Les données hydrogéologiques disponibles sur ces bassins proviennent principalement des études d'inventaire et des équipements hydrauliques régionaux. Les aquifères de ces formations sont moins bien connus, mais peuvent être importants en fonction des bassins d'alimentation et de la lithologie.

Profondeur et Débit : À Pala, les formations crétacées reposent à 200 m de profondeur sur le socle éruptif. Les forages montrent une productivité variable, avec des débits qui peuvent atteindre 29 m³/h.m dans certains puits, bien que la productivité moyenne soit généralement inférieure (0,4 à 0,07 m³/h.m).

- **Nappes Phréatiques**

Les nappes phréatiques de la région sont principalement alimentées par les précipitations, avec une infiltration rapide due aux caractéristiques pédologiques locales. Cependant, la disponibilité de l'eau potable reste un défi majeur :

- **Profondeur des puits :** Les puits modernes, réalisés par des projets comme le PRODALKA[1] et PAEPA-CS[2], ont une profondeur moyenne de 22 m. En saison sèche, ces puits tarissent souvent, obligeant la population à creuser des puisards dans des mayo, dont la profondeur varie entre 6 et 10 m.
- **Variabilité de la nappe :** La nappe phréatique est très profonde au nord de la zone, atteignant 40 à 50 mètres, tandis qu'au sud, elle est plus superficielle, souvent à moins de 10 mètres de profondeur. La salinité de l'eau constitue un problème majeur, affectant sa qualité. Sa forte teneur en salinité pourrait s'expliquer soit par rapport à la nature géologiques des roches réservoirs et traversées soit ces eaux sont affectées par une forte évaporation.
  D'une manière générale, la région de Binder-Léré présente une hydrogéologie complexe avec des nappes d'une profondeur modeste, un niveau statique moyen de 9 mètres et des forages atteignant généralement 16 mètres.

2.5. Contexte hydrologique

La région de Binder-Léré, située dans la portion tchadienne du bassin du Niger, est caractérisée par un réseau hydrographique bien structuré, dominé par le cours d'eau principal, le Mayo-Kebbi, ses affluents et de multiples lacs. Le réseau hydrographique de cette zone présente plusieurs spécificités importantes pour comprendre la dynamique de l'eau dans cette région.

2.5.1. Le Mayo-Kebbi

Le Mayo-Kebbi est le cours d'eau principal de la région, s'étendant sur environ 200 km. Il constitue le principal affluent de la rive droite de la Bénoué au Cameroun. Son bassin versant est profondément ancré dans les flancs ouest du bassin tchadien, formant un lien hydrologique essentiel entre les bassins du Tchad et du Niger. Le Mayo-Kebbi est alimenté par les crues du Logone et de la Tandjilé, notamment lors des périodes de forte hydraulicité. Ces déversements se produisent principalement en deux endroits : À Éré et au seuil de Dana, lorsque le niveau d'eau atteint certains seuils critiques.

[1] Projet d'alimentation en eau potable et d'assainissement de huit centres secondaires et des zones rurales environnantes (PAEPA-CS) - EER Février 2019 (https://www.afdb.org/fr/documents/tchad-projet-dalimentation-en-eau-potable-et-dassainissement-de-huit-centres-secondaires-et-des-zones-rurales-environnantes-paepa-cs-eer-fevrier-2019)

[2] Programme de développement décentralisé du Mayo-Dallah, du lac Léré du Mont d'Illi et de la Kabbia (https://theses.hal.science/tel-01616194/)

Historiquement, le Mayo-Kebbi était un cours d'eau permanent, mais depuis 1970, il est devenu temporaire, se transformant en une série de marécages et de lacs tels que Youé, Toubouri, Tréné, et Léré. Ces lacs et dépressions contribuent à la formation d'un lit de rivière large, encombré d'une épaisse couche d'alluvions, qui s'écoule vers l'ouest. Après Mbourao, le Mayo-Kebbi traverse une zone rocheuse marquée par des rapides et des cascades, notamment les Chutes Gauthiot avec un dénivelé de 45 m.

2.5.2. Les Affluents du Mayo-Kebbi

Les affluents du Mayo-Kebbi, bien que moins nombreux et principalement constitués de torrents temporaires, jouent un rôle crucial dans le réseau hydrographique. Les affluents principaux incluent la rivière Loka et la Kabbia. La Kabbia, longue de 162 km, prend naissance en amont de Pont-Carol et coule dans un lit encaissé avant d'alimenter les lacs de Fianga et Tikem, puis se jette dans le Mayo-Sokoye. D'autres affluents notables incluent le Mayo-El-Ouya, le Mayo-Dallah, le Lel Mandji, le Mayo-Degné, et le Lel Zétao.

2.5.3. Les Lacs de la Région

La zone de Binder-Léré abrite plusieurs lacs significatifs, notamment le lac Léré (41 km²), le lac Tréné (7 km²i), ainsi que le groupe des lacs Toupouri incluant le lac Tikem (17 km²), le lac Youé (18 km²), et le lac Fianga (16 km²). Ces lacs jouent un rôle crucial dans le réseau hydrographique en servant de réservoirs naturels. Les lacs de Léré, situés à l'exutoire du bassin tchadien du Mayo-Kebbi, sont particulièrement importants. Ces lacs, logés dans une cuvette tectonique post-Mésozoïque, sont alimentés par le Mayo-Kebbi, qui traverse la région avant de rejoindre la Bénoué au Cameroun.

2.6. Dynamique des Écoulements et Érosion

Les écoulements dans les cours d'eau et les bas-fonds de la région sont alimentés par le ruissellement des eaux de pluie sur les bassins versants et par les déversements des crues des lacs ou des cours d'eau supérieurs. Les vastes plaines argileuses de la Kabbia et les vallées des collines de Pala et des montagnes de Léré et Binder abritent des mares naturelles qui s'inondent pendant la saison des pluies.

Le socle précambrien dominant de la région, combiné à un réseau hydrographique dense, favorise un ruissellement de type aréolaire, entraînant une érosion hydrique significative. Les matériaux géologiques fragiles tels que les marnes, schistes, micaschistes, conglomérats et grès sont particulièrement susceptibles à l'érosion. Cette érosion contribue à l'accumulation d'alluvions sableuses et colluvions dans les embouchures, réduisant progressivement la taille des lacs et encombrant leurs tributaires principaux de sable.

3. DISPONIBILITE DES DONNEES SUR LA RESSOURCE EN EAU

3.1. Inventaires des stations hydrométriques

Les stations hydrométriques installées dans le bassin versant du Mayo Kebbi sont constituées de :

- Gounou-Gaya;
- Pont-Carol ;
- Fianga ;
- Tikem ;
- Mbourao ;
- Balané ;
- Patalao sur la Kabbia ;
- Foulmbaré ;
- Zalbi ;
- Lac Léré.

Ces stations sont équipées des échelles limnimétriques. Certaines de ces stations sont renforcées par des appareils enregistreurs de niveau d'eau. Les données mesurées à ces stations sont les hauteurs d'eau et les débits de ces cours d'eau. Le fonctionnement du réseau pose problème à cause de l'insuffisance et parfois de manque de moyens alloués.

Il n'y a aucune des stations qui possède de mesure des débits solides, entrainant donc la méconnaissance totale en la matière.

Tableau 1. Caractéristiques des stations hydrométriques du bassin du Mayo Kebbi

Nom de station	X	Y	Alt(m)	Type de données	Période couverte
LERE	14.20	9.65	228,26	Hauteur	1950-2011
MBOURAO	14.78	9.83	318,68	Hauteur	1964-2023
TIKEM	15.05	9.82	319,68		
FIANGA	15.18	9.93	320,11		
PATALAO	15.27	9.85	322,64		
PONT CAROL	15.50	9.28			
GOUNOU GAYA PONT	15.52	9.65			
BALANE	15.01	9.69			
ZALBI	14.11377	9.68308		Hauteur	2008-2019

Tableau 2. Les caractéristiques moyennes des lacs Léré, Tikem et Tréné (SDEA, 2004)

Lacs	Superficie (Km^2)	Profondeur (m)	Volume (millions m^3)
Lac Léré	41	4	164
Lac Tikem	16,8	7	118
Lac Tréné	10		

4. CARACTERISATION DE LA DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES

La collecte de données bibliographiques a permis d'obtenir 23 données des niveaux stations mesurés dans les différents points d'eau dans la zone du projet (Figure 3).

