

REPUBLIQUE DU CAMEROUN

Paix-Travail- Patrie

UNIVERSITE DE YAOUNDE I

FACULTE DES SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES

DE LA TERRE



REPUBLIC OF CAMEROON

Peace-Work-Fatherland

UNIVERSITY OF YAOUNDE I

FACULTY OF SCIENCE

DEPARTMENT OF EARTH

SCIENCES

DEPARTEMENT DES SCIENCES DE LA TERRE

DEPARTMENT OF EARTH SCIENCES

LABORATOIRE DE GEOSCIENCES DES FORMATIONS SUPERFICIELLES ET

APPLICATIONS

LABORATORY OF GEOSCIENCES OF SUPERFICIEL FORMATION AND

APPLICATIONS

**ETUDE DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES
DE LA LOCALITÉ D'ABECHE (EST DU TCHAD)**

Option : Géosciences des Formations Superficielles et Applications

Spécialité : Hydrogéologie

ABDERAHIM TAHIR AHMAT

Matricule : 23T2810

Licencié-es-Sciences de la Terre

Sous la Direction de

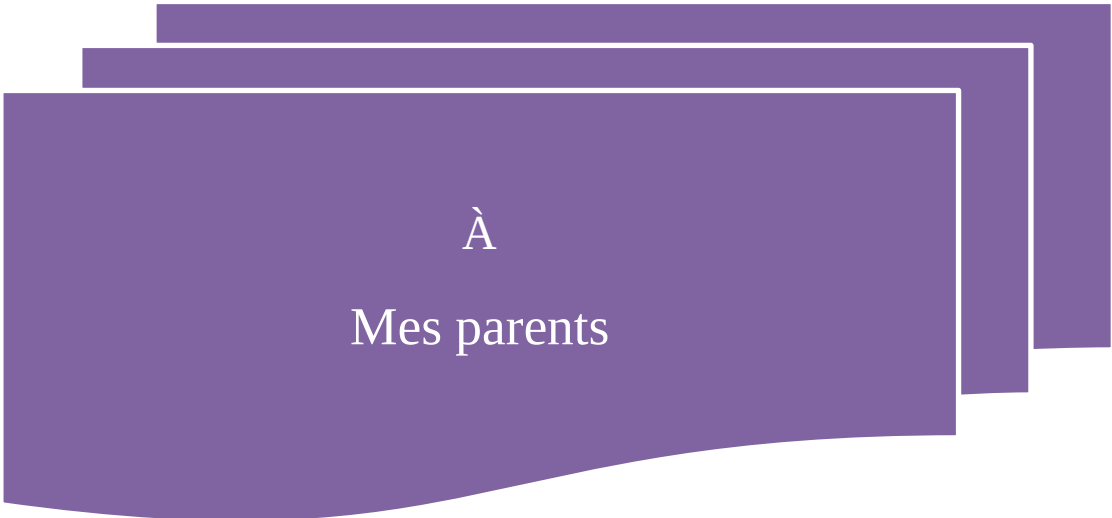
Dr FEUMBA Roger

Chargé de Cours

Université de Yaoundé I



année académique 2024-2025



À
Mes parents

REMERCIEMENTS

Tout d'abord je tiens à rendre grâce à Dieu pour les bienfaits accomplis dans ma vie et pour m'avoir accordé tous ces éléments auxquels j'ai eu recours.

J'exprime ma profonde reconnaissance au Dr FEUMBA Roger, spécialiste eau et assainissement, Hydrogéologue et Chargé de Cours au Département des Sciences de la Terre de l'Université de Yaoundé I, dont je reconnais la rigueur dans l'encadrement scientifique, pour avoir accepté de diriger ce travail avec une attention particulière. Je lui adresse ma profonde gratitude pour son soutien multiforme, sa disponibilité, ses critiques et suggestions sans lesquels l'aboutissement de ce travail serait incertain.

Ma formation est le fruit de l'investissement constant de mes enseignants, à qui je consacre ces lignes en signe de profonde gratitude. Je tiens à exprimer toute ma reconnaissance à l'Université de Yaoundé I qui m'a accueilli et formé, à tout le corps enseignant et en particulier du Département des Sciences de la Terre. Il s'agit notamment de (s) :

Professeur BISSO Dieudonné, Chef de Département des Sciences de la Terre, je tiens à vous remercier pour vos conseils, orientations et pour votre leadership inspirant et votre dévouement envers l'excellence académique.

Professeurs : NDJIGUI Paul-Désiré, Vice-Doyen en charge de la programmation et du suivi des activités académiques de la Faculté des Sciences, YONGUE Rose, NKOUMBOU Charles, NGOS III SIMON, NDAM NGOUPAYOU Jules Rémy, YENE ATANGANA, GANNO Sylvestre, ONANA Vincent Laurent, TCHOUANKOUE Jean Pierre, NGUEUTCHOUE Gabriel, NGO BIDJECK Louise Marie, Elisé SABABA, TEMGA Jean Pierre, NOMO NEGUE Emmanuel, TCHAPTCHET TCHATO Depesquidoux I, NUMBEN TCHAKOUNTE Jacqueline ;

Docteurs : KOAH NALEBOGO Serge Parfait, NGO'O ZE Arnaud, ANABA ONANA Achille, MBANGA NYOBE Jules.

Je n'ose oublier mes enseignants de l'Université ADAM BARKA d'ABECHE qui ont jeté les bases de ma formation scientifique au premier cycle universitaire. Il s'agit notamment du Docteur HAMADOU Abdou, Chef de Département de Géologie ; Mr MOUSTAPHA Dinar Ibrahim et à tous ceux dont les noms ne figurent pas, que ce travail soit le fruit de leurs onéreux efforts.

À mes chers parents ACHTA ADOUM DOUTOUM et TAHIR AHMAT BADAOU. Ma chère grand-mère KHADIDJA ISSA, mes frères et sœurs, mes tantes et oncles et à toute la famille pour leurs sacrifices, leur tendresse, leur soutien, leurs prières et leur encouragement tout au long de la réalisation de ce travail.

J'adresse également mes sincères remerciements au responsable du Laboratoire National des Eaux d'Abéché Mr ASSAD MAHAMAT ISSA et le technicien Mr RAHAMA DJEMET MAHAMAT et Mr TCHOUBEUBE Nicanor, Technicien de laboratoire en géotechnique de la société

Arab Contractor d'Abéché pour leur suivi et leur climat de confiance durant cette période des analyses.

À mes aînés académiques et frères ABBAS Hassan, YOUSSEF Amir, KHALID Annour, OUMAR Ibrahim pour vos encouragements et conseils.

Mes remerciements vont droit à mon frère et ami MAHAMAT AMINE ALI MALIK pour son soutien, son encouragement et son assistance morale même dans les moments difficiles.

À tous mes camarades de promotion et confrères de Yaoundé, qu'ils perçoivent mes sincères remerciements.

À tous ceux et celles qui m'ont aidé et encouragé de près ou de loin dans la réalisation de ce travail, et qui n'ont pas été nommément cités. Veuillez recevoir l'expression de ma gratitude.

