

Article original

Occupation du sol et qualité physico-chimique des eaux souterraines du département du Chari au Tchad

**KEMSOL NAGORNGAR Angeline^{1*}, DJIMTA Raoul²,
DJIMASSAL Datoiloum¹, DJEKORNOM Tite²**

¹Centre National de Recherche pour le Développement (CNRD)

²Université de N'Djamena

^{1*}Auteure correspondante. Email : akemsol@gmail.com

Article soumis, le 05/11/2025 et accepté, 06 février 2026

Réf : AUM13(1)- N° SPECIAL 1

Résumé : L'occupation du sol non planifiée et la mauvaise gestion de l'espace peuvent avoir un impact négatif sur les eaux souterraines et compromettre la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine et à l'usage agricole. Le Département du Chari, situé dans le centre du Tchad, fait face à une pression croissante sur ses ressources en eau en raison des activités anthropiques liées à l'expansion démographique. L'objectif principal de l'étude est d'analyser les différentes formes d'occupation du sol et la qualité physico-chimique des eaux souterraines du Département. Une image satellitaire Sentinel-2 du 21 février 2025 de la zone a été téléchargée et découpée sur la zone d'étude. Une classification supervisée par la méthode du maximum de vraisemblance, validée par la matrice de confusion ayant un coefficient Kappa de 85% a permis d'obtenir six classes principales d'occupation du sol qui sont : savanes et plantations (33,9%), zones de cultures (30,8%), steppe (16,99%), plaine inondable (16,82%), plan d'eau libre (1,3%) et sol nu (0,18%). Concernant la qualité des eaux, onze échantillons des eaux de forage, ont été prélevés dans la zone et certains paramètres physicochimiques tels que la conductivité électrique, la température et le potentiel d'hydrogène sont directement mesurés sur le site à l'aide d'une sonde multi paramètres. Les résultats montrent la fluctuation des valeurs de tous ces paramètres dont les moyennes sont de 34,1°C pour la température, 7,035 pour le pH et 339µs/cm pour la

conductivité. Selon les normes recommandées par l'OMS, les valeurs du pH sont conformes, celles de la conductivité sont en dessous tandis que celles de la température sont supérieures. Il faudra surveiller l'occupation du sol, surtout les zones de culture pour éviter d'altérer la qualité des eaux souterraines par infiltration de polluants d'origine agricole.

Mots clés : Occupation du sol ; Qualité physico-chimique ; Eau souterraine, Tchad

Land use and physicochemical quality of groundwater in the Chari Department, Chad

Abstract: *Unplanned land use and poor land management can negatively impact groundwater and compromise the quality of water intended for human consumption and agricultural use. The Chari Department, located in central Chad, faces increasing pressure on its water resources due to human activities related to population growth. The main objective of this study is to analyze the different forms of land use and the physicochemical quality of the Department's groundwater. A Sentinel-2 satellite image from February 21, 2025, of the area was downloaded and cropped to the study area. A classification supervised by the maximum likelihood method, validated by the confusion matrix with a Kappa coefficient of 85%, yielded six main land cover classes: savannas and plantations (33.9%), cultivated areas (30.8%), steppe (16.99%), floodplain (16.82%), open water (1.3%), and bare soil (0.18%). Regarding water quality, eleven borehole water samples were collected from the area, and certain physicochemical parameters, such as electrical conductivity, temperature, and hydrogen potential, were measured directly on-site using a multi-parameter probe. The results show fluctuation in the values of all these parameters, with averages of 34.1°C for temperature, 7.035 for pH, and 339 µs/cm for conductivity. According to WHO recommended standards, the pH values are within acceptable limits, the conductivity values are below these limits, while the temperature values are above them. Land use, especially in cultivated areas, must be monitored to prevent the infiltration of agricultural pollutants into groundwater quality.*

Keywords: *Land use; Physico-chemical quality; Groundwater; Chad*

Introduction

Les eaux souterraines constituent une ressource majeure qui est utilisée pour la consommation et les activités humaines et industrielles. Selon la FAO, l'agriculture est l'activité économique la plus consommatrice d'eau puisqu'elle prélève à elle seule près de 70% de toute l'eau mobilisée des cours d'eau, lacs et nappes souterraines à travers le monde, pouvant atteindre jusqu'à 95%

dans les pays en développement (Keddal et Yao N'dri, 2008). L'eau manque quantitativement et qualitativement partout en Afrique du fait non seulement des conditions climatiques moyennes, mais aussi de pressions sur les ressources (croissance démographique, pollution...) et du manque d'infrastructures hydrauliques, de collecte et d'exploitation dans de nombreux pays, y compris ceux où l'eau existe en abondance, comme en Afrique centrale (Nguimalet et al., 2016).

Dans les pays sahéliens comme le Tchad, les ressources en eau souterraine sont souvent la principale source d'approvisionnement en eau, en particulier dans les zones rurales. Cette dernière joue un rôle crucial dans l'alimentation en eau potable, les activités agricoles et industrielles, ainsi que dans le maintien des écosystèmes (Margat, 2008). Cependant, l'accès à une eau de qualité est un enjeu majeur en raison de la forte pression sur les ressources hydriques, due à la variabilité climatique et à la croissance démographique rapide (Opitz-Stapleton et al., 2024).

Le département du Chari, dont le chef-lieu est Mandéla, fait face à une pression croissante sur ses ressources en eau en raison de l'expansion démographique, de l'urbanisation, des activités agricoles et de l'élevage. L'occupation du sol, souvent non planifiée, peut avoir un impact significatif sur la qualité des eaux souterraines par l'introduction de polluants d'origine anthropique (Foster et Chilton, 2003). Une mauvaise gestion de l'espace et l'absence de mesures de protection des nappes peuvent compromettre la qualité de l'eau destinée à la consommation humaine et à l'usage agricole (Dongo et al., 2008).

La présente étude se justifie par la nécessité de mieux comprendre les effets de l'occupation du sol sur les caractéristiques physico-chimiques des eaux souterraines, afin d'éclairer les décisions en matière de gestion durable de cette ressource. L'objectif principal de ce travail est d'analyser l'impact de l'occupation du sol sur la qualité physico-chimique des eaux souterraines dans le Département du Chari. De cet objectif principal découlent les

objectifs spécifiques suivants : Identifier les différentes formes d'occupation du sol dans la zone d'étude ; Évaluer les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de Mandéla. Ce travail s'inscrit dans une démarche pluridisciplinaire, combinant l'analyse spatiale de l'occupation du sol à travers des outils de télédétection et SIG, avec des investigations hydro chimiques sur le terrain.