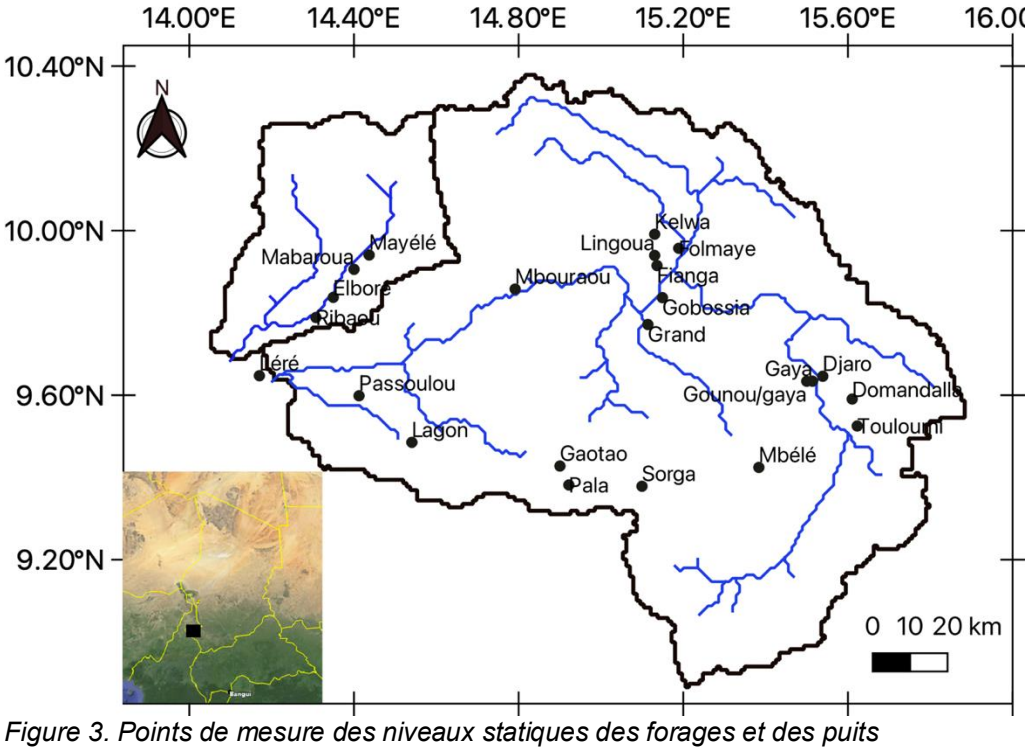


Figure 3. Points de mesure des niveaux statiques des forages et des puits

Les figures ci-dessous (Figures 4 et 5) montrent les niveaux statiques de l'eau des différents points. L'analyse de la figure 4 montre que les profondeurs des eaux sont très variables d'un point à un autre. La valeur la plus faible est de 3,56 m et le point le plus profond est de 16,89 m avec une moyenne de 9,45 m. Cette répartition est très hétérogène sur l'ensemble de la zone.

À cause de leurs faibles profondeurs, ces puits et forages seraient en interconnexion avec les précipitations. Les précipitations peuvent participer à la recharge de la nappe par contre la température peut influencer sur la reprise évaporatoire. Toute évolution climatique pourrait avoir un impact sur la recharge ou sur la reprise évaporatoire.

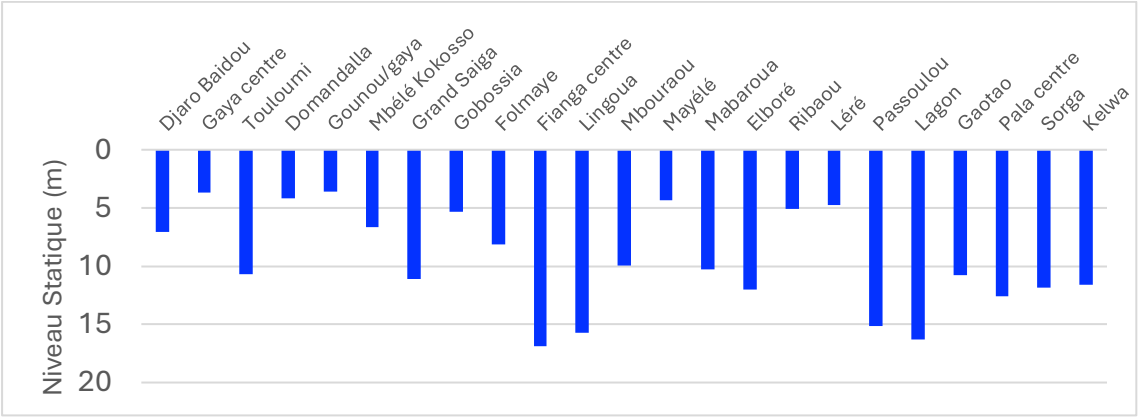


Figure 4.Variation des niveaux statiques des différents points d'eau

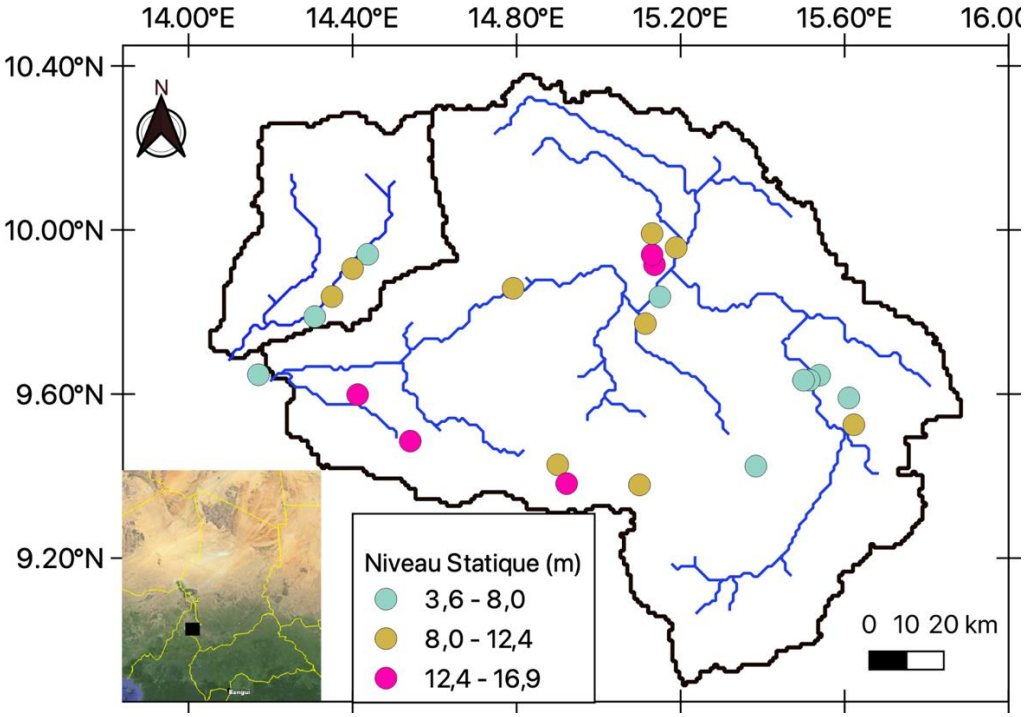


Figure 5. Distribution spatiale des niveaux statiques de la zone CAPBL

Le tableau ci-dessous (Tableau 3) présente les ressources en eau renouvelables des principaux aquifères régionaux selon le Bureau de Recherches Géologiques et Minières (BRGM) (1987).