TABLES DES MATIERES

REMERCIEMENTS	ii
TABLES DES MATIERES	iv
LISTES DES FIGURES	vii
LISTES DES TABLEAUX	viii
SIGLES ET ABREVIATIONS	ix
RESUME	x
ABSTRACT	xi
INTRODUCTION GENERALE	1
CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE	3
I.1. Localisation de la zone d'étude	3
I.2. Contexte climatique	4
I.2.1. Précipitations	4
I.2.2. Températures	4
I.2.3. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1957)	4
I.3. Sols	5
I.4 Végétation	5
I.5 Hydrographie	6
I.6 Hydrogéologie	7
I.6.1 Nappes des altérites et alluviales	7
I.6.2. Nappes des fissures et/ou des fractures	7
I.7. Orographie	8
I.8 Géologie	9
I.8.1. Cadre géologie régionale	9
I.8.1.2. Les formations Sédimentaires	10
I.8.2. Cadre géologique locale	12
I.9. Milieu socio-économique	13
I.9.1 Démographie et développement urbain	13
I.9.2. Activité économique	13
I.10. Travaux antérieurs portant sur l'Hydrodynamique	13

I.10.1. Piézométrie-----	14
I.10.2. Perméabilité ou conductivité hydraulique (K) -----	14
I.10.3. Les mécanismes de recharge de la nappe libre -----	14
CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES-----	16
II.1. Travaux de terrain -----	16
II.1.1 Reconnaissance du site, recensement, sélection de points d'eau et détermination du bilan hydrique et hydrologique -----	16
II.1.2 Suivi piézométrique -----	18
II.1.3 Prélèvement et conditionnement des échantillons d'eau -----	19
II.1.4. Sélection et échantillonnage des Sols-----	19
II.2. Travaux de laboratoire -----	20
II.2.1. Analyses des paramètres chimiques des eaux -----	20
II.2.2. Caractéristiques physiques des sols et hydrodynamiques-----	21
II.2.2.1. Caractéristiques physiques des sols -----	22
II.2.2.1.2. Poids et rapports volumiques -----	22
II.2.2.1.3. Essai de la teneur en eau-----	22
II.2.2.1.4. Limite d'Atterberg -----	22
II.2.2.2. Hydrodynamique du système aquifère -----	23
CHAPITRE III : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS-----	24
III.1. Caractérisations hydrologique physique et hydrodynamique -----	24
III.1.1. Paramètres hydrologiques -----	24
III.1.2. Paramètres physiques de sol -----	25
III.1.2.1. Granulométrie -----	25
III.1.3.2. Teneurs en eau et les caractéristiques physiques de sols-----	26
III.1.3.3. Limites d'Atterberg -----	27
III.1.4. Paramètres hydrodynamiques-----	27
III.2. Aspects piézométriques-----	28
III.2.1. Caractérisation piézométrique -----	28
III.2.2. Cartes piézométriques-----	29
III.2.3. Mécanisme de la recharge -----	31
III.3. Caractérisations physico-chimiques des Eaux-----	32
III.3.1 Paramètres physiques -----	32
III.3.2. Paramètres chimiques des eaux-----	32

III.3.2.1. Cations majeurs et sommes des équivalents cations (TZ+)	32
III.3.2.2. Anions majeurs et sommes des équivalents anions (TZ-)	33
III.3.2.3. Éléments en traces	33
III.3.2.4. Balance ionique	33
III.3.2.5. Faciès chimiques	34
III.3.2.5.1. Projection sur le Diagramme de Piper	34
III.3.2.5.2. Projection sur le Diagramme de Schoeller-Berkalof	35
III.3.2.5.3. Projection sur le Diagramme de Riverside et Wilcox	35
III.4. Interprétation des résultats	37
CHAPITRE IV : DISCUSSION DES RESULTATS	41
IV.1. Hydrodynamique	41
IV.1.1. Perméabilité ou conductivité hydraulique	41
IV.1.2. Fluctuation de nappe	41
IV.1.3. Cartes piézométriques	41
IV.2. Hydrochimiques	42
IV.2.1. Paramètres physiques	42
IV.2.2. Éléments chimiques	43
IV.2.3. Faciès hydrochimiques	44
CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	45
PERSPECTIVES	46
REFERENCES	47
ANNEXES	52

LISTES DES FIGURES

Figure : 1 Localisation de la zone d'étude-----	3
Figure 2 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957) -----	5
Figure 3 : Végétation de la zone d'étude -----	6
Figure 4 : Carte du réseau hydrographique -----	6
Figure 5 : Diagramme schématique des propriétés aquifères des principaux ensembles géologiques (source : RESEAU, 2016)-----	8
Figure 6 : Carte orographique en 2D et 3D de la zone étudiée (STRM image) -----	9
Figure 7 : Carte géologique régionale (Source BRGM-2009, conception P_SIDRAT 2012) -----	11
Figure 8 : Carte géologique locale (Source BRGM-2009, conception P_SIDRAT 2012) -----	12
Figure : 9 Carte des ouvrages recensés -----	18
Figure 10 : Mesure in-situ des paramètres physiques de l'eau -----	18
Figure 11 : Mesure du niveau d'eau -----	19
Figure 12 : Carte d'échantillonnage des sols -----	20
Figure 13 : Matériels utilisés en laboratoire -----	21
Figure 14 : Diagramme du bilan hydrologique d'Abéché (1991-2021)-----	25
Figure 15 : Courbes granulométriques des matériaux de la localité d'Abéché-----	26
Figure 16 : Carte piézométrique de hautes eaux -----	30
Figure : 17 Carte piézométrique de basses eaux -----	30
Figure :18 Carte piézométrique de fluctuation des eaux -----	31
Figure : 19 Interaction entre l'eau de surface et souterraine -----	31
Figure 20 : Balance ionique des eaux souterraines -----	34
Figure 21 : Diagramme de Piper des eaux souterraines de la zone d'étude-----	34
Figure 22 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux souterraines de la zone d'étude -----	35
Figure 23 : Répartition des eaux dans le Diagramme de Riverside -----	36
Figure 24 : Répartition des eaux dans le Diagramme de Wilcox-----	36
Figure 25 : Histogramme de fluctuation des niveaux piézométriques -----	38
Figure 26 : Diagramme de pourcentage des Cations et Anions -----	39
Figure 27 : Puits à côté d'un dépotoir des ordures ménagères-----	39
Figure 28 : Eau du puits en contact avec la roche -----	39

LISTES DES TABLEAUX

Tableau 1 : Données climatiques d'Abéché de 1991-2021 -----	4
Tableau 2 : Eléments du bilan hydrologique (1991-2021) par la méthode de Thornthwaite--	24
Tableau 3 : Bilan hydrologique (année moyenne 1991-2021) de la zone étudiée -----	24
Tableau 4 : Composition granulométrique des échantillons -----	25
Tableau 5 : Valeurs des teneurs en eau initiales -----	26
Tableau 6 : Valeurs des limites d'atterberg-----	27
Tableau 7 : Valeurs des perméabilités &porosités efficaces -----	27
Tableau 8 : Synthèse des données piézométriques du bassin versant d'Abéché -----	28
Tableau 9 : Variations statistiques des paramètres physiques -----	32
Tableau 10 : Variations statistiques des paramètres chimiques (ions majeurs) -----	33
Tableau 11 : Variations statistiques des éléments en trace -----	33

SIGLES ET ABREVIATIONS

AASHTO: American Association for State Highways and Transportation official

BRGM : Bureau des Recherches Géologiques et Minières

GPS : Global Positioning System

ENSA : Ecole Normale Supérieure d'Abéché

INSEED : Institut National de la Statistique, des Etudes Economiques et Démographiques

IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change

IUNSTA : Institut Universitaire Nationale des Sciences Techniques d'Abéché

LNE : Laboratoire National des Eaux

OMS : Organisation Mondiale de la Santé

PHPTC : Programme d'Hydraulique Pastorale au Tchad Central

SDEA : Schéma Directeur de l'Eau et de l'Assainissement

STE : Société Tchadienne des Eaux

STRM : Shuttle Radar Topography Mission (image Raster)