1. Présentation de la zone d'étude

Le département du Chari, situé entre les latitudes 11° et 12° Nord et les longitudes 15° 05' et 15° 25' Est, couvre une superficie d'environ 2 684 km². Son chef-lieu, Mandéla est situé à 50 km au sud de N'Djamena. Le département est bordé au nord par la ville de N'Djamena, au sud le département du Mayo Lémé, à l'est par le fleuve Chari, et à l'Ouest par le fleuve Logone et la République du Cameroun. Il est l'un des trois départements composant la région du Chari-Baguirmi. La zone d'étude, sous-préfecture de Mandéla, chef -lieu du département du Chari, est située en zone bioclimatique soudano-sahélienne dans la Mésopotamie tchadienne entre les fleuves Chari et Logone (figure 1).

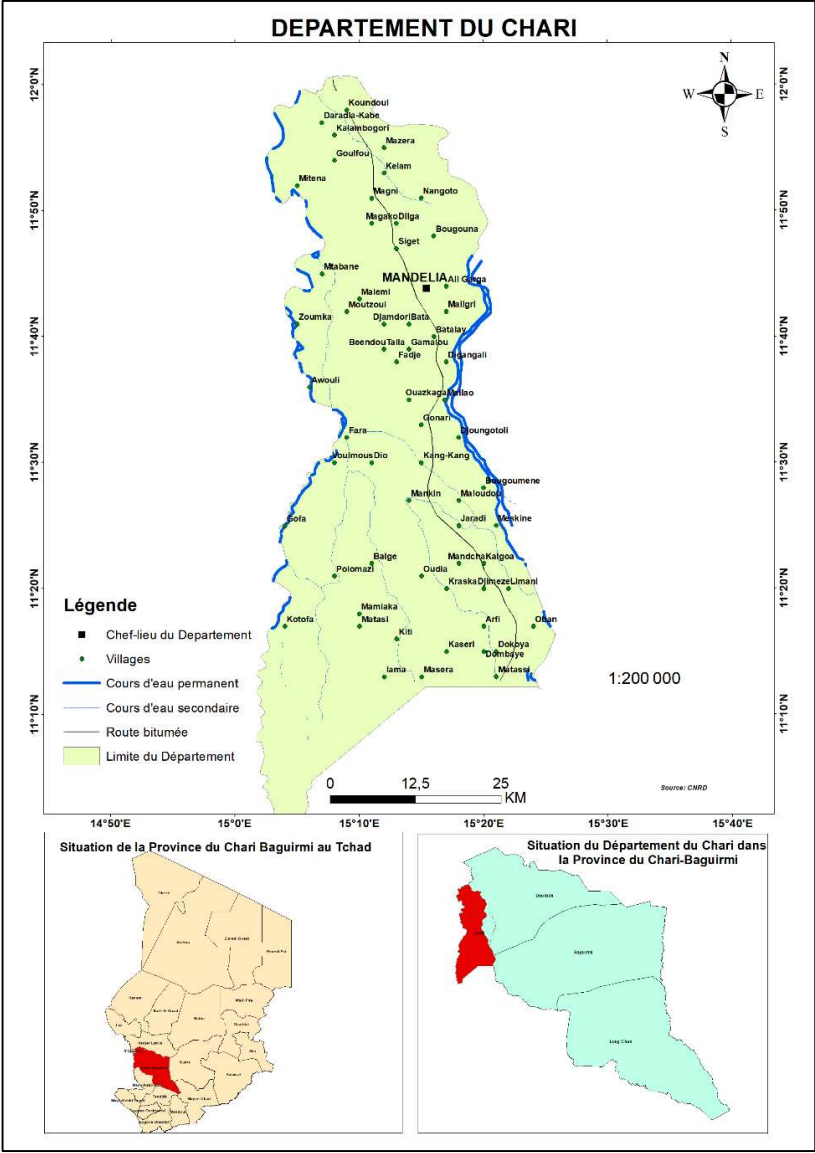


Fig.1 : Présentation de la zone d'étude

Le département est situé en zone soudano-sahélienne. Selon les données météorologiques relevées par l'Agence Nationale de la Météorologie (ANAM) à la station de Massenya entre 2000 et 2024, le Département du Chari enregistre une pluviométrie allant de 400 à 700 mm par an entre Juin et Septembre. Les températures, quant à elles, varient de 13,9°C à 43,3°C, la plus élevée étant atteinte en Avril et la plus basse en Décembre. Situé entre les fleuves Chari et Logone, le paysage du département est essentiellement constitué de vastes plaines alluviales, résultant des dépôts sédimentaires induits par l'activité fluviale.

Sur le plan pédologique, la plus grande partie des sols du bassin du Chari-Logone s'est formée sur des sédiments fluvio-lacustres de la cuvette tchadienne. Selon Pias, (1970). Les principaux types de sols sont :

- Les sols ferralitiques riches en hydroxydes de fer et d'alumine ;
- Des sols ferrugineux tropicaux à cuirasse qui occupent d'importantes surfaces au niveau du Logone moyen et du Chari moyen ;
- Des vertisols, des sols hydromorphes et des sols halomorphes, développés sur les formations quaternaires des plaines centrales, des plaines alluviales d'inondation du Chari et du Logone et des rives du Lac Tchad ;
- Des sols minéraux bruts, non climatiques, d'apport alluvial.

Concernant la végétation, le département est caractérisé par une savane arbustive à arborée et herbacée, relevant du domaine soudano-sahélien. Les principales espèces rencontrées sont : *Combretum sp*, *Terminalia sp.*, *Khaya senegalensis*, *Bombax costatum*, *Hyphaene tebecca*, *Acacia seyal*, *Faidherbia albida* et *Borassus aethiopium*. Dans les zones marécageuses, les *Andropogon sp.* dominent avec quelques arbustes et arbres dispersés ou regroupés en bosquets (Pias, 1970).

Les activités socio-économiques de la zone sont dominées par :

- ✓ **L'agriculture** : L'agriculture offre des emplois à la majeure partie de la population. Le climat de la zone se prête à la culture des céréales (mil, maïs, sorgho), du niébé, de l'arachide, des cucurbitacées (concombres, melons, pastèques ...) et divers légumes (gombo, tomate, piment...);
- ✓ **L'élevage** : L'élevage occupe également une place de choix, notamment avec l'élevage des bovins, ovins et caprins ;
- ✓ **La pêche** : La pêche constitue une source de revenu essentielle pour les riverains : elle représente la part majeure du revenu monétaire des ménages les plus dépendants de la ressource halieutique.
- ✓ **L'artisanat** : L'artisanat local est riche, mêlant traditions ancestrales et pratiques modernes, principalement centré sur les tissages, la poterie, la fabrication des bijoux et d'objets en bois.

2. Matériel et méthodologie

L'étude, comportant deux volets : cartographie de l'occupation du sol et qualité physico-chimique de l'eau du département du Chari, cela a nécessité l'utilisation de plusieurs outils, données et logiciels.