Tableau 3. Ressources en eau renouvelables des principaux aquifères (BRGM, 1987)

Formations aquifères	Ressources renouvelables (mm/an)	Superficie (km^2)	Volume ressources renouvelable (milliard m3/an)	Lame d'eau infiltrée moyenne théorique équivalente (mm/an)
Plio Quaternaire	0 à 100	235000	3,5	15
Continental Terminal sud	25 à 150	145000	12,0	83
Continental Terminal nord	0 à 25	130000	0	0
Socle cristallin			3,7	55
Total			19,2	

5. CARACTERISATION CHIMIQUE ET BACTERIOLOGIQUE DES EAUX

5.1. Mission de terrain et collecte de données

Dans le cadre de cette étude, une mission de terrain a été effectuée du 09 au 14 juin 2024 au sein du CAPBL. L'objectif principal de la mission était de collecter de données nécessaires sur les ressources en eau souterraines et de surface afin de faire un état de connaissance et de caractérisation de la ressource en eau de la zone. Sur le terrain les activités suivantes ont été réalisées :

- Mesure in situ des paramètres physico-chimiques et échantillonnages des eaux de surface et des eaux souterraines. C'est ainsi que 21 points d'eau ont été échantillonnés (Lac, Rivière, Puits et Forage) (Figure 6). A chaque point d'eau, les paramètres physico-chimiques tels que le pH, la Température, la conductivité électrique et l'oxygène dissous ont été mesurés in situ à l'aide d'un instrument multi-paramètre HACH et ramenées à une température standard de 25°C. Les incertitudes des mesures de pH sont de l'ordre de 0,1 unité, celles de la conductivité électrique de 10 µS/cm et celles de la température de 0,5°C.
- Des échantillons d'eau ont été prélevés pour les analyses chimiques élémentaires (Ca^{2+}, Mg^{2+}, Na^{+}, K^{+}, Cl^{-}, SO_4^{2-}, NO_3^{-}, Fe^{2+}, PO_4^{3-}, HCO_4^{-}) et bactériologiques en laboratoire. Les analyses ont été effectuées au Laboratoire HydroGéosciences de l'Université de N'Djaména.
- Visite de quelques sites hydrométriques et des cours d'eau et lacs ;
- Une enquête sur les usages de l'eau à travers une fiche préalablement établit. Au total 23 fiches d'enquêtes ont été renseignées dans les différentes sites reparties de manière aléatoire dans la zone du projet.

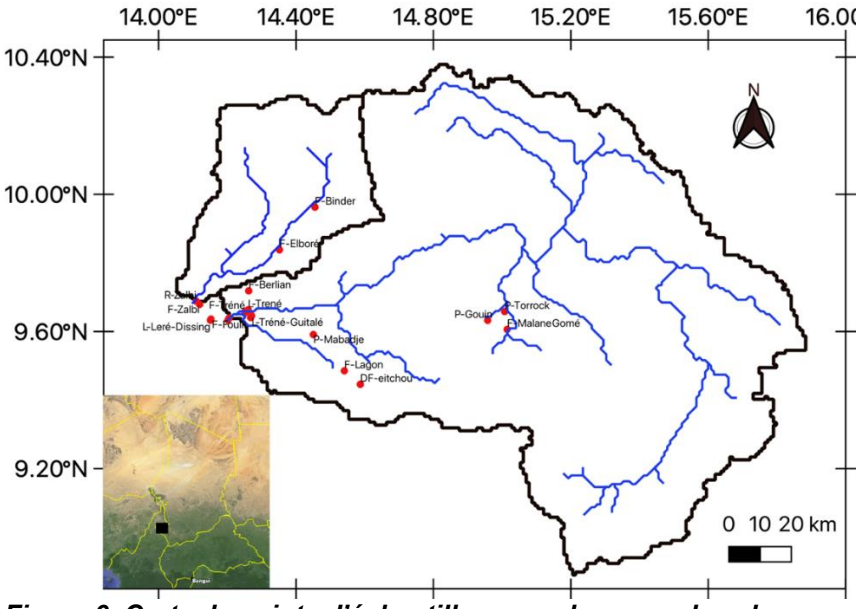


Figure 6. Carte de points d'échantillonnage des eaux dans la zone du projet

5.2. Analyse des paramètres physico-chimiques

Le **pH** des eaux étudiées varie entre 6,65 à 8,44 avec une moyenne de 7,22 (Figure 7a). Ces valeurs de pH obtenues indiquent que ces eaux sont neutres. Elles sont dans les normes de l'Organisation mondiale de la santé (OMS) (6,5 - 9).
Les **températures** des eaux échantillonnées varient entre 27,5°C à 31,6°C avec une moyenne de 29,65°C (Figure 7b). Ces valeurs sont proches de la température moyenne atmosphérique de la zone d'étude environ 33°C (ANAM, 2022) indiquant un équilibre thermique entre l'aquifère et l'atmosphère. Il est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet, celle-ci joue un rôle dans la solubilité des sels et surtout des gaz, dans la dissociation des sels dissous donc sur la conductivité électrique, dans la détermination du pH et pour la connaissance de l'origine de l'eau et des mélanges éventuels.

Les valeurs de la **conductivité électriques** des eaux oscillent entre 94 µs/cm à 1988 µs/cm avec une moyenne de 608 µs/cm (Figure 7c). Ces eaux sont très variables. La majorité des eaux sont peu minéralisées car la conductivité électrique est inférieure à la norme de l'OMS (OMS, 2011= 1500 µs/cm).

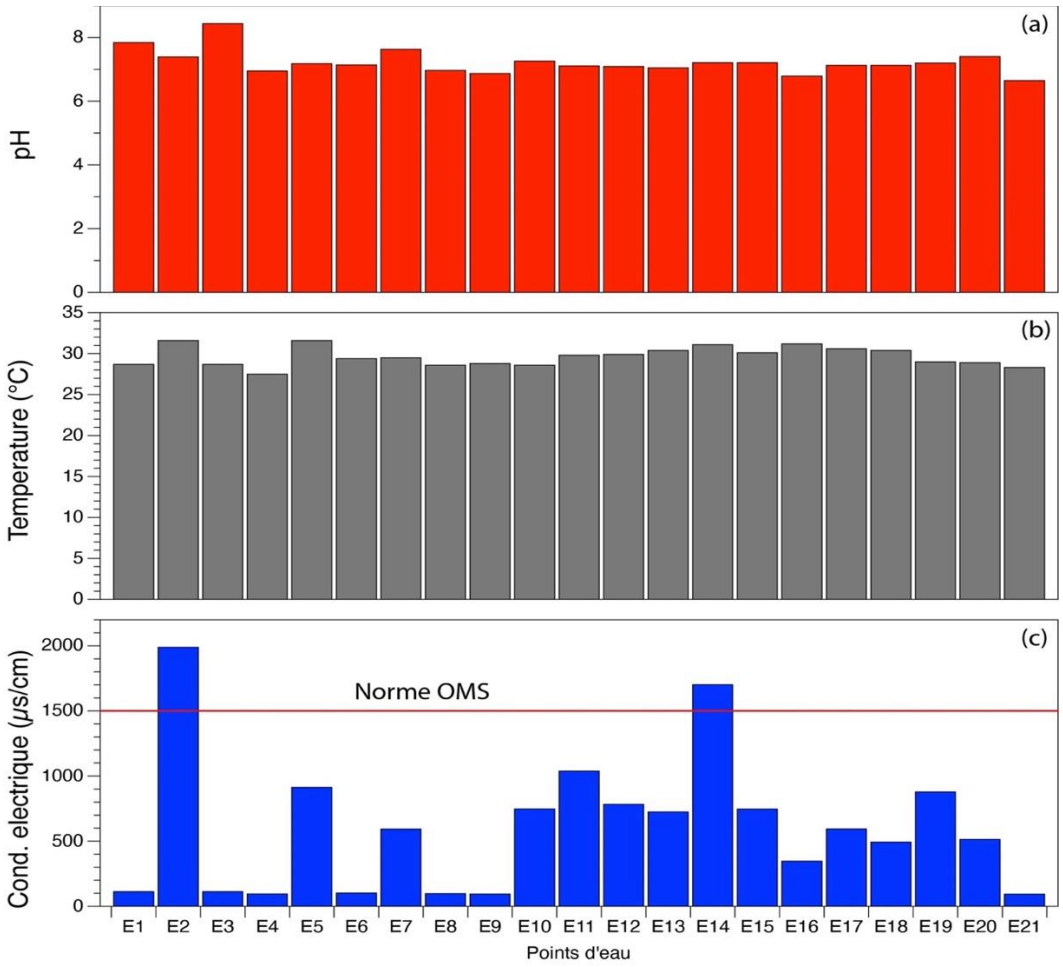


Figure 7. Répartition des paramètres physico-chimiques chimiques des eaux de la zone du CAPBL

5.3. Analyse des éléments chimiques

5.3.1. Nitrate

Pour les eaux étudiées, les teneurs de nitrate varient de 0,1 mg/L à 220 mg/L avec une moyenne de 21 mg/L. Les teneurs en nitrates sont très variables dans les eaux de la zone (Figure 8a). La majorité des valeurs sont inférieures à la norme de l'OMS (50 mg/L) à l'exception de deux points (E6 et E9).