UNABA: Université Adam Barka d'Abéché

USCS: Unified Soil Classification System

WHO: World Health Organization

RESUME

La localité d'Abéché (Est du Tchad) se situe au centre du bassin versant du Ouadi chao, entre les parallèles 13°48' et 13°50' de latitude Nord et les méridiens 20°48' et 20°52' de longitude Est. Sa superficie est de 3600 ha et son altitude moyenne est de 615 m. Les travaux de terrain et de laboratoire menés conjointement ont consisté à l'identification et au suivi piézométrique des ouvrages (puits), aux échantillonnages des sols et des eaux pour les analyses de la granulométrie, des limites d'Atterberg, les caractéristiques physiques et des paramètres physico-chimiques. À l'issue de ces travaux, l'analyse granulométrique des sols de la localité montre une forte proportion des sols en fractions graveleuses mais aussi une faible proportion des sols en fractions fines. Ces matériaux ont des valeurs d'indice de plasticité qui varie de 2,7 à 10,26 et des indices de consistances qui sont supérieurs à l'unité. Cette forte proportion de fractions graveleuses confère au sol un comportement grossier caractérisé par une perméabilité élevée comprise entre $4,3 \cdot 10^{-3}$ et 10^{-2} m/s. Les mesures des niveaux statiques varient entre 2,60 et 33 m de profondeur et les niveaux piézométriques varient entre 513,6 et 540,88 m. Les fluctuations vont de 0,16 à 21 m. Les faibles fluctuations sont observées dans les bas-fonds tandis que les plus fortes sont observées au sommet de collines. L'analyse des cartes piézométriques montre deux types d'écoulement souterraines (convergent et divergent). La carte piézométrique maximale réalisée grâce au logiciel surfer 12 a permis de localiser les zones d'alimentations et les zones de stockages ainsi que le sens d'écoulement des eaux qui est du NE vers SW. Le bilan hydrique établi montre que la nappe se recharge en août sous l'action de l'excédent pluviométrique. Les analyses physico-chimiques montrent que les eaux sont dans l'ensemble neutre à légèrement basiques ($7,06 \leq \text{pH} \leq 8,17$) avec des minéralisations faibles à excessives ($225 \mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{CE} \leq 4590 \mu\text{S}/\text{cm}$). Tous les éléments chimiques analysés sont dans la gamme prescrite par l'OMS, à l'exception du potassium (K) de l'échantillon BGP44 qui présente une concentration supérieure à la norme de l'OMS. La répartition synthétique des ions majeurs dans le diagramme de Piper montre les faciès chimiques dominant qui sont de type chloruré et sulfaté calcique et/ou magnésien. La représentation des différents échantillons dans le diagramme de Wilcox montre que les eaux de la zone sont de qualité excellente et bonne pour l'irrigation, exceptée ceux des puits **KMP36** et **BGP44** qui sont médiocres et mauvaises. L'évaluation de la qualité des eaux pour la consommation humaine est faite par la comparaison des valeurs des différents paramètres physico-chimiques des eaux de la localité à celles admises dans les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). De ce fait l'on peut retenir que les eaux de la zone sont bonnes pour la consommation humaine selon les normes de l'OMS, mais également nécessitent un traitement et aptes pour l'irrigation.

Mots clés : Aquifère libre, hydrodynamique, piézométrie, hydrochimie, Localité d'Abéché.

ABSTRACT

The locality of Abéché (eastern Chad) is located in the center of the ouadi chao watershed, between the parallels 13°48' and 13°50' north latitude and the meridians 20°48' and 20°52' east longitude. Its surface area is 3600 ha and its average altitude is 615 m. The field and laboratory work carried out jointly consist of the identification and piezometric monitoring of structures (wells), soil and water sampling for analyses of particle size, Atterberg boundaries, physical characteristics and physicochemical parameters. At the end of this work, the particle size analysis of the soils in the locality shows a high proportion of soils in gravelly fractions but also a small proportion of soils in fine fractions. These materials have plasticity index values that vary from 2.7 to 10.26 and consistency indices that are greater than unity. This high proportion of gravelly fractions gives the soil a coarse behaviour characterised by a high permeability of between $4.3 \cdot 10^{-3}$ and 10^{-2} m/s. Static level measurements vary between 2.60 and 33 m deep and piezometric levels vary between 513.6 and 540.88 m. The fluctuations range from 0.16 to 21 m. The small fluctuations are observed in the shallows, while the strongest are observed at the top of hills. The analysis of the piezometric maps shows two types of groundwater flow (convergent and divergent). The maximum piezometric map produced using the Surfer 12 software made it possible to locate the supply areas and storage areas as well as the direction of water flow, which is from NE to SW. The water balance established shows that the water table is recharged in August by the action of excess rainfall. Thus, the hydrodynamic behaviour of the aquifer is closely linked to rainfall fluctuations. Physico-chemical analyses show that the waters are generally neutral to slightly basic ($7.06 \leq \text{pH} \leq 8.17$) with low to excessive mineralisation ($225 \mu\text{S/cm} \leq \text{EC} \leq 4590 \mu\text{S/cm}$). All chemical elements analysed are within the range defined by WHO, with the exception of potassium (K) in the BGP44 sample, which has a concentration higher than the WHO standard. The representation of the major ions in the Piper diagram shows the dominant chemical facies which are of the chloride and sulphate calcium and/or magnesium type. The representation of the different samples in the Wilcox diagram shows that the water in the area is of excellent quality and good for irrigation, except for that from wells **KMP36** and **BGP44** which are mediocre and bad. The assessment of the quality of water for human consumption is carried out by comparing the values of the various physico-chemical parameters of the local water with those accepted in the standards of the World Health Organization (WHO). As a result, it can be noted that the waters of the area are good for human consumption according to WHO standards, but also require treatment and are suitable for irrigation.

Keywords: Unconfined aquifer, hydrodynamic, piezometry, hydrochemistry, locality Abéché.

INTRODUCTION GENERALE

Les eaux souterraines désignent l'ensemble des eaux que l'on trouve dans les pores des sols et dans les fissures des roches en profondeur. Elles jouent un rôle crucial dans notre environnement et notre vie quotidienne. Elles représentent une source d'eau potable essentielle pour de nombreuses communautés à travers le monde (Taylor et Howard, 2000). Elles fournissent environ 25% de l'eau douce disponible sur Terre (Marsily et Besbes 2017).

Cependant cette ressource limitée est de plus en plus menacée par le contexte actuel du changement global, marqué entre autres par une augmentation des températures et donc une augmentation de l'évapotranspiration, une modification des régimes de précipitations ainsi que par la pression anthropique qui se manifeste par la surexploitation et des pollutions de toute sortes. Ces facteurs pourraient conduire à une diminution de la recharge et à la dégradation de la qualité de l'eau (Gleeson et al., 2016 ; IPCC, 2014 ; Sagna et al., 2015). Il est donc essentiel de bien connaître cette ressource précieuse, de la préserver et de la gérer judicieusement pour assurer sa durabilité à long terme, qu'il s'agisse d'eaux souterraine ou de surface.

En zone sahélienne plus spécifiquement, la nappe phréatique représente la principale ressource en eau douce la plus accessible (Boucher et al., 2006). Cependant, dans la plupart des cas, cette ressource est extrêmement sensible aux variations climatiques et aux activités anthropiques.

Le Tchad avec 16877357 habitants (INSEED, 2020) dispose d'importantes ressources en eaux souterraines dont le taux d'exploitation est estimé annuellement à environ 20 milliards de m³ (BRGM, 1987, SDEA, 2001). Ces ressources sont localisées soit dans des systèmes aquifères continus, couvrant 75% du territoire, soit dans des aquifères discontinus ou socle (SDEA, 2001, Schneider, 2001).

La zone d'étude étant la localité d'Abéché, située en zone de socle où l'approvisionnement en eau dépend des aquifères fracturés et/ou fissurés. Le problème d'accès à l'eau potable y demeure particulièrement aigu et se manifeste de manière évidente. Le réseau de distribution de la STE (Société Tchadienne de l'eau), ne parvient pas à satisfaire l'ensemble des besoins en eau potable de la population. Ce problème d'approvisionnement est dû à :

- une forte croissance démographique de la ville d'Abéché (Dombor et Djébé, 2018) ;
- une faible extension du réseau de distribution de la STE.

Cette situation oblige la population à se retourner vers les eaux souterraines à travers les puits et les forages.