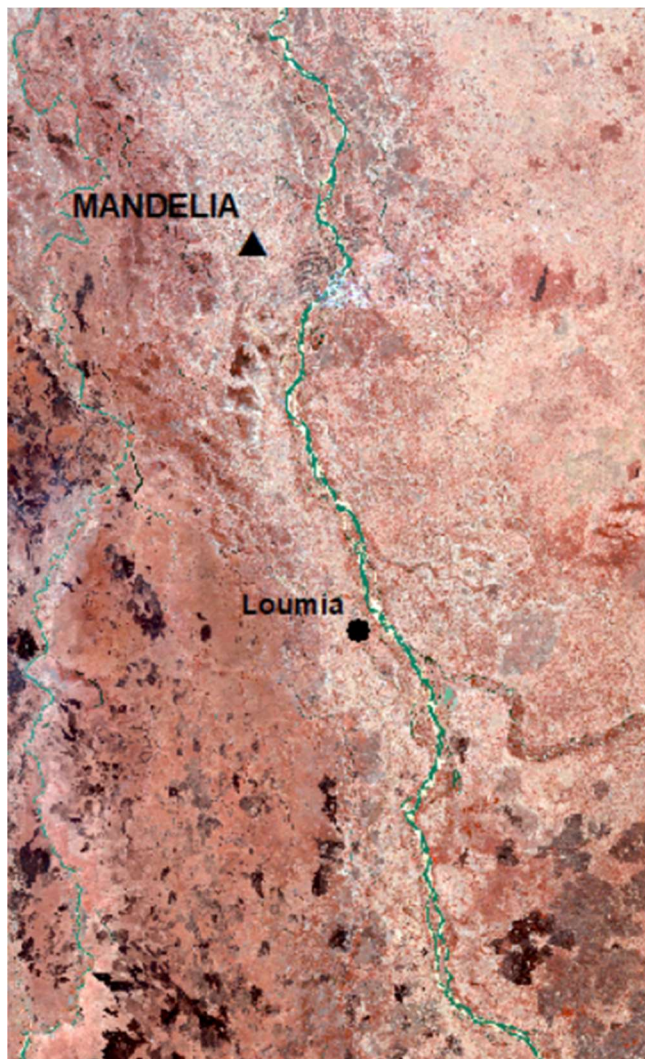
2.1. Matériel

L'image satellitaire : L'image satellitaire utilisée est une image optique Sentinel-2, provenant du site officiel du programme Copernicus. Les données prétraitées, sont gratuitement accessibles à l'adresse <https://scihub.copernicus.eu>. Les images ont une résolution spatiale comprise entre 10 et 60 m, une dimension de 290 km de côté et comportent 13 bandes spectrales. Dans notre étude, nous avons utilisé les 4 bandes avec une résolution spatiale de 10m (bandes 2, 3, 4 et 8 correspondants respectivement aux

longueurs d'onde bleu, vert, rouge et proche infra-rouge). Les images sentinel-2 possèdent plusieurs spécificités qui en font des outils innovants pour l'occupation du sol. La répétitivité de la prise de vue qui est de 5 jours avec les deux satellites (A et B) et la multiplicité des bandes permettent de suivre à haute résolution l'occupation des sols et les données environnementales (AgroTic, 2018). La prise de vue du 21 février 2025 a été utilisée (figure 2). Les logiciels Envi 4.7 et ArcGis 10.6 ont été utilisés pour la classification de l'image et la cartographie de l'occupation du sol.

Pour le terrain : La campagne de collecte de données de terrain s'est déroulée du 25 au 30 Mai 2025 dans la ville de Mandalia et ses environs (figure 3a et b)). Le matériel de terrain est constitué de :

- ❖ Appareil de localisation GPS Garmin™ pour l'obtention des coordonnées exactes des points d'eau et des unités d'occupation du sol ;
- ❖ Instruments de mesure sonde multi-paramètres (de marque HACH) pour mesurer la conductivité électrique (EC), le pH et la température (°C).



**Fig.2 : Image satellitaire Sentinel-2 du 21 Février 2025 du
Département du Chari**

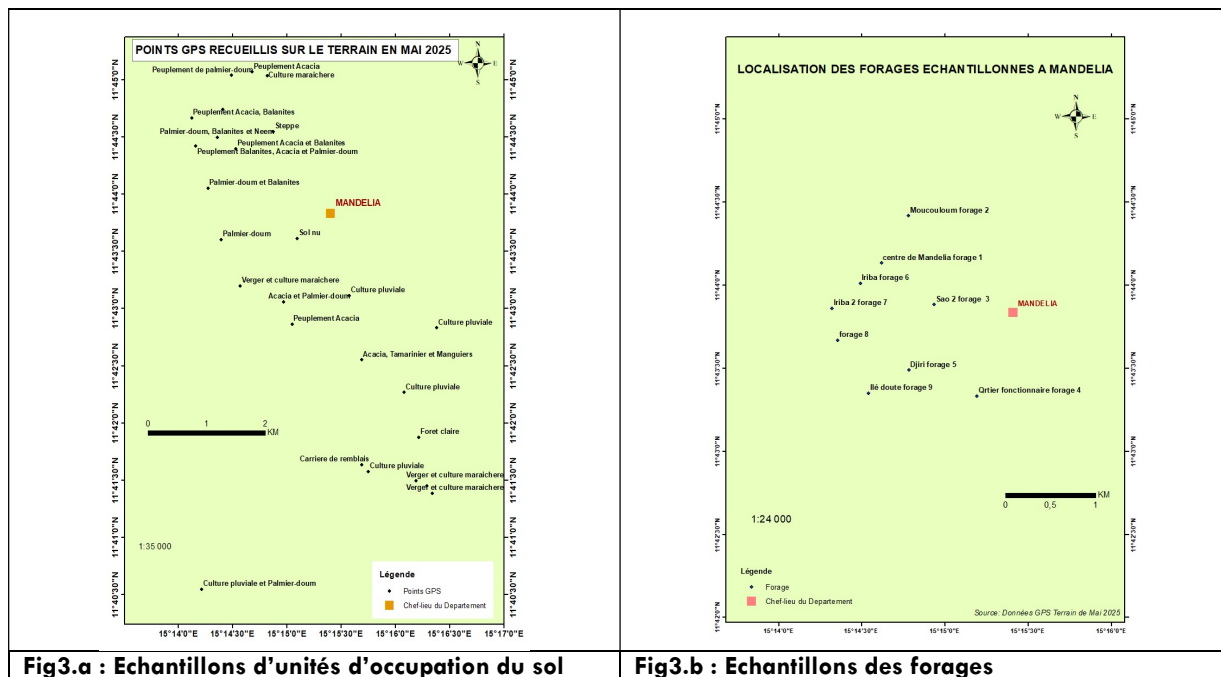


Fig3.a : Echantillons d'unités d'occupation du sol

Fig3.b : Echantillons des forages

Fig.3 : Localisation des échantillons

2.2. Méthodologie

La première méthodologie utilisée dans ce travail est basée sur la classification de l'image satellitaire Sentinel-2 pour établir la carte d'occupation du sol. L'occupation du sol désigne l'utilisation d'un espace à un moment donné. Elle montre l'étalement et l'agencement des différents éléments physiques et biologique sur la surface de la terre (figures 4a et b). Ainsi, sont différenciés les sols agricoles, les forêts, les zones urbaines, les plans d'eau, etc.