5.3.2. Fer

Très largement utilisé sous forme d'acier dans le domaine de la construction, le fer est un métal qui est très abondant dans la croûte terrestre, principalement dans les roches ignées comme les amphiboles et les pyroxènes. Le fer dans l'eau ne présente certes aucun inconvénient du point de vue physiologique, mais à des teneurs très importantes, il influe sur la qualité organoleptique de l'eau (mauvais goût, couleur et saveur) (Rodier, 1996). Les teneurs en fer des eaux échantillonnées varient entre 0 mg/L à 8,97 mg/L avec une moyenne de 1,7 mg/L (Figure 8b). La plupart des eaux analysées ont des valeurs qui sont inférieures aux valeurs guides de potabilité de l'OMS pour une consommation humaine (0,3 mg/L).

5.3.3. Chlorure

Le chlore, est presque toujours présent dans l'eau avec des proportions variables, son origine est liée principalement à la dissolution de l'halite (NaCl) et des évaporites qui sont présents particulièrement dans les intercalations marneuses ou peut être à l'utilisation des engrais agricoles. Les teneurs dans les eaux étudiées varient de 11 mg/L à 122 mg/L avec une moyenne de 48 mg/L ((Figure 8c)). Lorsque la teneur en ion chlorure est élevée dans une eau au-dessus de la norme fixée par l'OMS (50 mg/L), cette eau est déclarée non potable car les ions chlorures sont des indicateurs de la pollution.

5.3.4. Potassium

La teneur en potassium est variable et faible pour les eaux analysées avec une valeur moyenne de (3,4 mg/l). Toutes ces valeurs sont inférieures à la norme de l'OMS qui est de 12 mg/L (Figure 8d).

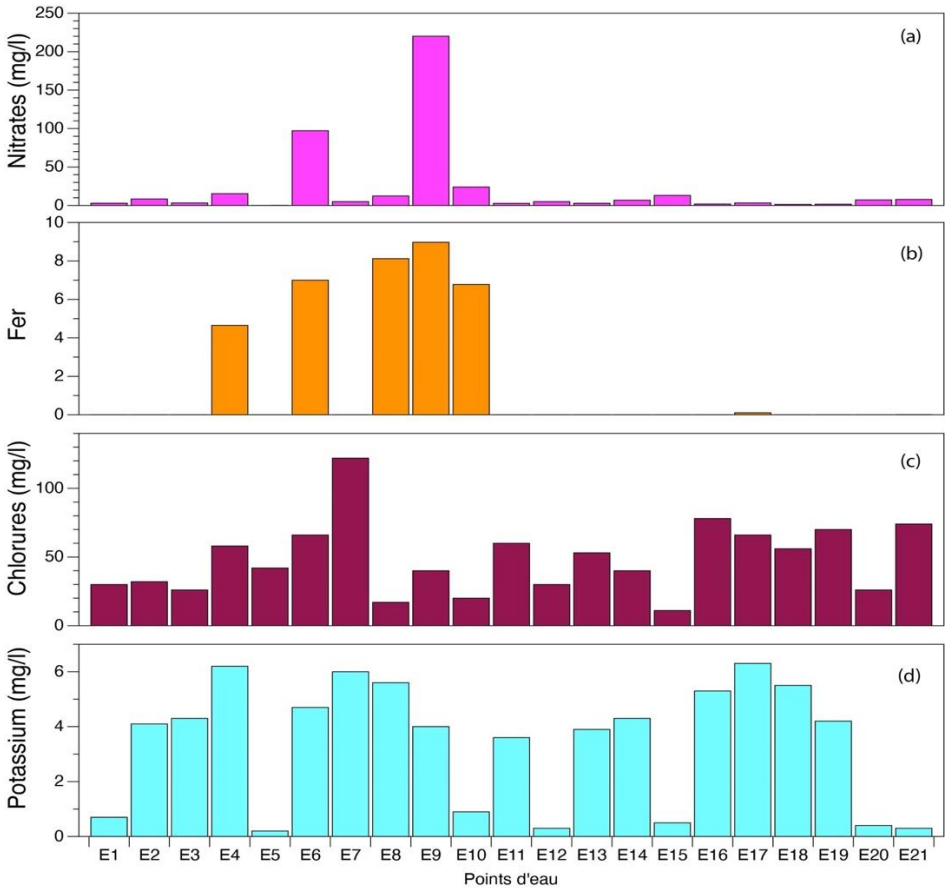


Figure 8. Répartition des éléments chimiques des eaux de la zone de CAPBL

5.4. Indice de qualité de l'eau potable

La qualité des eaux souterraines à des fins de consommation est évaluée à l'aide de l'indice de qualité de l'eau potable (DWQI). Le DWQI a été déterminé avec 10 propriétés de qualité de l'eau différentes (pH, Na^+, K^+, Cl^-, TDS, Mg^{2+}, SO_4^{2-}, Ca^{2+}, HCO_3^- et NO_3^-) en utilisant les normes de l'OMS. L'indice a été calculé en attribuant des poids (w) aux paramètres de qualité de l'eau (i) en fonction de leur menace perçue pour la qualité de l'eau. Ceci est obtenu en traduisant les concentrations des constituants en une valeur unique qui reflète l'influence composite des paramètres de qualité de l'eau (OMS, 2007; Ramakrishnaiah et *al*., 2009; Vasanthavigar et *al*., 2010; Sener, Sener et Davraz, 2017 et Verma et *al*., 2020). Le tableau ci-dessous (Tableau 4) montre la classification de la qualité de l'eau potable.

Tableau 4. Classification de la qualité de l'eau potable pour la consommation

DWQI	Pourcentage de points d'eau	Types d'eau
< 50	95%	Excellent
50 - 100	5%	Bien
100 - 200	0%	Médiocre
200 - 300	0%	Très médiocre
> 300	0%	Inadapté

L'indice de qualité de l'eau potable (DWQI) est utilisé pour mesurer la qualité de l'eau potable. Les valeurs DWQI variaient de 21 à 66 avec une valeur moyenne de 32. Les résultats DWQI ont montré que 95% des eaux de la zone étaient dans la catégorie excellente, 5% classées comme bonnes (Tableau 2). Un phénomène important affectant les eaux souterraines et de surface de la zone Binder-Léré. Il s'agit de la forte empreinte anthropique observée dans tout le bassin. Les concentrations de nitrates peuvent être extrêmement élevées dans certains puits et forages, notamment dans les zones les plus densément peuplées. La carte ci-contre présente la distribution spatiale des valeurs d'indice de la qualité de l'eau potable de la zone (Figure 9).