La ville d'Abéché a fait l'objet des quelques études incluant notamment l'hydrogéologie, la cartographie géologique (Abakar, 2015) et l'hydrochimie (Habib, 2023) qui ont permis jusqu'à nos jours de trouver un certain nombre de connaissances sur les ressources en eaux souterraines. Dès lors la présente étude intitulée « ETUDE DYNAMIQUE DES EAUX SOUTERRAINES DE LA

LOCALITÉ D'ABÉCHÉ (Est du Tchad) » trouve sa raison d'être dans la mesure où elle constitue un apport scientifique important à la connaissance de l'aquifère à nappe libre du bassin versant de la localité. Cette étude a pour objectif principal de comprendre la dynamique des eaux souterraines de la localité d'Abéché.

De manière spécifique, il s'agit de :

- caractériser les propriétés physiques et hydrodynamiques des formations de la localité ;
- déterminer les périodes de recharge et vidange de l'aquifère à nappe libre ;
- analyser les paramètres physico-chimiques des eaux souterraines de la localité.

Pour atteindre ces objectifs, une approche méthodologique a été mise en place :

- une revue bibliographique portant sur les méthodes et les travaux réalisés sur la piézométrie et l'hydrodynamique des zones de socle ;
- extraction de la localité d'Abéché sur un fond de carte topographique avec son image Raster (STRM) ;
- identification, sélection et suivi piézométrique des ouvrages ;
- mesure in situ des paramètres physiques des eaux ;
- prélèvements des échantillons de sols et des eaux pour les analyses de paramètres physiques de sols et les paramètres physico-chimiques des eaux.

Structure du mémoire :

Outre l'introduction et la conclusion générale le présent mémoire se présente comme suit :

- chapitre I s'intéresse à la présentation de la zone d'étude ;
- chapitre II présente les Matériels et les Méthodes ;
- chapitre III se focalise aux présentations des résultats et interprétations ;
- chapitre IV réservé aux discussions.

CHAPITRE I : PRESENTATION DE LA ZONE D'ETUDE

Introduction

Ce chapitre décrit et présente les aspects physique, socio-économique et les travaux antérieurs de la zone d'étude. Il s'agit premièrement de localiser la zone d'étude sur le plan régional, présenter le type de climat, la géologie, l'hydrologie, l'hydrogéologie, la pédologie et la végétation. Deuxièmement, mettre en lumière la démographie de la zone, l'économie, le développement urbain et enfin les travaux antérieurs.

I.1. Localisation de la zone d'étude

Située en Afrique centrale à l'Est du Tchad dans la province du Ouaddaï, département de Ouara plus précisément dans la commune de Kachin el-Abéché. Elle s'insère dans le bassin versant du Ouadi Chao. Elle est la deuxième ville du Tchad après N'djaména. La zone est comprise entre le parallèle 13°48' et 13°50' de latitude Nord et les méridiens 20°48' et 20°52' de longitude Est. La localité d'Abéché est distante d'environ 900 km de la capitale tchadienne Ndjamenana, et est limitée au Nord par la sous-préfecture de Bourail, au sud celle de Ouadi Chok d'Abougoudam, à l'Est par la sous-préfecture de Mandjoko et l'Ouest par celle de Guéri.

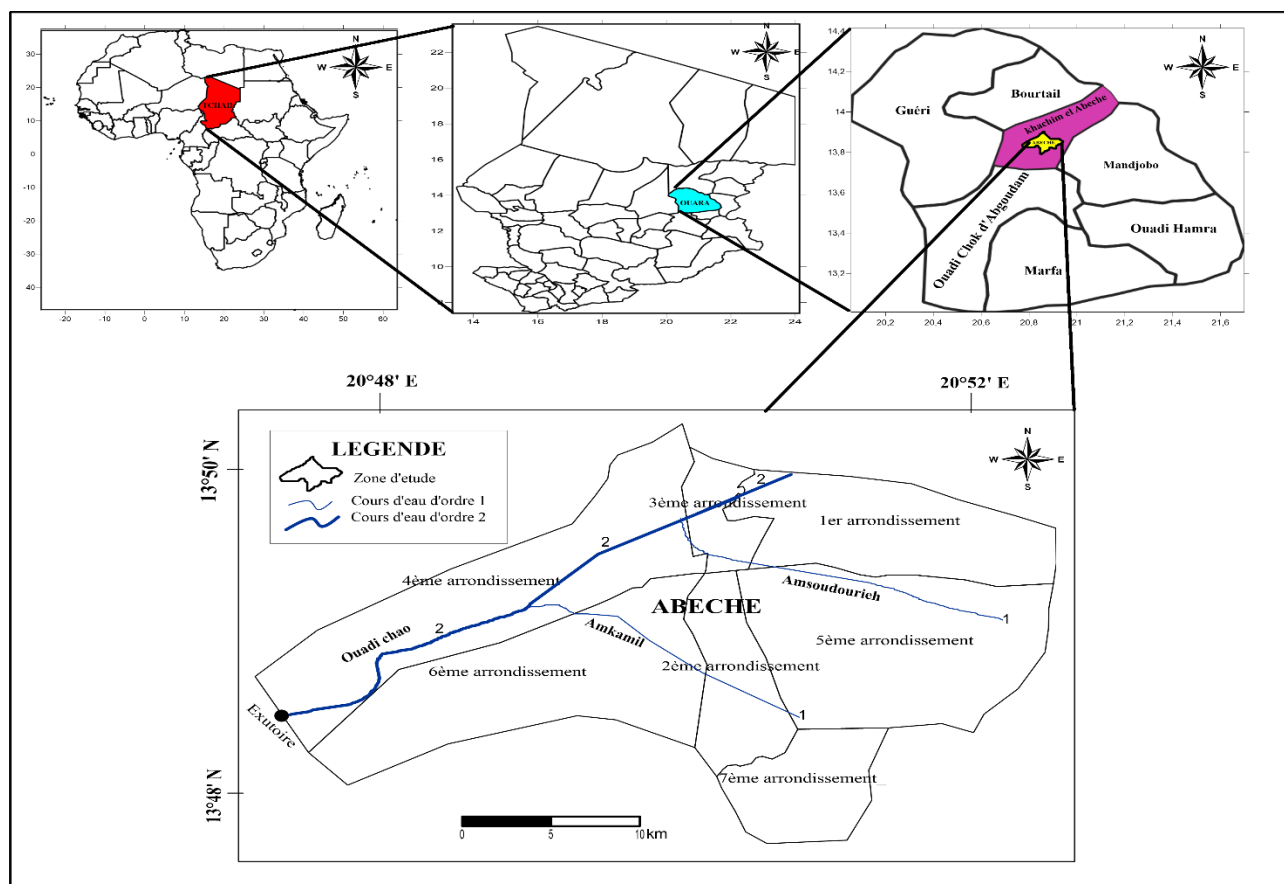


Figure : 1 Localisation de la zone d'étude ; A) Carte du Tchad dans l'Afrique ; B) Département de Ouara dans le Tchad ; C) Localité d'Abéché dans le département de Ouara ; D) La zone d'étude

I.2. Contexte climatique

Le climat est l’un des principaux facteurs contrôlant les caractéristiques d’une région. D’après les données climatiques (anonyme, 2024) collectées entre 1991-2021 (Tableau 1). Le climat dominant de la zone d’Abéché est de type Sahélien. Les paramètres prises en compte ici sont les précipitations et les températures.

I.2.1. Précipitations

Les précipitations sont des eaux météorites qui tombent à la surface de la terre sous la forme liquide et/ou solide et sont recueillies par un bassin versant.

À Abéché la moyenne interannuelle des hauteurs des précipitations sur la période de référence est de 419 mm. Le mois d’Août est le plus arrosé avec 205 mm de pluies en revanche, les mois les moins arrosés sont généralement (Novembre, décembre, janvier, février, mars) avec des précipitations nulles (Tableau 1).