En télédétection, la classification est un regroupement d'objets en classes à partir des traits descriptifs. En d'autres termes, il s'agit d'une partition de l'image en ensemble de pixels représentant une même occupation du sol (Morineau 2015). Deux notions ressortent dans cette définition à savoir les classes d'information qui font référence aux catégories d'intérêt que l'analyste cherche à identifier dans les images et les classes spectrales qui sont les groupes de pixels ayant les mêmes caractéristiques spectrales quant à leur valeur radiométrique dans les différents canaux (Cherel, 2010). La classification a donc pour objectif de faire correspondre les classes spectrales aux classes d'information. Il existe deux catégories de classification : celles qui sont basées sur une connaissance de la zone à cartographier et dont l'analyste dispose d'échantillons tests appelées « classification supervisée ou dirigée » et celle dont l'analyste ne dispose pas d'information *a priori* et laisse le regroupement se faire sur la base de valeur radiométrique des pixels. C'est la « classification non supervisée ou automatique » (Centre Canadien de Télédétection). Chacune de ces catégories comporte plusieurs méthodes dont certaines sont utilisées dans le cadre de ce travail.

Disposant des points GPS relevés pendant les campagnes de terrain Mai 2025, les méthodes de classification supervisées ont été choisies pour le traitement de l'image satellitaire. Les deux méthodes les plus couramment utilisées dans la classification supervisée de l'occupation des sols sont la méthode par distance minimale et la méthode par maximum de vraisemblance (Bonn et

Rochon 1993 ; Soro et al. 2014). L'algorithme du maximum de vraisemblance utilise les statistiques des sites d'entraînement pour calculer la probabilité d'appartenance de chaque pixel à l'une des classes (Mas, 2000). Le pixel sera affecté à la classe pour laquelle la probabilité est la plus forte (Lacombe, 2007). Cette méthode classe tous les pixels sauf si on applique un seuil de probabilité. Quant à la méthode par la distance minimale, elle calcule la distance Euclidienne entre chaque pixel et le vecteur moyenne de chaque classe (Lacombe, 2007). Les pixels sont affectés à la classe la plus proche sauf si des conditions particulières sont posées. Les résultats de la matrice de confusion, montrent que la classification par maximum de vraisemblance est meilleure, donc c'est elle qui est appliquée dans la présente étude.



Fig.4.a : les zones agricoles (céréales et maraichage) Fig.4.b : Les zones naturelles (savane, steppe, forêt)

Fig.4 : Quelques éléments d'occupation du sol du Département du Chari. Photos de terrain

La deuxième méthodologie consiste à déterminer des paramètres physico-chimiques des échantillons d'eau de forage du site d'étude. L'échantillonnage est primordial car il conditionne la pertinence des analyses et l'interprétation qui en sera donnée (Bouderka et al., 2016 ; Rodier et al., 2009). Il est donc très important de développer une méthodologie adaptée à chaque cas et utiliser le matériel convenable. Afin de réaliser une campagne d'échantillonnage, une descente au terrain s'est déroulée en date

du 25 au 30 Mai 2025 pour le prélèvement des échantillons. Afin de réduire les risques associés à la contamination des échantillons, il est essentiel de prendre des précautions lors du prélèvement pour obtenir un échantillon représentatif. Au cours de cette campagne de prélèvement onze (11) échantillons sont prélevés des forages (figure 3.b). Les modes d'échantillonnage et de prélèvement ont été réalisés selon les recommandations préconisées.

Les analyses in situ présentent un grand intérêt en raison de leur rapidité de traitement, leur simplicité d'utilisation et leurs moindres coûts. Dans le cadre de ce travail, certains paramètres physicochimiques tels que la conductivité électrique, la température et le pH sont directement mesurés sur le site à l'aide d'une sonde multi paramètres de marque HACH. Onze (11) échantillons sont prélevés à cet effet dans la zone d'étude. Afin de prévenir ces erreurs, plusieurs critères ont été préalablement établis, notamment la propreté du matériel, l'évitement de toute contamination, le rangement approprié, le marquage, l'enregistrement et les procédures opérationnelles. La procédure implique de pomper l'ouvrage durant deux à trois minutes avant de procéder aux prélèvements. Les échantillons sont prélevés directement en pompant les ouvrages. Les mesures sont réalisées en respectant les consignes ci-dessous :

- Se rassurer du fonctionnement des équipements avant la descente sur les sites : contrôler les piles et prévoir des piles de rechange pour tous les appareils.
- Rincer le bout du multimètre dans de l'eau distillé après chaque mesure ;
- Tremper directement dans de l'eau à mesurer ;
- Laisser stabiliser la mesure ;
- Les valeurs des mesures sont lues et rapidement notées ;

- Une fois terminée, remettre rapidement le capuchon de l'appareil pour éviter sa dégradation.

Après la mesure des paramètres physiques, des prélèvements d'eau sont réalisés et envoyés au laboratoire pour procéder aux mesures qui portent sur huit (8) paramètres chimiques qui sont : le calcium (Ca^{2+}), le magnésium (Mg^{2+}), le bicarbonate (HCO_3^-), le chlore (Cl^-), les sulfates (SO_4^{2-}), les nitrates (NO_3^-), le potassium (K^+) et le sodium (Na^+). Les concentrations obtenues permettent de préciser si la qualité de l'eau est conforme aux normes de l'OMS en vigueur concernant la potabilité des eaux souterraines.

3. Résultats et discussions

3.1. L'occupation du sol

L'utilisation de la classification supervisée par méthode de maximum de vraisemblance sur les images Sentinel-2 a permis d'obtenir la carte d'occupation du sol pour l'année 2025 du département du Chari avec six (6) classes qui sont (figure 5) :

- ✓ Les zones de cultures englobant tout type de cultures pluviales, de décrue et irriguées ;
- ✓ Les zones de savane et plantations comportant les savanes arbustives, arborées, boisées, ainsi que les vergers (manguiers, agrumes, etc.) et quelques rares forêts claires et galeries dégradées de la zone ;
- ✓ La steppe renferme la savane arbustive très clairsemée et dégradée ainsi que les zones de jachères ;
- ✓ Les plans d'eau libre comportent les cours d'eau permanents et les zones de marécage contenant encore de l'eau libre au moment de la prise de vue de l'image ;

- ✓ La plaine inondable comporte les zones marécageuses renfermant un tapis herbacé ;
- ✓ Le sol nu renferme les zones sableuses, les zones de parcours dégradées et parfois des zones d'habitation.

Il n'a pas été facile de faire ressortir clairement les lieux habités qui sont engloutis dans les autres unités d'occupation du sol.