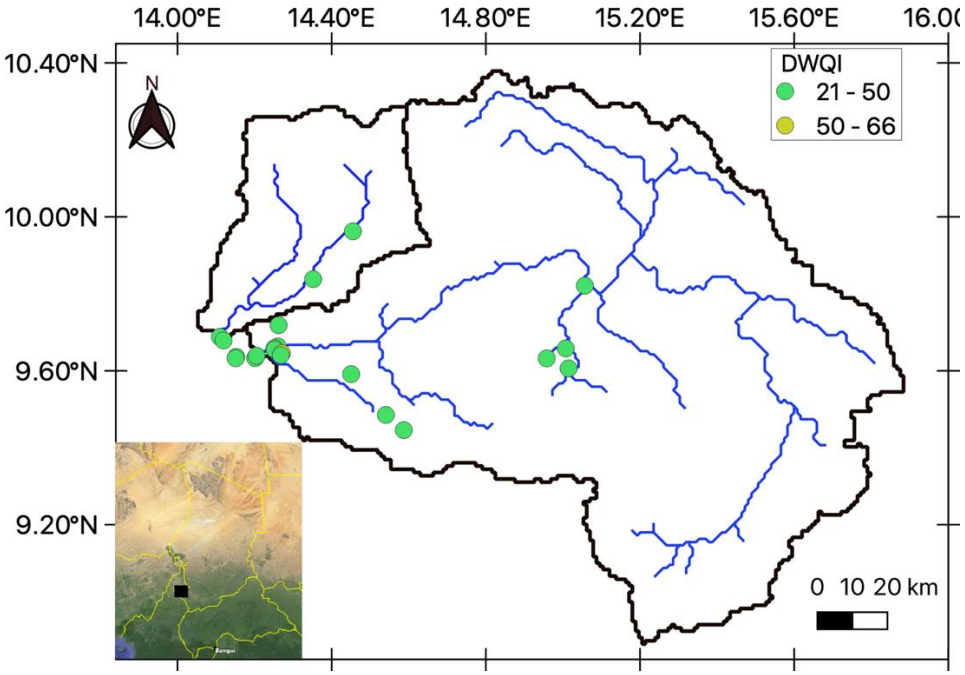


Figure 9. Distribution spatiale des Indices de Qualité de l'eau Potable (DWQI)

5.5. Indices de qualité de l'eau d'irrigation

De nombreuses méthodes sont fréquemment utilisées pour évaluer l'adéquation de la qualité de l'eau pour l'irrigation. Pour cette étude, l'indice de qualité des eaux d'irrigation (IWQI) a été calculé sur la base des cinq paramètres de qualité de l'eau suivants (Meireles et al., 2010) : la conductivité électrique (EC), le rapport d'adsorption du sodium (SAR), la concentration en ions sodium (Na^+), la concentration en ions chlorure (Cl-) et la concentration en ions bicarbonate (HCO3-). La méthodologie utilisée est celles de Wilcox (1955), Lesch et Suarez (2009), Meireles et al. (2010) et Makbule et al. (2021). Le tableau ci-dessous (Tableau 5) présente la classification de la qualité de l'eau pour l'irrigation du secteur d'étude.

Tableau 5. Classification de la qualité des eaux souterraines pour les sites étudiés sur la base de l'IQWI (Meireles, et al., 2010).

WQI	Pourcentage de points d'eau	Recommandation	
		Sol	Plante
85 ≤ 100	19%	Peut être utilisé pour la majorité des sols ayant une faible probabilité de causer des problèmes de salinité et de sodicité, en recommandant le lessivage dans le cadre des pratiques d'irrigation, sauf pour les sols extrêmement peu perméables.	Pas de risque de toxicité pour la plupart des plantes
70 ≤ 85	71%	Recommandé pour les sols irrigués à texture légère ou à perméabilité modérée, étant donné que le lessivage des sels est recommandé. La sodicité du sol peut se produire dans les sols à texture lourde, et il est recommandé d'éviter son utilisation dans les sols à forte teneur en argile 2:1.	Éviter les plantes sensibles à la salinité
55 ≤ 70	10%	Peut être utilisé dans des sols avec des valeurs de perméabilité modérées à élevées, étant donné que l'on suggère un lessivage modéré des sels.	Les plantes présentant une tolérance modérée aux sels peuvent être cultivées

L'indice de qualité de l'eau d'irrigation (IWQI) a été utilisé pour évaluer l'aptitude des eaux souterraines à l'irrigation. L'IWQI a été calculé à l'aide des paramètres suivants : EC, Na^+, Cl^-, HCO_3^- et SAR. Il a été considéré comme l'un des instruments les plus efficaces pour évaluer la qualité de l'eau d'irrigation par les décideurs politiques (Adimalla et al., 2018).

Meireles et al. (2010) ont proposé une classification claire de la qualité de l'eau d'irrigation basée sur son impact sur le sol irrigué et sa toxicité pour les plantes. L'IWQI a été classé en cinq catégories (Tableau 5), à savoir (Meireles et al., 2010).:

- aucune restriction (IWQI = 85-100) ;
- faible restriction (IWQI = 70-85) ;
- restriction modérée (IWQI = 55-70) ;
- restriction élevée (IWQI = 40). -55) ;
- restriction sévère (IWQI = 0 - 40).

Les résultats IWQI du présent travail indiquent (Tableau 12) que :

- 10% des points d'eau étaient dans la classe élevée qui limite l'utilisation de l'eau d'irrigation pour les plantes à tolérance modérée à élever au sel dans des sols perméables sans couches compactées ;
- 71% des points d'eau étaient dans la classe de restriction faible qui recommande d'éviter les plantes sensibles au sel et de prendre en compte la texture du sol irrigué, des problèmes de perméabilité et de sodicité ;
- 19 % étaient dans la classe sans restriction (Figure 10).

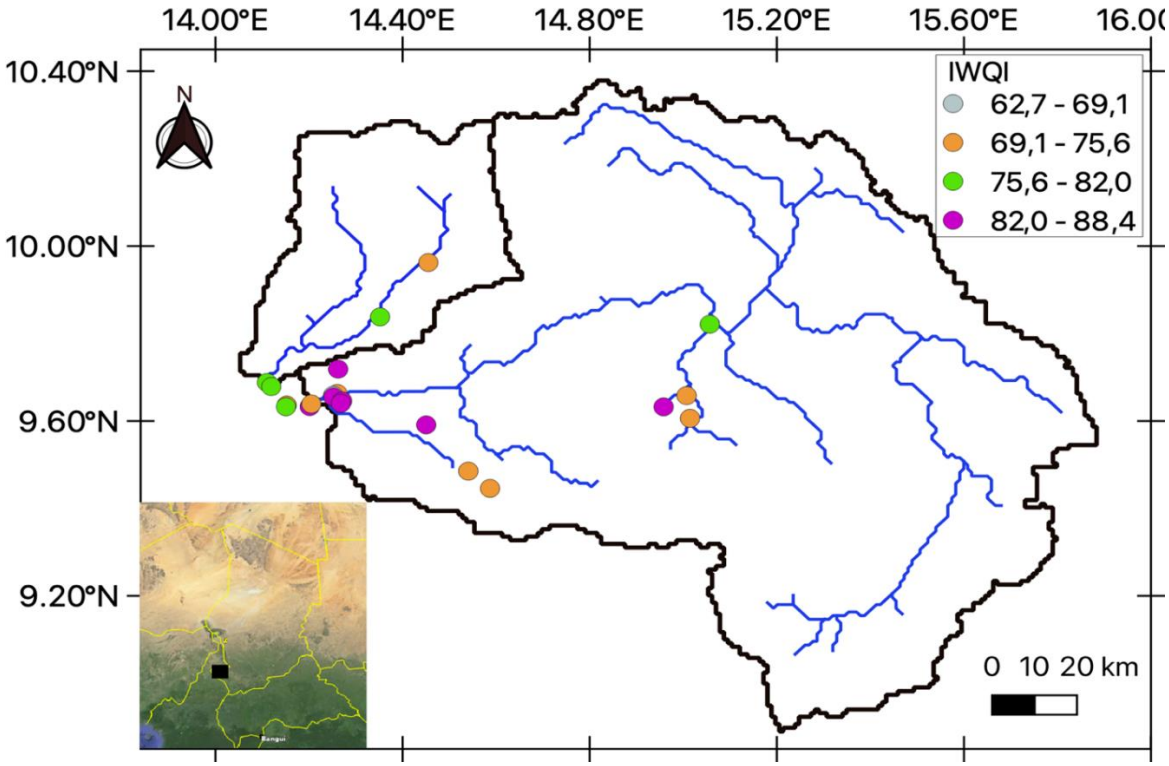


Figure 10.Carte de distribution de l'indice de l'eau pour l'irrigation (IWQI) de la zone du projet

5.6. ANALYSE BACTÉRIOLOGIQUE

5.6.1. Coliformes totaux

La teneur de coliformes totaux dans les eaux souterraines et des eaux de surface de la zone d'étude est variable. Quinze (15/21) des échantillons contiennent de ces germes soit 71% (Tableau 5). Conformément à la norme de l'OMS, ces eaux ont des teneurs en coliformes totaux élevées (> 100) à celles de l'OMS (0 UFC/100 ml).