I.2.2. Températures

Les variations de la température au cours de l’année permettent de distinguer deux saisons : une saison chaude qui s’étend de mars à octobre ; et une saison froide caractérisée par de nuits très froides (novembre à février). L’apparition des pluies est à l’origine de l’atténuation de la température entre juillet et septembre. En général, la température dans la zone d’étude varie en fonction des saisons. La température moyenne mensuelle interannuelle est de 28,5°C pour la période comprise de 1991-2021 (30 ans). D’après le Tableau 1, le mois le moins chaud est celui de Janvier (24,3°C) et le mois le plus chaud est Mai avec (32,7°C).

Tableau 1 : Données climatiques moyennes mensuelles interannuelles d’Abéché de 1991-2021 (source : anonyme 2024)

	Jan.	Fév.	Mar.	Avr.	Mai	Jui.	Juil	Aoû	Sep.	Oct.	Nov	Déc.	Moy Ann	Total Ann.
							.	.			.		.	
P (mm)	0,0	0,0	0,0	1	10	24	119	205	54	6	0,0	0.0	-	419
T (°C)	24,3	27,4	30	32,5	32,7	31,3	28	25,7	27,5	29,5	27,8	24,9	28,5	-

I.2.3. Diagramme Ombrothermique de BAGNOULS et GAUSSEN (1957)

D’après les données pluviométrique et thermique, le courbes ombrothermiques représentées mettent en évidence que cette région est soumise à un climat tropical aride marqué par une longue saison sèche qui dure 9 mois allant d’Octobre à juin et une courte saison pluvieuse qui ne dure que 3 mois allant de Juillet à Septembre (Figure 2).

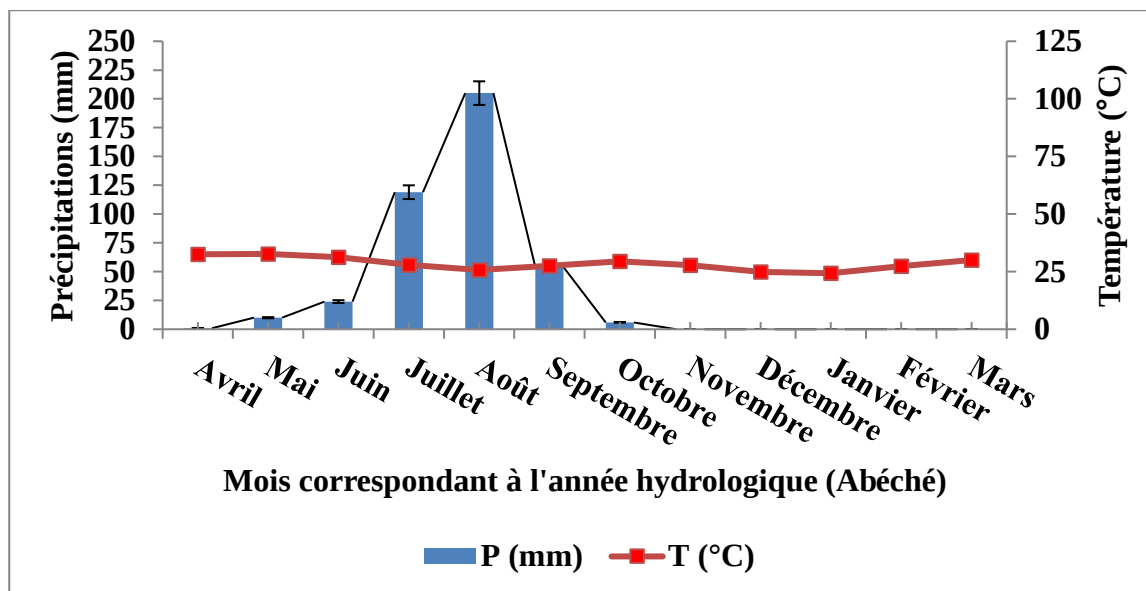


Figure 2 : Diagramme Ombrothermique de Bagnouls et Gaussen (1957)

I.3. Sols

Les sols d'Abéché sont typiques des zones sahéliennes. Ils sont constitués de quatre types des sols : les sols ferrugineux, les vertisols, les sols halomorphes et les sols jaunes peu évolués (Bocquier et al., 1975).

- les sols ferrugineux tropicaux sur matériaux sableux profonds ;
- les vertisols généralement collants et à forte cohésion difficile à travailler et ne sont pas caractérisés des eaux souterraines mais des eaux de retour. Ces sols sont de couleur généralement noire ou brune ;
- les sols halomorphes à caractère mixtes le plus souvent au contact entre les sols sableux et les sols argileux. Ils sont sableux en surface et argilo-sableux en profondeur
- les sols peu évolués, prennent naissance le plus souvent sur les granites.

I.4 Végétation

La végétation présente dans cette zone est analogue à celle des régions sahéliennes, en raison de similitude marquées dans les conditions pédoclimatiques. Elle est relativement pauvre, hétérogène et discontinue. La ville est constituée des steppes et pseudo-steppes à acacias épineux, rabougris avec des graminées en hivernage. La végétation est diversifiée et caractérisée par des types de formations arborescentes composés essentiellement de : *Balanites aegyptiaca* (savonniers), *Acacia albida*, *Acacia senegal*, *Acacia seyal*, *Acacia siberiana*, *Acacia nilotica* etc. Il s'agit d'épineux adaptés aux dures conditions climatiques et on trouve également quelques Nimier et arbres fruitiers plantés soit par la population, soit par les agents de l'environnement (Figure 3).



Figure 3 : Végétation de la zone d'étude

I.5 Hydrographie

La zone d'étude s'inscrit dans le bassin versant du Ouadi Chao, au sein duquel s'organise un réseau hydrographique dominé par des cours d'eaux (Ouadi Chao, Amsoudourieh et Ankamil). Ce sont des cours d'eaux à régime irrégulier, torrentiel, alimentés par les orages de la saison de pluie pendant laquelle l'eau ne coule qu'épisodiquement. Ces cours d'eau drainent les eaux des ruissellements sur un fond sableux reposant sur un encaissant peu perméable (Ngolona 1992).