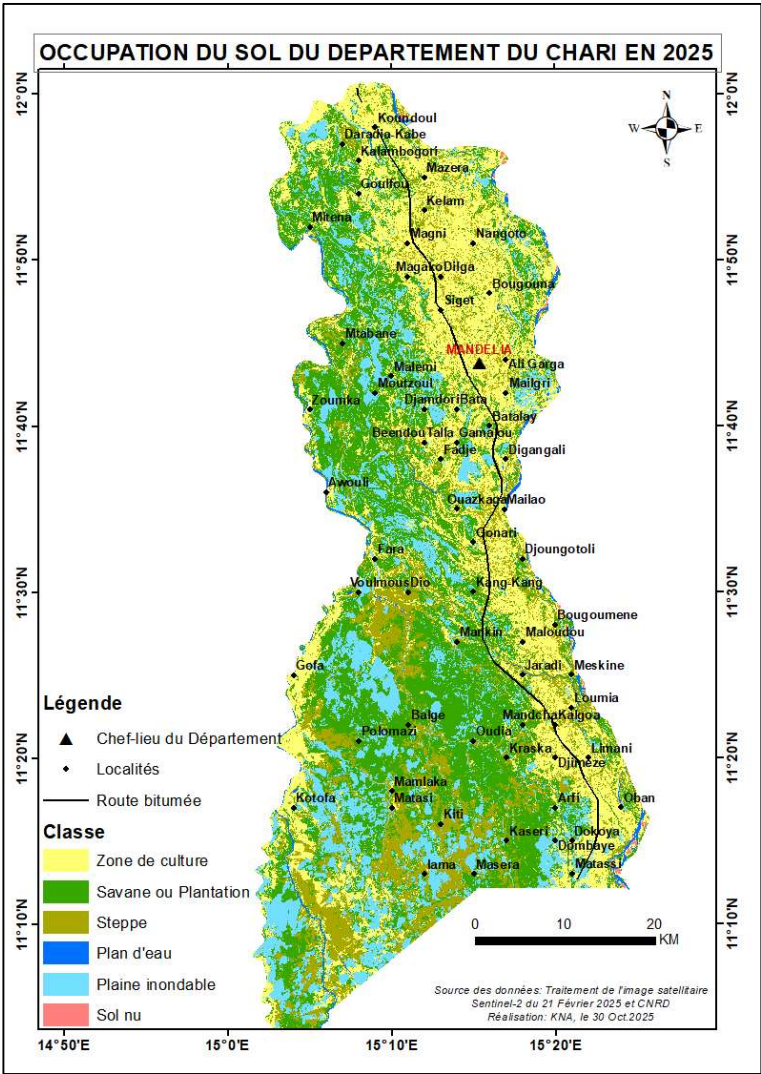


Fig.5 : Carte d'occupation du sol du Département du Chari en 2025

A l'issue de la classification, une matrice de confusion a été générée pour la validation de la carte. En effet, sur les points GPS recueillis sur le terrain, 70% ont servi à la classification et 30% à la validation, ce qui a donné le résultat présenté au tableau 1.

Tableau 1 : Matrice de confusion de la classification de l'image Sentinel-2 du 21 Février 2025 au Département du Chari

Classe	Savane	Steppe	Culture	Plaine	Sol nu	Plan d'eau
Savane	91,46	0,15	11,65	0	0	0
Steppe	2,85	75,94	17,27	0	0,52	0
Culture	5,69	23,91	71,08	0	1,03	0
Plaine	0	0	0	100	0	0
Sol nu	0	0	0	0	98,45	0
Plan d'eau	0	0	0	0	0	100
Total en %	100	100	100	100	100	100

Précision générale = $(2520/2872) 87.7437\%$

Coefficient Kappa = 0.8520

Selon Chalifoux *et al.* (2006), l'indice Kappa évalue dans la matrice de confusion, l'accord entre les résultats obtenus et la vérité sur le terrain. Sa valeur varie de 0 à 1 et il se divise en 5 catégories : accord très faible de 0 à 0,20 ; accord faible de 0,21 à 0,40 ; accord modéré de 0,41 à 0,60, accord substantiel de 0,61 à 0,80 et accord parfait de 0,81 à 1. Pour Pontius (2000), dans une étude d'occupation des sols, lorsque l'indice Kappa, évalué dans les opérations de classification est compris entre 50 et 75%, c'est-à-dire supérieur à 50%, la classification adoptée est valable et les résultats peuvent être judicieusement utilisés. Dans la présente étude, la matrice indique une précision générale de 87,74% et un coefficient Kappa de 0,85 donc classé dans la catégorie d'accord parfait. Il faudra néanmoins relever quelques confusions interclasses entre steppe-culture (23,91%) d'une part et d'autre part entre culture-savane (11,65%) et culture-steppe (17,27%). Ces confusions interclasses entre ces trois unités s'expliquent par l'imbrication de ces entités les unes aux autres. En effet, les savanes, sous forme dégradées et

les zones de culture non exploitées sur deux à trois ans, se confondent à la steppe.

Les superficies (en hectare) et les proportions de chaque classe d'occupation du sol sont reportées au tableau 2.

Tableau 2 : Superficie des unités d'occupation du sol du Département du Chari en 2025

Classe	Superficie en hectare	Pourcentage (%)
Savane et plantations	89 675,08	33,90
Steppe	44 949,23	16,99
Culture	81 490,16	30,80
Plaine inondable	44 499,17	16,82
Plan d'eau	3 441,58	1,30
Sol nu	481,36	0,18
Total	264 536,58	100

La distribution des principales unités d'occupation du sol pour l'année 2025 dans le Département du Chari font ressortir les informations suivantes (figure 6) :

- ✓ Les zones de savane et plantations (vergers) représentent près de 34%, soit plus d'un tiers de la superficie du Département. Cette classe qui englobe la savane arbustive à arborée ainsi que des vergers représente la passerelle entre les terrains naturels et agricoles, ce qui est crucial pour la biodiversité et la production de bois-énergie. En effet, le verger est dominant dans le paysage alors que la savane se résume à quelques arbres et arbustes isolés ou en bosquet.
- ✓ Les zones de culture couvrent près de 31%, soit le deuxième tiers du Département et emboîtent le pas à la savane et plantations, avec lesquelles, elles dominent

largement le territoire. Cela illustre l'importance de l'agriculture pluviale, de décrue et irriguée dans la région, en particulier pour les céréales (mil, sorgho) et les cultures de légumes qui s'étendent le long des fleuves Chari, Logone et autres cours d'eau plans d'eau temporaires.