5.6.2. Escherichia coli

E. coli est le seul membre du groupe des coliformes totaux que l'on trouve exclusivement dans les matières fécales ; on trouve les autres membres du groupe dans l'eau, le sol et la végétation. L'absence E. coli est constatée dans les eaux étudiées à l'exception du forage de Foulli (Tableau 5).

5.6.3. Coliformes fécaux

Les Coliformes fécaux sont des bactéries Gram positif qui se présentent sous forme de diplocoques ou coques en chainettes. Ils sont anaérobies facultatifs, immobiles et dépourvus de capsule. Cette famille englobe une trentaine d'espèce qui a longtemps été classées dans le genre des streptocoques au vu de leurs similitudes avec les streptocoques du groupe D. Dans les eaux étudiées, la plupart de points d'eau contiennent Coliformes fécaux avec un taux supérieur à 100 (Tableau 6).

Tableau 6. Résultats des analyses bactériologiques des eaux étudiées

N°	Village	Code	Types	Coliformes Fécaux (100 ml)	Coliformes totaux (100 ml)	E. Coli
1	**Lac Leré (Foulli)**	E1	Eau de surface	>100	0	0
2	**Dissing**	E2	Forage	>100	>100	0
3	**Lac Dissing**	E3	Eau de surface	>100	>100	0
4	**Rivière Zalbi**	E4	Eau de surface	>100	0	0
5	**Forage Zalbi**	E5	Forage	>100	>100	0
6	**Lac Trené**	E6	Eau de surface	>100	>100	0
7	**Forage Tréné**	E7	Forage	0	>100	0
8	**R. Mayo Kebbi**	E8	Rivière	>100	>100	0
9	**Lac Tréné (Guitalé)**	E9	Eau de surface	>100	>100	0
10	**Puits Guitalé**	E10	Puits	>100	>100	0
11	**Forage Foulli**	E11	Forage	>100	>100	>100
12	**Berlian**	E12	Forage	>100	>100	0
13	**Elboré**	E13	Forage	0	>100	0
14	**Binder**	E14	Forage	>100	0	0
15	**Mabadje puits**	E15	Puits	>100	0	0
16	**Lagon**	E16	Forage	>100	0	0
17	**Deitchou**	E17	Forage	>100	0	0
18	**MalaneGomé**	E18	Forage	0	>100	0
19	**Torrock**	E19	Puits	0	>100	0
20	**Gouin**	E20	Puits	0	>100	0
21	**Lac Tikem**	E21	Eau de surface	>100	>100	0
Norme OMS				*Ne doivent pas être retrouvés dans une prise d'essai de 100 ml d'échantillon analysé*		

5.7. USAGES DES RESSOURCES EN EAU

Une enquête a été effectuée dans 23 sites stratégiques pour acquérir des informations nécessaires sur les usages des ressources en eau dans la zone d'intervention du projet. Selon les résultats d'enquêtes, il faut noter qu'il y a des villages où on retrouve un seul forage (PMH) qui est parfois non fonctionnel. Cependant, on trouve presque dans chaque concession un puits traditionnel, qui est non aménagé dans la plupart des cas.

Selon les résultats d'enquête, la population s'alimente en eau principalement par : des puits à ciel ouvert, des forage (PMH), des eaux de surface (Lac et Mayo) et d'Adduction en Eau potable (AEP).

Les femmes et les enfants sont destinés à chercher de l'eau. Les points d'eau sont situés à une distance de 10 à 30 mn de marche à pied.

Le volume d'eau consommée (en litres) par personne par jour dans le ménage (boisson, cuisson, lavage…) est en moyen de 20 à 25 litres. Cependant, 73,91% disent que cette quantité est suffisante et 26,09% affirment que la quantité n'est pas suffisante suite à une mauvaise qualité pour certains, éloignement et manque de moyen de transport pour d'autres. Pour le rendre potable, certains utilisent de l'eau de javel suivi de ceux qui font bouillir et les restes disent qu'ils consomment comme tel sans rien faire.

Une autre enquête qualitative (focus groups, entretien et questionnaires agricoles) a été réalisée dans le cadre du projet par l'équipe de Baastel en avril et juin 2024, et met en évidence les grandes difficultés d'accès à l'eau au sein du CAPBL, en particulier en saison sèche. En effet, il y a une insuffisance des points d'approvisionnement en eau potable. Les quelques rares points d'eau captant les aquifères alluvionnaires se tarissent pendant la saison sèche. Cette condition de tarissement des points d'eau (surtout ceux qui dépendent des eaux souterraines) ne permet pas d'assurer correctement les petites activités génératrices des revenues pour des faibles ménages notamment les activités d'irrigation et d'élevage, mais aussi de reboisement. En effet, l'irrigation est une technique peu mobilisée, seuls 4% des personnes enquêtées (enquête agricole) disent recourir à cette pratique.

Usages agricoles. Dans la province du Mayo-Kebbi Ouest, la production agricole est à dominance pluviale. Cependant diverses formes d'irrigation se pratiquent à différentes échelles dans la zone. La consommation en eau reste inconnue. Les eaux souterraines sont très peu sollicitées pour l'agriculture mais des cultures maraichères pratiquées dans certaines agglomérations (Binder et Léré) exploitent la nappe superficielle à travers les puits traditionnels aménagés dans les bas-fonds et dont les prélèvements ne sont pas connus.

Usages pastoraux : les mares naturelles, les lacs (lacs Toubouri, Tikem, Léré Tréné et Kabia) et les cours d'eau sont les points d'eau de surface où le bétail est abreuvé. Les mares naturelles qui peuvent rester en eau durant plusieurs années, constituent des points d'eau utilisés par les éleveurs.

Usages industriels : Le prélèvement des eaux de surface pour usages industriels reste à l'heure actuelle inconnu. Néanmoins, les eaux de fleuve Mayo-Kébbi présentent une potentialité pour une utilisation dans la production de l'énergie électrique à travers la Chute Gauthiot.

Usages domestiques. L'usage des eaux de surface pour la consommation des ménages est difficile. Dans la Province du Mayo-Kébbi Ouest, les populations s'approvisionnent en eau dans des cours d'eau naturels, des mares permanentes et semi-permanentes. Dans ces eaux de surfaces, l'eau est prélevée et consommée sans aucune autre précaution, sans traitement préalable. Les eaux souterraines sont actuellement les seules sources pérennes pour l'alimentation en eau potable : hydraulique villageoise, semi-urbaine et urbaine.

6. CONCLUSIONS

L'objectif de cette étude est de réaliser une étude de diagnostic synthétique sur les caractéristiques des ressources en eau du Complexe d'Aires Protégées de Binder Léré (CAPBL) à partir des données et connaissances disponibles actuellement.

Cette étude est basée sur les données existantes et les données issues de l'enquête de terrain réalisée dans la zone du projet. Les données recueillies comprennent les cartes, les données géologiques, les niveaux dynamiques, les données sur la qualité des eaux et sur les usages de l'eau.

L'analyse et l'interprétation de ces données ont permis d'affirmer que la zone de Binder-Léré, située dans la portion tchadienne du bassin du Niger, est caractérisée par un réseau hydrographique bien structuré, dominé par le cours d'eau principal, le Mayo-Kebbi, ses affluents et de multiples lacs.

Sur le plan hydrogéologique, la zone de Binder-Léré présente une hydrogéologie complexe avec des nappes d'une profondeur modeste, un niveau statique moyen de 9 mètres et des forages atteignant généralement 16 mètres.

Les eaux souterraines sont très peu sollicitées pour l'agriculture, en raison d'une pluviométrie suffisante et du potentiel assez important des eaux de surface. Les forages exploités à des fins agricoles sont donc rares, cependant des cultures maraichères pratiquées dans certaines agglomérations (Binder et Léré) exploitent la nappe superficielle à travers les puits traditionnels aménagés dans les bas- fonds et dont les prélèvements ne sont pas connus.

Les mares naturelles temporaires ou permanentes, constituent des points d'eau utilisés par les éleveurs pour abreuver le bétail.

Sur le plan chimique, les eaux sont globalement de bonne qualité pour la consommation et pour l'irrigation, car respectant la norme de l'OMS, à l'exception de quelques points d'eau présentant des teneurs en nitrates élevées.