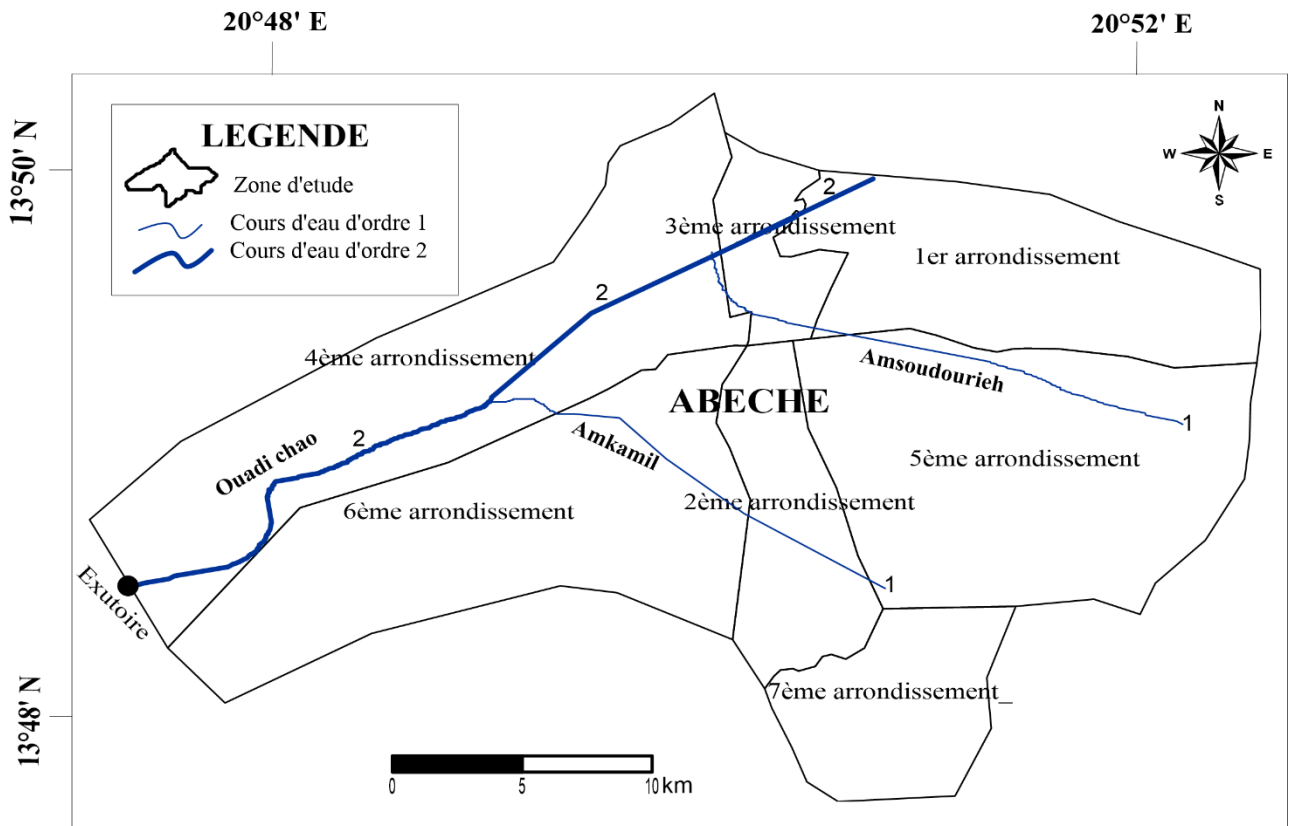


Figure 4 : Carte du réseau hydrographique

I.6 Hydrogéologie

L'hydrogéologie est la science de l'eau souterraine. C'est une discipline des sciences de la terre orientée vers les applications (Castany, 1998).

La zone d'étude située en contexte de socle cristallin, est caractérisée par l'existence de plusieurs types de nappes (Schneider, 2001 ; PHPTC1/AFD., 2008 ; Ngounou Ngatcha, 2011 ; Non-Assem, 2020 ; Brahim, 2020) : les nappes des formations alluviales, d'altérites et les nappes des formations fissurées et/ou fracturées (Figure 5).

La répartition des potentialités en eau souterraine de la zone d'étude dépend essentiellement de la morphologie, de la nature lithologique des roches et des conditions climatiques. Dans cette localité l'eau souterraine trouve sa source dans les zones de fracture du socle cristallin soit dans les alluvions des ouadis.

I.6.1 Nappes des altérites et alluviales

Selon les conditions des gisements et de recharge des nappes, on peut distinguer les nappes d'inferoflux, les nappes sous fluviales, les nappes des dépressions inondables et les nappes des altérites (Ngounou Ngatcha, 2011 ; Non-Assem, 2020 ; Brahim, 2020).

- Les nappes d'inferoflux, se localisent dans les fonds sableux des cours d'eau reposant sur un encaissant peu perméable (argile et limon). Elles sont exploitées par de nombreux puits peu profonds creusés dans le lit même des cours d'eaux ;
- Les nappes sous fluviales occupent les alluvions des vallées principales des cours d'eau. Elles se rechargent lorsque le lit mineur du cours d'eau traverse la couche limoneuse superficielle pour mettre en continuité les alluvions sableuses de fond de lit et des formations détritiques. Elles se rechargent également de manière directe par infiltration lors des précipitations (PHPTC1/AFD., 2008 ; Brahim, 2020) ;
- Les nappes de dépressions inondables désignent des zones topographiques basses (ou dépressions) où l'eau peut s'accumuler temporairement ou durablement créant des zones humides, marécages, ou mares temporaires. Ces nappes sont liées à la présence des couches à dominance sableuse sous les tapisseries argileux des marécages ou des zones humides.

Les nappes d'altérites sont, cependant, associées au socle granitique fracturé/fissuré recouvert par une épaisse couverture d'altérite. Ces dernières sont constituées des glaciis d'érosion (pédiments), des dépôts alluviaux et des accumulations latéritiques anciennes ou des fragments de cuirasse (Schneider, 2001 ; PHPTC1/AFD., 2008).

I.6.2. Nappes des fissures et/ou des fractures

Les nappes de fissures et/ou de fractures désignent des zones du sous-sol où l'eau circule préférentiellement à travers des fissures ou fractures rocheuses. Elles sont des réservoirs plus intéressants mais très discontinus. Ces réservoirs se localisent à des profondeurs de 20 à 60 m.

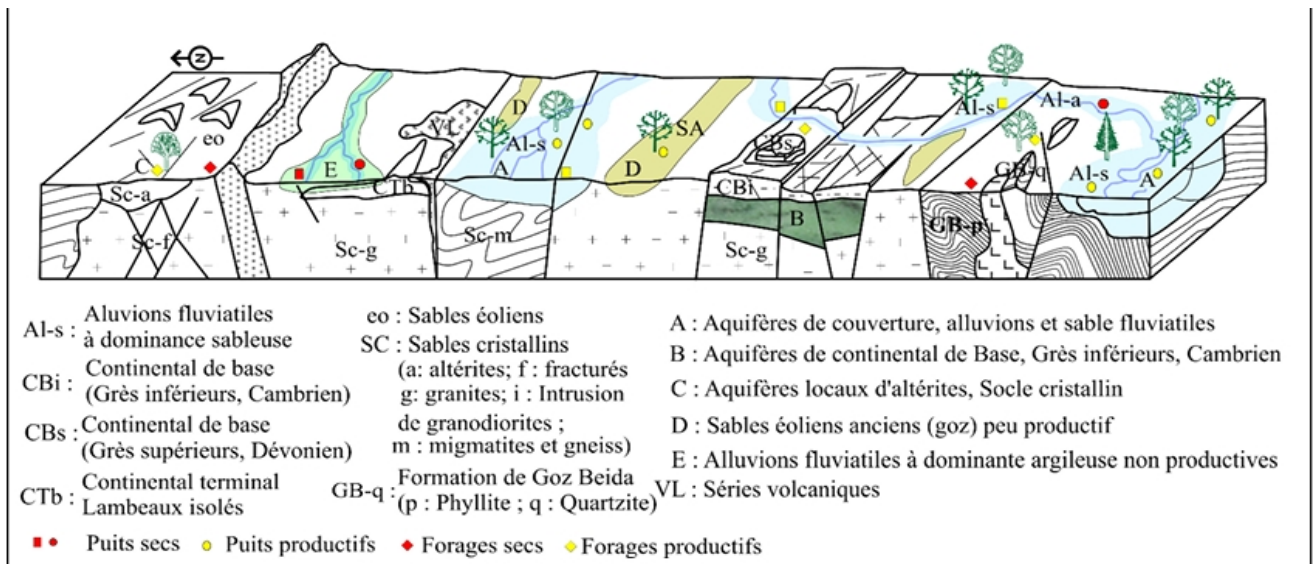


Figure 5 : Diagramme schématique des propriétés aquifères des principaux ensembles géologiques (source : RESEAU, 2016)

I.7. Orographie

La zone d'étude est localisée sur un ensemble dont la topographie se situe entre 490-740 m d'altitude. Les unités géomorphologiques rencontrées sont les suivantes (Figure 6) :