- ✓ La plaine inondable représente 16,82% du Département. Ces régions de basse altitude, sont régulièrement inondées par les crues des fleuves et contribuent significativement à la recharge des nappes alluviales. Elle présente une opportunité pour l'agriculture de décrue (riz, sorgho de décrue et culture maraîchère).
- ✓ La steppe, à 16,99%, co-domine avec la plaine inondable dans les mêmes proportions. Ces zones semi-arides, renfermant les jachères et les formes de dégradation avancées des savanes arbustives, elles constituent des lieux de pâturages et d'herbages appuyant l'élevage extensif. Elles se situent principalement en périphérie de la plaine.
- ✓ Plan d'eau ne représentent que 1,30% au moment de la prise de vue de l'image, les mares étant soit asséchées, soit enherbées et classées avec les plaines inondables. Cette unité est constituée des rivières, des mares, de bras morts et de retenues artificielles renfermant de l'eau libre. Elles jouent un rôle crucial pour la pêche, l'irrigation et l'utilisation domestique.
- ✓ Les sols nus couvrent moins de 1% car ne représentent que les zones sableuses en bordure des cours d'eau ou les lieux complètement dénudés dans les habitations.

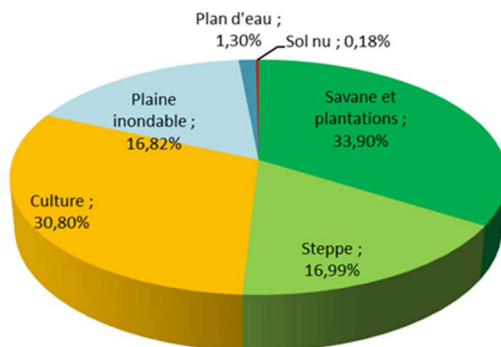


Fig.6 : Proportion des classes d'occupation du sol du Département du Chari en 2025

Toutes les unités d'occupation du sol du Département du Chari sont conquises par les activités anthropiques : l'agriculture, l'élevage la pêche, l'artisanat et l'habitat. Il est important d'entreprendre l'aménagement complet de ce Département qui est situé proche de la Capitale du Tchad pour limiter la perte de la biodiversité, le risque d'engloutissement dans la capitale (urbanisation) ou encore la colonisation du paysage par toutes sortes de cultures (pluviale, décrue, irriguée, etc.).

3.2. Paramètres physico-chimiques des eaux souterraines

3.2.1. Paramètres physiques

Lors de campagne du terrain, les paramètres physiques mesurés sont la température, le potentiel d'hydrogène et la conductivité.

✓ Température

Elle a été mesurée à l'aide d'un multi paramètre, introduite dans l'eau contenue dans un récipient. D'après les résultats, elle varie d'un point d'eau (Forage) à un autre, précisément entre : 32,8°C et 35,4°C avec une moyenne de 34,1°C (figure 7). La température moyenne des eaux mesurées (34,1 °C) reste relativement stable

dans la zone, ce qui est conforme au climat chaud semi-aride de la zone d'étude. Cependant, ces valeurs restent légèrement supérieures à la norme OMS (25 à 30°C).

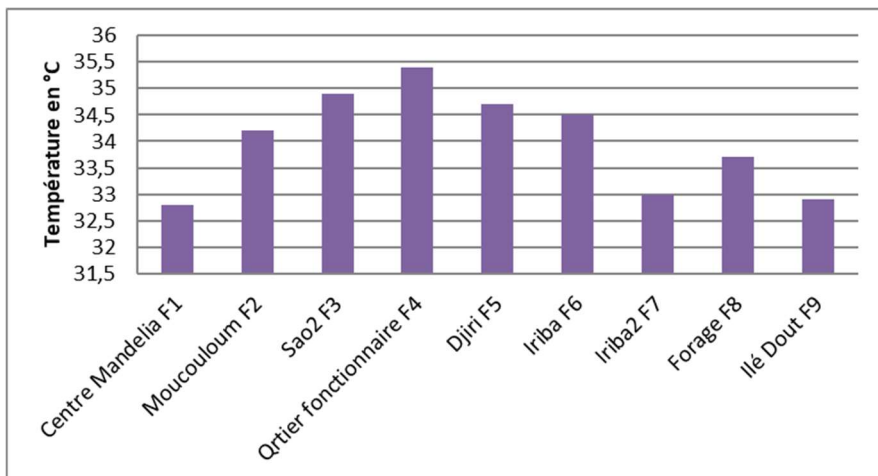


Fig.7 : Variation de la température dans les différents forages

✓ Potentiel d'hydrogène (pH)

Il est également déterminé à l'aide de multi paramètre. Le potentiel d'hydrogène (pH) permet de connaître le degré d'alcalinité ou de basicité. Le pH mesuré varie de 6,81 à 7,26 avec une moyenne de 7,035 (figure 8).

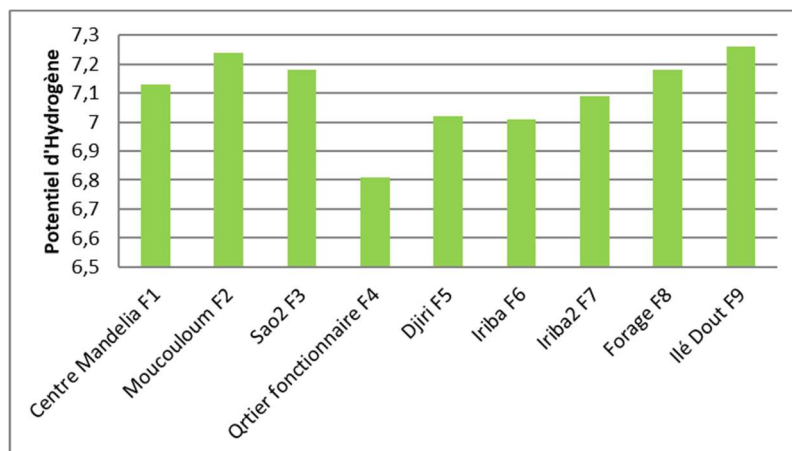


Fig.8 : Variation du Potentiel d'Hydrogène dans les différents forages

Le pH, oscillant autour de 7,035, indique une eau globalement neutre à légèrement basique, ce qui est caractéristique des aquifères alluviaux peu profonds en contexte sédimentaire. Ces valeurs sont conformes à la norme indiquée par l'OMS pour le potentiel d'hydrogène (6,5- 8,5).

✓ **Conductivité électrique**

La conductivité constitue un indicateur de la minéralisation globale des eaux. Elle varie de 133 à 545 μ S/cm avec une moyenne de 339 μ S/cm (figure 9).