Annexes

Annexe A

Références bibliographiques

7. ANNEXES

7.1. Références bibliographiques

- Arrêté N° 22/MHUR/2011 du 07 Novembre 2011, définissant la stratégie nationale d'équipements et d'attribution de points d'eau potable.
- Arrêté N°026/ME/2020 du 28 Juillet 2020, fixant les spécifications techniques et normatives applicables à la réalisation et à l'équipement d'ouvrages d'hydraulique villageoise au Tchad
- Bachimon, Ph, 2005. Géosystèmes lacustres: Étude des régions des lacs de Léré et Fitri (Tchad). Projet CAMPUS, Rapport scientifique, 318 p.
- BRGM (1987). Actualisation des connaissances sur les ressources en eau souterraine de la République du Tchad. 2ème partie, synthèse des données hydrogéologiques et carte à 1/1.500.000. doc. Nº 87.TCD 246 EAU, décembre 1987.
- Cabot, J., 1967. Les lits du Logone. SEDES, Paris, 120 p.
- Chevery, C. & Fromaget, M., 1970. Notice explicative de la carte pédologique de reconnaissance à 1/200 000 de la République du Tchad, feuille de Léré. ORSTOM, Paris, n° 40, 88 p.
- Décret N° 615/PR/PM/ME/MSPM/2010 du 02 Août 2010, Portant définition nationale de l'eau potable au Tchad
- Décret N°616/PR/PM/ME/MSP/2010 du 02 Août 2010, Portant procédure de contrôle et de suivi de la qualité des eaux destinées à la consommation humaine
- HCNE-MEEPNUD-DAES (2003). Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement du Tchad 2003 - 2020 ». Volume thématique ressources en eau et environnement
- Kasser, M. Y., 1995, Evolution précambrienne de la région du Mayo Kebbi (Tchad). Un segment de la Chaîne Panafricaine. Doctorat 3e cycle : Muséum d'Histoire Naturelle, 228 p.
- Lesch, S.M., Suarez, D.L., 2009. A short note on calculating the adjusted SAR index
- Meireles, A., Andrade, E., Chaves, L.C., Frischkorn, H., Crisóstomo, L., 2010. A new proposal of the classification of irrigation water. Revista Ciência Agronômica 41, 349–357. https://doi.org/10.1590/S1806-66902010000300005
- Nontanovanh M. en 2002 a travaillé sur l'influence du substratum géologique et des sols sur l'occupation du sol dans la région de Léré (Sud-Ouest du Tchad): Implication sur la répartition des ressources agropastorales et minières dans son mémoire de DEA à l'Université d'Orléans.
- Nontanovanh, M., 2002. Influence du substratum géologique et des sols sur l'occupation du sol dans la région de Léré (Sud-Ouest du Tchad): Implication sur la répartition des ressources agropastorales et minières. Mémoire de DEA ADEn, Université d'Orléans.
- Passinring K (2016). Effets de l'écoulement des tributaires sur la dynamique des lacs de Léré (Mayo – Kebbi Ouest/Tchad). Geo-Eco-Trop., 2016, 40, 3, n.s. : 191-200.
- Ramakrishnaiah, C.R., Sadashivaiah, C., Ranganna, G., 2009. Assessment of water quality index for the groundwater in Tumkur Taluk, Karnataka State, India. E-Journal of chemistry 6, 523–530.
- Rodier, J., Bouchardeau, A. & Billon, B., 1966. Les déversements du Logone vers la Bénoué. ORSTOM, coll. Terres et eaux, vol. 19, n° 49, 17 p.
- Schneider J.L. (2000). Géologie, Archéologie, Hydrogéologie de la République du Tchad. Mém. 2 vol. Carte de valorisation des eaux souterraines de la République du Tchad., éch. 1/1.500.000, à paraître.
- Şener, Ş., Şener, E., Davraz, A., 2017. Evaluation of water quality using water quality index (WQI) method and GIS in Aksu River (SW-Turkey). Science of the Total Environment 584, 131–144
- Vasanthavigar, M., Srinivasamoorthy, K., Vijayaragavan, K., Ganthi, R.R., Chidambaram, S., Anandhan, P., Manivannan, R., Vasudevan, S., 2010. Application of water quality index for groundwater quality assessment: Thirumanimuttar sub-basin, Tamilnadu, India. Environmental monitoring and assessment 171, 595–609.
- Verma, P., Singh, P.K., Sinha, R.R., Tiwari, A.K., 2020. Assessment of groundwater quality status by using water quality index (WQI) and geographic information system (GIS) approaches: a case study of the Bokaro district, India. Applied Water Science 10, 1–16.
- WHO, 2007. Evaluation of certain food additives and contaminants: sixty-eighth report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives. World Health Organization.
- Wilcox, L.V., 1955. Classification and use of irrigation waters, US Dept of Agricul.

Annexe B

Points d'échantillonnage des eaux et paramètres in situ

7.2. Points d'échantillonnage des eaux et paramètres in situ

N°	Village	Code	Date	Types	Latitude	Longitude	Altitude	pH	T°C	EC (µs/cm)	O_2 (mg/l)	O_2 (%)
1	Lac Leré (Foulli)	E1	11/06/2024	Eau de surface	9,634	14,205	250	7,84	28,7	112,6	7,33	97,7
2	Dissing	E2	11/06/2024	Forage	9,6372	14,1558	264	7,39	31,6	1988	5,5	77,1
3	Lac Dissing	E3	11/06/2024	Eau de surface	9,6336	14,15421	253	8,44	28,7	112,5	8,35	110,8
4	Rivière Zalbi	E4	11/06/2024	Eau de surface	9,68924	14,11342	245	6,95	27,5	95,9	6,76	89,4
5	Forage Zalbi	E5	11/06/2024	Forage	9,67963	14,12285	272	7,18	31,6	913	3,32	46,3
6	Lac Trené	E6	11/06/2024	Eau de surface	9,66412	14,26376	257	7,14	29,4	102,5	6,71	89,8
7	Forage Tréné	E7	11/06/2024	Forage	9,65965	14,25516		7,63	29,5	593	6,21	83,1
8	R. Mayo Kebbi	E8	11/06/2024	Rivière	9,65603	14,25548	258	6,97	28,6	97,8	5,83	77
9	Lac Tréné (Guitalé)	E9	11/06/2024	Eau de surface	9,64678	14,27435	257	6,87	28,8	94,7	5,76	76,5
10	Puits Guitalé	E10	11/06/2024	Puits	9,64152	14,27137		7,26	28,6	748	4,34	57,4
11	Forage Foulli	E11	11/06/2024	Forage	9,64008	14,20843	254	7,11	29,8	1038	2,75	37,1
12	Berlian	E12	12/06/2024	Forage	9,71952	14,26557	306	7,09	29,9	784	2,78	37,8
13	Elboré	E13	12/06/2024	Forage	9,83917	14,35534	337	7,05	30,4	725	2,02	27,8
14	Binder	E14	12/06/2024	Forage	9,96343	14,45851	356	7,21	31,1	1701	3,65	51,3
15	Mabadje puits	E15	12/06/2024	Puits	9,5921078	14,4539154	367	7,21	30,1	747	3,84	53,6
16	Lagon	E16	12/06/2024	Forage	9,4862841	14,5441026	375	6,79	31,2	346	4,56	63,5
17	Deitchou	E17	12/06/2024	Forage	9,4468027	14,5904719	388	7,13	30,6	594	1,99	27,9
18	MalaneGomé	E18	13/06/2024	Forage	9,6070915	15,0180059		7,13	30,4	493	1,23	17,1
19	Torrock	E19	13/06/2024	Puits	9,6590082	15,0107374	376	7,2	29	878	4,19	56,8
20	Gouin	E20	13/06/2024	Puits	9,6332834	14,9614689	401	7,4	28,9	514	3,7	49,9
21	Lac Tikem	E21	13/06/2024	Eau de surface	9,8222792	1506028	358	6,65	28,3	93,9	6,08	80,9
Nome OMS								6,5-9		1000-1500		60-75%