- une surface de basse altitude comprise entre 490 à 550 m, formée des plaines à aspect moutonné, avec des inselbergs très disséminés ;
- une zone de plateau, avec des massifs très isolés et des vallées très encaissées d'altitude allant de 550 à 610 m ;
- une zone composée des reliques d'affleurements composant des massifs avec une altitude variant de 610 à 670 m. Cette zone correspond au glaciaire inférieur décrit par Bocquier et al. (1975), et est formée par dissection d'anciens glaciers. Le modèle est composé des collines avec des affleurements rocheux, des éboulis ou pavages, des dépôts colluviaux et alluviaux, et des dunes tronquées ;
- une zone composée des reliques qui correspond au moyen glaciaire retracé par Bocquier et al. (1975), elle se compose d'une chaîne de montagnes avec des altitudes allant de 670 à 740

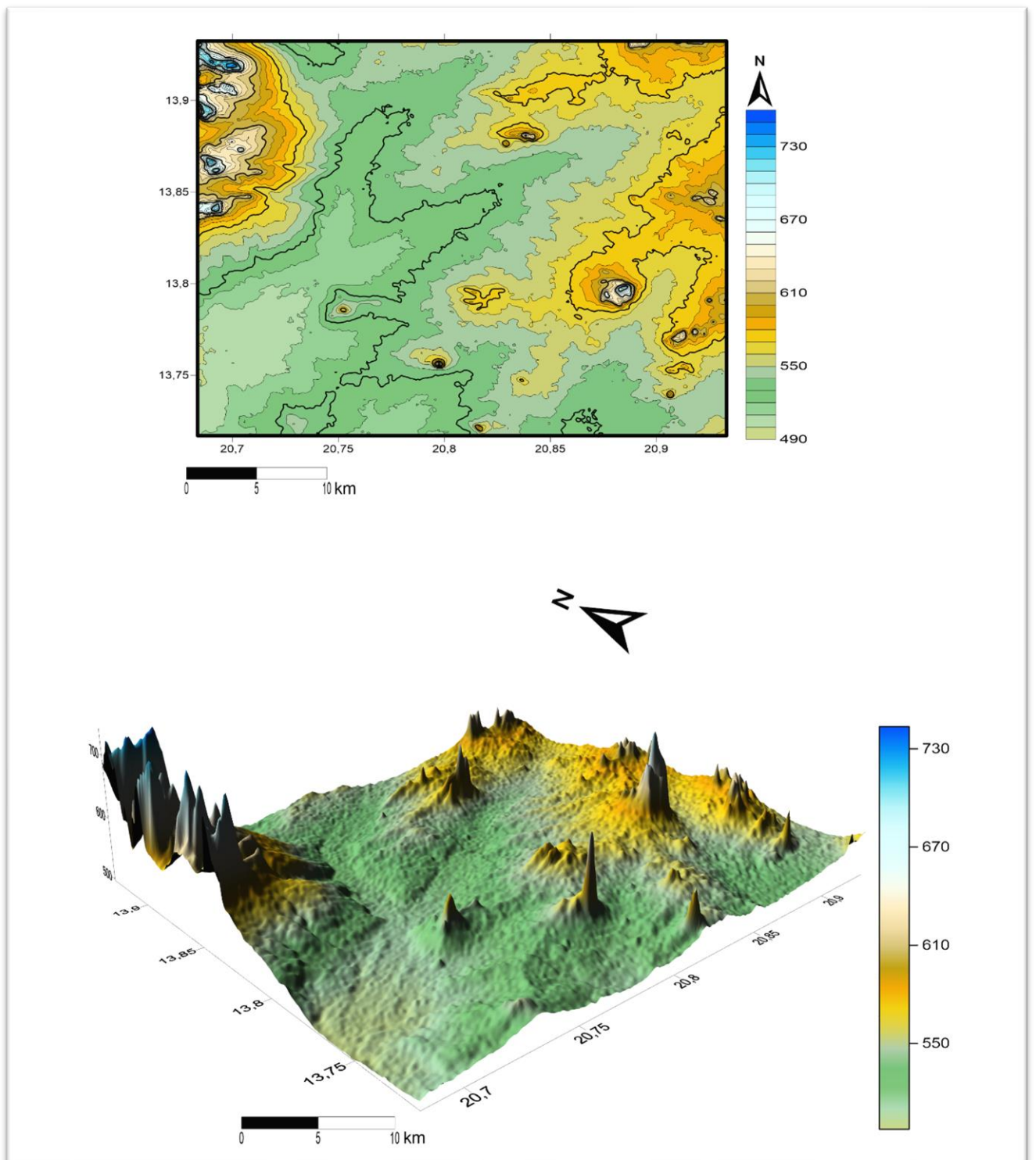


Figure 6 : Carte orographique en 2D et 3D de la zone étudiée (STRM image)

I.8 Géologie

I.8.1. Cadre géologie régionale

I.8.1.1. Les formations cristallines et cristallophylliennes

Le Tchad est situé au milieu d'un vaste domaine appelé « zone mobile panafricaine » encadrée par les anciens boucliers stables du domaine continental, d'âge Archéen ou Protérozoïque inférieur (il y a environ 1,6 milliards d'années) : le craton Nilotique au Nord-Est, le craton du Congo au Sud, et

le craton Ouest-africain à l'Ouest (Bessoles et Trompette, 1980 ; Kusnir, 1995). Le Tchad couvre environ 30% du métacraton saharien et est l'une des régions les moins contraintes géologiquement au monde (Liégeois et al., 2013 ; Shellnutt et al., 2017). L'orogénèse panafricaine, qui se déroule pendant la transition entre le Précambrien et le début du Paléozoïque, il y a 700 à 520 millions d'années, est à l'origine de la formation des principaux massifs cristallins du Tchad, dont le massif du Tibesti au Nord, le massif de Ouaddaï à l'Est et le massif central tchadien, Guéra (Abdelsalam et al., 2002). Le massif de Mayo-Kebbi au Sud-Ouest et le massif du Yadé ou Baïbokoum au Sud constituent des terranes de la ceinture orogénique néoprotérozoïque (Penaye et al., 2006 ; Pouclet et al., 2006). Les roches de ces différents massifs sont d'origine magmatique ou issues de la déformation et du métamorphisme des épaisses couches sédimentaires qui s'étaient accumulées dans la zone mobile au Protérozoïque (Black et Liégeois, 1993). Leur mise en place a été accompagnée d'une intense activité volcanique dont on trouve les traces dans le Tibesti, près du lac Fitri et dans le Mayo-Kebbi (Kusnir, 1995 ; Pouclet et Durand, 1983).

I.8.1.2. Les formations Sédimentaires

Les roches sédimentaires couvrent 85% de la superficie du territoire tchadien. Elles forment deux bassins : celui des Erdis au nord et celui du lac Tchad (cuvette tchadienne) dans le centre et le sud du pays (Kusnir, 1995). Ces formations sont :

- les formations primaires essentiellement localisées au nord du 19^e parallèle dans l'Ennedi, le Borkou et aux alentours du Tibesti. Il s'agit d'une série de grès continental formé de grès à plante, de grès supérieur, moyen et inférieur, et une série carbonifère marine formée de grès, marne et calcaire.
- les formations secondaires affleurent dans le bassin des Erdis et au Mayo-Kebbi. Elles constituent également le remplissage de plusieurs fossés du Tchad méridional.
- les formations tertiaires connus au Tchad sont les suivantes : (i) le dépôt éolien marin situé à l'extrémité Nord du pays ; (ii) le dépôt éolien oligocène-Miocène continentaux et fluvio-lacustre qui se rencontrent dans la cuvette tchadienne ; et (iii) le dépôt pliocène également continental et comprend une puissante série argileuse ;
- les formations quaternaires sont très répandues au Tchad, elles comprennent les dépôts fluvio-lacustres, les alluvions, les sables éoliens, les altérites et les volcanites. Ces dépôts sont d'origine continentale très variés et se situent entre les argiles et les sables selon les conditions climatiques et les mouvements tectoniques.