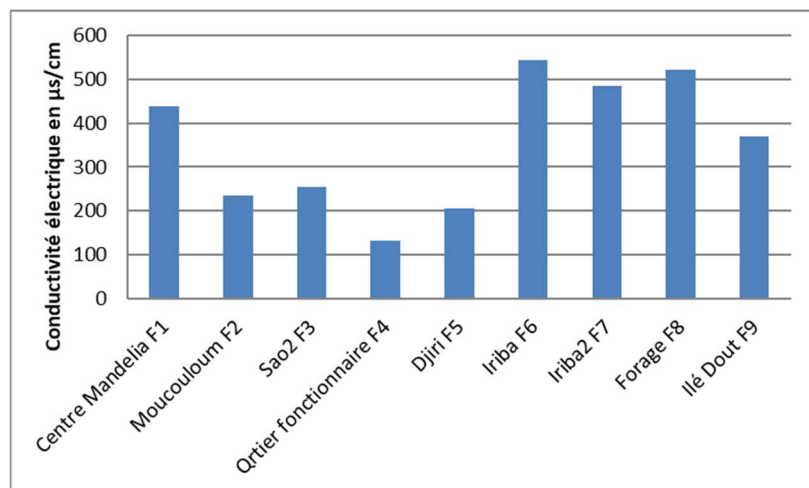


Fig.9 : Variation de la conductivité électrique des différents forages

La conductivité électrique des eaux est traduite comme la capacité à conduire le courant électrique. Elle est tributaire des formations traversées dans le bassin hydrogéologique ainsi que par le temps de séjour dans le réservoir. Sa mesure renseigne sur la minéralisation de l'eau et la teneur des sels dissous dans l'eau. Sa valeur varie de 133 à 545 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ce qui traduit une hétérogénéité de la composition minérale des sols et des apports anthropiques (domestiques ou agricoles). Les valeurs les plus élevées sont enregistrées dans les zones à proximité d'activités agricoles intensives (Iriba, F6, Forage 8, Iriba 2 F7, Mandélie centre F1) et d'habitats denses, ce qui laisse supposer des infiltrations de sels dissous. Toutefois, ces valeurs sont largement en-dessous de la norme OMS (2017) qui est de 2500 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

3.2.2. Paramètres chimiques

✓ Teneurs en cations

Le tableau 3 présente les teneurs en cations. Il en ressort les informations suivantes :

- Le magnésium (Mg^{2+}) varie entre **1,48 mg/L (forage 5)** et **3,14 mg/L (forage 2)**,
- Le calcium (Ca^{2+}) varie entre **2,4 mg/L (forages 4 et 6)** et **4,81 mg/L (forages 5 et 8)**.
- Le potassium (K^+) présente des valeurs plus contrastées, de **1,5 mg/L (forage 2)** à **14,3 mg/L (forage 9)**, ce qui pourrait indiquer des apports anthropiques (fertilisants potassiques) ou des influences lithologiques locales.
- Le sodium (Na^+) varie de **4,01 mg/L (forage 9)** à **16,1 mg/L (forage 5)**, témoignant d'une dissolution différentielle des feldspaths et/ou d'un enrichissement lié aux zones cultivées.

Tableau 3 : Evolution des teneurs en cation

Echantillon	Mg^{2+} (mg/L)	K^+ (mg/L)	Ca^{2+} (mg/L)	Na^+ (mg/L)
Centre Mandéla forage 1	2,14	1,7	4,4	6,2
Moucouloum forage 2	3,14	1,5	2,4	4,2
Sao 2 forage 3	2,48	1,9	3,21	5,3
Qtier fonctionnaire forage 4	2,18	2,9	2,4	11,5
Djiri forage 5	1,48	4,9	4,81	16,1
Iriba forage 6	1,54	3,1	2,4	9,3
Iriba 2 forage 7	2,48	3,2	3,21	10
Forage 8	2,12	6,3	4,81	11
Ilé Dout forage 9	1,5	14,3	4,01	13

✓ Teneurs en anions

Le tableau 4 présente les teneurs en anions. Il en ressort les informations suivantes :

- Les concentrations en chlorures (Cl^-) sont très faibles (0–1,33 mg/L), indiquant une faible influence d'apports salins ou anthropiques.

- Les sulfates (SO_4^{2-}) montrent une variabilité marquée, allant de **0 mg/L (forage 6)** à **7,33 mg/L (forage 7)**.
- Enfin, les nitrates (NO_3^-) sont compris entre **0,3 mg/L (forages 6 et 8)** et **4,37 mg/L (forage 7)**. Bien que ces valeurs soient inférieures au seuil OMS (50 mg/L), leur variabilité témoigne d'apports localisés liés aux activités agricoles.
- Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-) oscillent entre 2,4 et 13,8 mg/L.

Tableau 3 : Evolution des teneurs en anions

Echantillon	HCO_3^- (mg/L)	Cl^- (mg/L)	SO_4^{2-} (mg/L)	NO_3^- (mg/L)
Centre Mandéla forage 1	7	0,13	7	0,83
Moucouloum forage 2	7,9	0,23	1	0,73
Sao 2 forage 3	11,3	0,1	1	0,73
Qtier fonctionnaire forage 4	3,4	0,23	1	0,6
Djiri forage 5	8,5	0,7	5	4
Iriba forage 6	13,8	0	0	0,3
Iriba 2 forage 7	3,9	1,33	7,33	4,37
forage 8	2,4	0,33	2	0,3
Ilé Dout forage 9	3,7	0,17	1	0,63

Du point de vue chimique, les ions prédominants (Na^+ , HCO_3^- , Ca^{2+} , K^+) sont typiques d'eaux souterraines issues de formations sédimentaires alluviales :

- Les teneurs en sodium (Na^+) varient de 4,2 à 16,1mg/L avec une moyenne de 10,05 mg/L, ces valeurs restent conformes à la norme OMS, 2017 ($\text{Na}^{2+} \leq 200\text{mg/L}$). Cette concentration dans les eaux pourrait être liée à la dissolution des argiles sodiques ou aux pratiques culturales (engrais potassiques ou intrants organiques).
- Les teneurs en Calcium (Ca^{2+}) sont variables de 2,4 à 4,81mg/L et restent en conformité avec celles de l'OMS ($\text{Ca}^{2+} \leq 200\text{mg/L}$).

- Les teneurs en Magnésium (Mg^{2+}) quant à elles, varient de 1,5 à 3,14mg/L, avec une moyenne de 2,11mg/L, ce qui reste cependant inférieur à la norme OMS.
- Les concentrations en potassium (K^+) mesurées dans les échantillons (1,5 – 14,3 mg/L) sont largement inférieures aux niveaux pouvant poser un risque pour la santé (OMS, 2017). Sur le plan géochimique, la présence de K^+ dans les eaux souterraines est généralement liée à la dissolution des silicates potassiques (feldspaths, micas) et à la décomposition de la matière organique, les teneurs en potassium observées sont également faibles à modérées, reflétant une minéralisation limitée et une recharge récente, Mahamat Nour et al. (2021).
- Les teneurs en bicarbonates (HCO_3^-) oscillent entre 2,4 et 13,8 mg/L. La dominance de l'ion HCO_3^- , même à de faibles concentrations, traduit une minéralisation de type carbonatée caractéristique des eaux récentes. Ces valeurs demeurent très en deçà des limites recommandées par l'OMS, confirmant l'absence de risque sanitaire.
- Les sulfates présentent des concentrations variant de 0 à 7,33 mg/L. Ces teneurs modestes. L'absence de valeurs élevées exclut un apport anthropique marqué (eaux usées, effluents industriels), ce qui souligne la bonne qualité chimique de la ressource.
- Les nitrates se situent entre **0,63 et 4,37 mg/L**, valeurs largement inférieures au seuil de potabilité fixé à 50 mg/L par l'OMS. La présence, même faible, de nitrates témoigne généralement d'un apport exogène, lié soit aux pratiques agricoles (engrais azotés), soit à l'infiltration d'eaux usées domestiques. Toutefois, les niveaux observés restent bas, traduisant une pollution azotée limitée et un environnement

relativement préservé. Cela suggère également une bonne capacité d'autoépuration des sols.