Annexe C

Résultats des analyses physicochimiques et bactériologiques des eaux

7.3. Résultats des analyses physicochimiques et bactériologiques des eaux

N°	Village	Code	Ca2+ (mg/l)	Mg2+ (mg/l)	Na+ (mg/l)	K+ (mg/l)	HCO3- (mg/l)	Cl- (mg/l)	SO42- (mg/l)	NO3- (mg/l)	PO43- (mg/l)	Fe2+ (mg/l)	Coliformes Fécaux (100 ml)	CT (100ml/FNU)	E. Coli
1	Lac Leré (Foulli)	E1	50,78	3,9	5,3	0,7	119,7	30	4	2,9	34,4	0	>100	0	0
2	Dissing	E2	18,81	17,22	25	4,1	32,6	32	94	8,5	10,6	0	>100	>100	0
3	Lac Dissing	E3	28,81	15,07	26,1	4,3	181,2	26	1	3,3	2,4	0	>100	>100	0
4	Rivière Zalbi	E4	32,49	7,57	30	6,2	29,6	58	67	15,3	173,3	4,65	>100	0	0
5	Forage Zalbi	E5	42,2	20,45	1,7	0,2	62,3	42	70	0,1	7,8	0	>100	>100	0
6	Lac Trené	E6	27,1	11,85	34	4,7	32,6	66	4	97,3	128,8	7	>100	>100	0
7	Forage Tréné	E7	36,84	18,86	31,1	6	20,8	122	54	4,9	1,9	0	0	>100	0
8	R. Mayo Kebbi	E8	25,65	1,17	38,2	5,6	14,5	17	122	12,3	21,01	8,12	>100	>100	0
9	Lac Tréné (Guitalé)	E9	35,91	26,8	22,4	4	42,3	40	3	220,2	10,69	8,97	>100	>100	0
10	Puits Guitalé	E10	17,1	27,7	13,6	0,9	60,7	20	76	24	22,3	6,78	>100	>100	0
11	Forage Foulli	E11	25,91	10,5	23,1	3,6	58,5	60	13	2,7	4,2	0	>100	>100	>100
12	Berlian	E12	18,81	7,22	2,8	0,3	22,3	30	24	5	4,4	0	>100	>100	0
13	Elboré	E13	17,1	6	20,7	3,9	24,6	53	10	2,8	5,9	0	0	>100	0
14	Binder	E14	14,46	0,09	26,5	4,3	16,1	40	15	6,9	22,2	0	>100	0	0
15	Mabadje puits	E15	32,49	8,42	2,9	0,5	25,8	11	88	13,1	8,7	0	>100	0	0
16	Lagon	E16	13,68	4,5	28,7	5,3	10,8	78	0	1,9	2,8	0	>100	0	0
17	Deitchou	E17	12,94	6,95	42,4	6,3	49,1	66	9	3,3	3	0,1	>100	0	0
18	MalaneGomé	E18	20,52	2,6	31,2	5,5	51,4	56	7	1,5	1	0	0	>100	0
19	Torrock	E19	18,81	7,22	28,4	4,2	36,7	70	0	1,7	1,02	0	0	>100	0
20	Gouin	E20	27,36	4,85	2,6	0,4	45,2	26	11	7,3	1,42	0	0	>100	0
21	Lac Tikem	E21	20,52	16,75	2,1	0,3	18,04	74	0	7,8	2,41	0,01	>100	>100	0
Norme OMS			200	50	50	12	6	250	250	50	0,2 mg/L	≤ 0,3 mg/L	*Ne doivent pas être retrouvés dans une prise d'essai de 100 ml d'échantillon analysé*		

Annexe D

Résultats sur l’évaluation sur la qualité des eaux

7.4. Résultats sur l'évaluation sur la qualité des eaux

N°	Village	Code	SAR	IWQI	DWQI
1	Lac Leré (Foulli)	E1	0,19	85,36	32,85
2	Dissing	E2	1,00	72,70	35,71
3	Lac Dissing	E3	0,98	80,44	41,26
4	Rivière Zalbi	E4	1,23	77,59	35,32
5	Forage Zalbi	E5	0,05	80,71	32,33
6	Lac Trené	E6	1,37	75,17	44,50
7	Forage Tréné	E7	1,03	62,70	36,44
8	R. Mayo Kebbi	E8	2,00	83,65	33,52
9	Lac Tréné (Guitalé)	E9	0,69	82,61	66,39
10	Puits Guitalé	E10	0,47	83,74	35,90
11	Forage Foulli	E11	0,96	72,32	28,35
12	Berlian	E12	0,14	84,61	20,80
13	Elboré	E13	1,09	76,53	23,04
14	Binder	E14	1,91	71,62	23,88
15	Mabadje puits	E15	0,12	88,43	28,65
16	Lagon	E16	1,71	72,19	23,91
17	Deitchou	E17	2,35	69,21	28,39
18	MalaneGomé	E18	1,72	74,16	26,29
19	Torrock	E19	1,41	70,50	23,97
20	Gouin	E20	0,12	86,36	23,15
21	Lac Tikem	E21	0,08	80,33	22,05

Annexe E

Données sur les niveaux statistiques des nappes de la région du Mayo Kebbi

7.5. Données sur les niveaux statistiques des nappes de la région du Mayo Kebbi

N°	Villages	Forages	NS(m)	T°C	pH	Cond (µs/cm)	Xcoord	Ycoord
1	Djaro Baidou	G/G F1	7.06	31.1	7.38	142.4	15.54236	9.64696
2	Gaya centre	G/G F2	3.66	30.2	6.20	90.42	15.51742	9.63487
4	Touloumi	G/G F3	10.72	30.7	7.17	96.46	15.62601	9.52606
5	Domandalla	G/G F4	4.14	32.7	7.80	253.5	15.61387	9.59149
6	Gounou/gaya	G/G F5	3.56	31.50	7.25	154.2	15.50336	9.63474
7	Gounou/gaya	G/G F6		31.6	6.21	141.6	15.49989	9.61085
8	Mbélé Kokosso	G/G F7	6.66	31.3	7.26	222.4	15.38705	9.42529
9	Gounou Gang	G/G F8	6.72	31.0	7.41	144.5		
10	Ngamndi	FIA F1		31.2	7.32	153.9	15.61055	9.90527
11	Grand Saiga	FIA F2	11.07	32.1	6.86	447.9	15.1175	9.77277
12	Gobossia	FIA F3	5.33	31.1	7.25	429.3	15.15277	9.83805
13	ACT Patalao	FIA F4	4.24	31.7	7.03	110.0		
14	Folmaye	FIA F5	8.15	33.0	6.40	321.0	15.1925	9.95805
15	Fianga centre	FIA F6	16.89	33.0	7.10	598.2	15.13972	9.91611
16	Lingoua	FIA F7	15.70	33.7	6.72	276.9	15.13397	9.94069
17	Nembagre	FIA F8		31.3	6.73	381.2	15.03416	9.34468
18	Mbouraou	FIA F9	9.96	30.0	7.15	307.3	14.795	9.85888
19	Mayélé	BID F1	4.34	31.9	7.46	352.8	14.44034	9.94176
20	Mabaroua	BID F2	10.24	32.4	7.77	309.7	14.40361	9.90694
21	Elboré	BID F3	12.0	31.3	7.54	400.0	14.35325	9.83875
22	Ribaou	BID F4	5.12	30.9	7.14	339.7	14.31111	9.78972
23	Léré	LER F1	4.71	31.2	6.79	437.6	14.17379	9.64823
24	Bidang	LER F2		30.8	6.62	295.5		
25	Passoulou	LER F3	15.11	33.6	7.17	325.5	14.41583	9.59946
26	Lagon	LER F4	16.31	33.0	6.71	231.1	14.54412	9.48624
27	Moussalé	PAL F1		31.5	7.04	206.5	14.70373	9.34468
28	Bissi Keda	PAL F2		31.7	6.94	348.1	14.6084	9.28012
29	Lamé	PAL F3		31.5	6.94	252.6	14.54179	9.24245
30	Gaotao	PAL F4	10.76	32.4	7.23	204.7	14.90386	9.42864
31	Lycée Communal	PAL F5		30.6	6.87	367.6		
32	Pala centre	PAL F6	12.60	34.2	6.48	257.9	14.92553	9.38262
33	Sorga	PAL F7	11.86	30.3	6.25	222.4	15.10314	9.3795

Desjardins
Développement international

Baastel