- Les teneurs en chlorures varient entre 0 et 1,33 mg/L, confirmant une très faible minéralisation en sels. L'ion chlorure, souvent indicateur de contamination d'origine anthropique (latrines, lessivage des déchets, eaux usées) ou marine (intrusion saline), apparaît ici insignifiant. Cela souligne l'absence d'influence saline et une pollution anthropique limitée.

Conclusion

L'étude conclut que les ressources en eaux souterraines du département du Chari (Mandélie) présentent globalement une bonne qualité physico-chimique, conforme aux normes de l'OMS pour la consommation humaine. Les analyses montrent une faible minéralisation et une absence de pollution chimique majeure, malgré une pression anthropique croissante. Cependant, l'analyse de l'occupation du sol par télédétection révèle une expansion des zones de cultures (29,4 %) et des tissus urbains (0,6 %), ce qui pourrait constituer une menace à long terme pour la préservation de cette ressource si une gestion planifiée de l'espace n'est pas mise en œuvre. Face à une pression démographique croissante, l'utilisation des SIG et l'images satellitaires Sentinel-2 de février 2025 cartographie avec précision l'usage des terres. L'analyse révèle six classes principales, dominées par les savanes et plantations (33,9 %) et les zones de cultures (30,8 %), suivies des steppes et des plaines inondables. Parallèlement, la qualité physico-chimique de l'eau a été évaluée à travers onze échantillons de forage. Les mesures in situ indiquent une température moyenne de 34,1 °C, un pH neutre de 7,035 et une conductivité électrique de 339 µs/cm. Si le pH et la conductivité respectent les normes de l'OMS, la température s'avère légèrement supérieure aux seuils recommandés. Les analyses chimiques montrent de faibles concentrations en chlorures, nitrates

et sulfates, confirmant une pollution anthropique actuellement limitée. Cependant, l'étude souligne la nécessité d'une surveillance accrue, particulièrement dans les zones agricoles, pour prévenir toute infiltration future de polluants et garantir une gestion durable des ressources hydriques de la région.

Bibliographie

AgroTIC, 2018 : Télécharger une image du Satellite Sentinel-2 sur la plateforme de Copernicus. Tutoriel 11p.

Bonn et Rochon, 1993. Précis de télédétection : principes et méthodes. Volume 1. Presses de l'Université du Québec. Sainte-Foy. 485 p.

Bouderka Nouzha, SOUID Ahmed Kacem, Lakhili Ferdaouss, Lahrach Aberrahim Et Benabdelhadi Mohammed. 2016. Évaluation de l'impact de la pollution agricole sur la qualité des eaux souterraines de la nappe du gharb : European Scientific Journal, v. 12, no. 11.

Centre Canadien de Teledetection :

http://www.ccrs.nrcan.gc.ca/resource/tutor/fundam/index_f.php

Chalifoux S., Nastev M., Lamontagne C., Latifovic R., Fernandes R., 2006. Cartographie de l'occupation et de l'utilisation du sol par imagerie satellitaire landsat en hydrogéologie. Télédétection, 2006. 6 (1) : 9-17.

Cherel J.P., 2010. Classification d'image de télédétection. Support de cours M1 SIIG3T. Traitement d'image. 13 p.

Dongo, K., Kouamé, K.F. and Koné, B., 2008 Analyse de la situation de l'environnement sanitaire des quartiers défavorisés dans le tissu urbain de Yopougon à Abidjan, Côte d'Ivoire. Vertigo, 8, 1-11. <https://doi.org/10.4000/vertigo.6252>

Foster S.S.D. and Chilton P.J. 2003: Groundwater: the processes and global significance of aquifer degradation; Phil. Trans. R. Soc. Lond. B2003 358, 1957 – 1972 doi:10.1098/rstb.2003.1380

Keddal Hassan et N'dri Jean Yao. 2008. Impacts de l'intensification agricole sur la qualité des eaux de surface et des eaux souterraines. *Journal of Agricultural Chemistry and Environment*. Vol 1 no.2, p13–29.

Lacombe J-P. 2007. Initiation au traitement d'images satellitales. Travaux dirigés. Cahier2. E.N.S.A. Toulouse 92 p.

Mahamat Nour Abdallah, Moussa Abderamane, Abderamane Hamit and Adil Bangba Frederic. 2021. Contribution to the hydrochemical knowledge of aquifers in the Department of Tandjilé-East, Southern Chad, *International Journal of advanced Research*, ISSN 2320-5407, doi :10.21474/ijar01/13718, p. 102–110.

Mas J. F. 2000. Une revue des méthodes et des techniques de télédétection du changement. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 26 (4) : 349-362.

Margat, Jean, 2008 : Exploitations et utilisations des eaux souterraines dans le monde VL - 52 Coédition : UNESCO et BRGM 185 p.

Morineau A. La classification accessible sur www.deenov.com

Nguimalet Cyriaque Rufin, Mahe Gil, Laraque Alain, Orange Didier, Et Yakobou Boris Modeste. 2016. Note sur le changement climatique et gestion des ressources en eau en Afrique : repenser l'usage et l'amélioration des services écosystémiques de l'eau : *Géo-Eco-Trop*, v. 40, no. 4, p. 317–326.

Normes

OMS :

<https://www.lenntech.fr/applications/potable/normes/normes-oms-eau-potable.htm>

Opitz-Stapleton, S., Laville, C., Barsham, H., Gulati, M. 2024 *Gestion du risque climatique au Tchad*. Londres : Soutenir le Pastoralisme et l'Agriculture durant les Crises Récurrentes et Prolongée (SPARC) (<https://www.sparc-knowledge.org/>)

publications-resources/etat-de-preparation-du-tchad-laces-
aufinancement-climatique).

Pias J. 1970. La végétation du Tchad. Ses rapports avec les sols. Variations paléobotaniques au Quaternaire. Travaux et Documents de l'ORSTOM N° 6, Paris 1970. 49p.

Pontius Jr. R. G., 2000. Quantification error versus location error in comparison of categorical maps. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 66 (8): 1011-1016.

Rodier Jean, Bernard Legube et Nicole Merlet. 2009. Analyse des eaux ; 9ème Edition DUNOD ; 1579P. 2009. Analyse de l'eau. 9è Ed. Dunod. Paris. ISBN 978_2-10-054179-9 p149,3.