I.8.1.3. Les formations volcaniques

Une activité volcanique et tectonique importante a été mise en évidence vers la fin du Crétacé, avec la présence de dykes, filons de basaltes et dolérites recoupant les formations antérieures, visibles dans les affleurements au Mayo-Kebbi (Léré, Lamé) et observés dans les forages profonds des fosses

méridionales et au lac Tchad. L'activité est la plus intense à la limite Crétacé-Tertiaire avec la surrection de pitons rhyolitiques (volcanisme acide) au sud du lac Tchad (Hadjer El Khamis...) et l'épanchement de basaltes dans le Ouaddaï (Burke et al., 2003 ; Pouclet et Durand, 1983). Cette activité a entraîné en profondeur la transformation des roches encaissantes par métamorphisme de contact avec la formation de cornéennes (sédiments siliceux) ou d'argilites (sédiments argileux) que recoupent certains forages du Dababa ou du Sud Batha et qu'on peut voir à l'affleurement à la faveur de boutonnières comme au Fitri (Isseini et al., 2013 ; Kusnir et Moutaye, 1997 ; Shellnutt et al., 2017). La surrection du massif volcanique du Tibesti au Tertiaire et Quaternaire est attribuée à la présence d'un point chaud à la verticale d'un flux thermique élevé venant du manteau. Ce volcanisme est marqué par l'alternance de phases basiques, acides et intermédiaires qui se sont succédées depuis l'Eocène (Kusnir, 1995).

Figure 7 : Carte géologique régionale (Source BRGM-2009, conception P_SIDRAT 2012)

I.8.2. Cadre géologique locale

Du point de vue locale, on distingue les formations rocheuses énumérées ci-après (des plus anciennes aux plus récentes) :

- **le socle précambrien** : roches magmatiques et métamorphiques

La localité d'Abéché est située dans une zone à géologie contrastée, au piémont ouest du massif cristallin du Ouaddaï qui constitue le socle précambrien, avec des plaines, des plateaux et de petits massifs montagneux (Schneider et wolff, 1992). Ce massif est constitué, pour l'essentiel, de roches métamorphiques recoupées par des granites caco-alcalins souvent orientées et concordants. Ces roches anciennes peuvent être recoupées à leur tour par de petits massifs discordants à bords circonscrits, homogènes et non orientées, de granites alcalins. Au bas de ces formations granitiques élevées appelées aussi inselbergs, s'épandent des arènes rocheuses.

- **la couverture phanérozoïque** : formations sédimentaires

Les formations récentes de la zone d'étude, sont constituées d'alluvions fines à graveleuses, de sable et d'argile. Ces formations alluviales recouvrent dans les vallées, les socles cristallins. Leurs épaisseurs sont variables. Elles sont généralement constituées de matériaux grossiers à la base, lesquels sont surmontées par des dépôts limoneux.

Les différents types des formations sont :

- alluvions anciennes fluviales essentiellement sableuses ;
- dunaire ancien (Sables rouges) ;
- roches intrusives anciennes (Granite calco-alcalin) ;
- quartzites et quartzites micacés

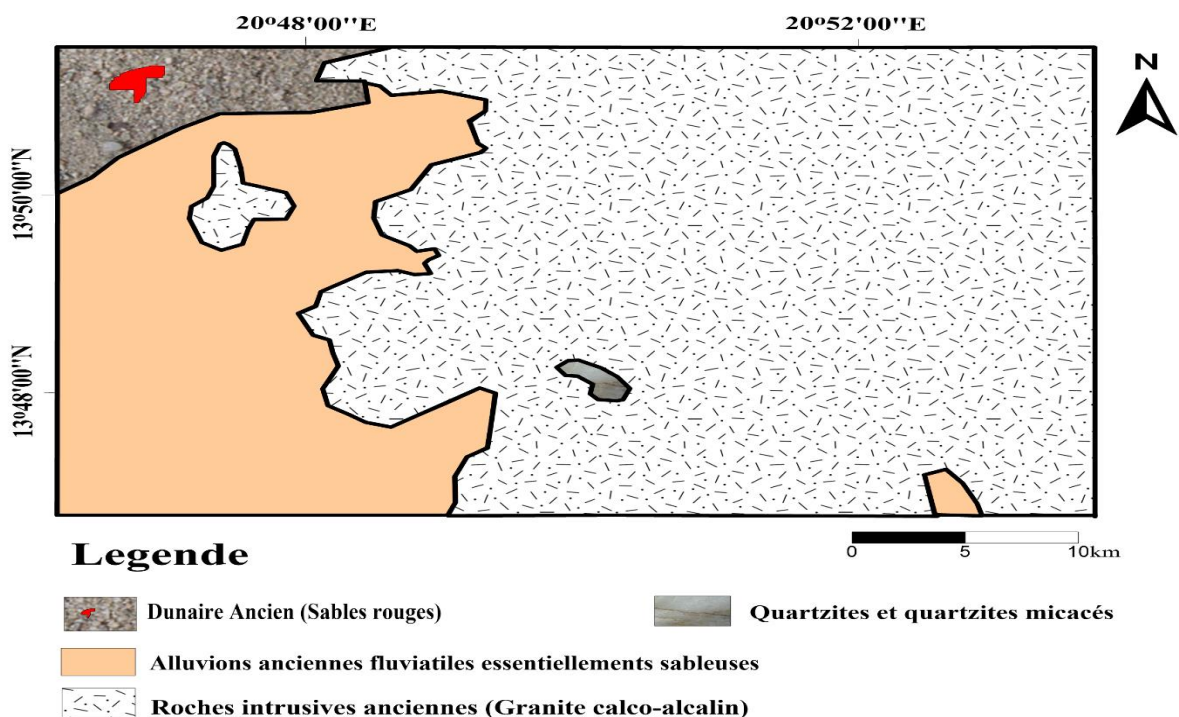


Figure 8 : Carte géologique locale (Source BRGM-2009, conception P_SIDRAT 2012)

I.9. Milieu socio-économique

I.9.1 Démographie et développement urbain

D'après le recensement de 2016, la population était évaluée à 178 898 habitants et aujourd'hui, la population est estimée à 200 000 habitants (Mahamat, 2021). Le peuplement traditionnel est constitué en majorité de ressortissants du Ouaddaï géographique, des régions environnantes, du Borgou Ennedi Tibesti (BET), et des fonctionnaires issus des régions méridionale et centrale du pays. La dynamique urbaine observée dans la ville est la conséquence de 2 événements qui ont marqué la ville. Le premier découle de la volonté du gouvernement de décentraliser l'enseignement supérieur qui a abouti à la création de l'Institut Universitaire des Sciences Techniques (IUSTA) en 1997 ; de l'Université Adam Barka d'Abéché (UNABA) en 2004 ; et l'Ecole Normale supérieure d'Abéché (ENSA) en 2012. Le second est lié à la crise du Darfour (Soudan), déclenchée en 2003, qui a provoqué le déplacement des populations du Darfour vers la ville d'Abéché où elles se sont réfugiées. Ce déplacement a fait venir dans la ville plusieurs organisations humanitaires. Ces deux (2) événements ont entraîné à Abéché une forte affluence de tchadiens et d'expatriés en quête du savoir et d'emploi. Cette population est caractérisée par une grande diversité ethnique. Les principaux groupes ethno-linguistiques sont : Ouaddaïens, Arabes, Tamas, Mimis, Maba, Assonghoris, Massalites, Haoussas, Zakhawas, Gouranes, Foulbés, etc.

I.9.2. Activité économique

La ville d'Abéché constitue le principal pôle de développement de l'ensemble de la partie Nord et Est du pays. Son économie repose principalement sur le commerce, soutenu par une production agricole dominée par l'ail, l'oignon et le mil. L'élevage, notamment du bétail occupe également une place importante dans les activités locales. Par ailleurs, l'artisanat y est bien développé, en particulier dans les domaines de la maroquinerie et de la tapisserie.

I.10. Travaux antérieurs portant sur l'Hydrodynamique

Cette partie met en exergue les travaux antérieurs réalisés sur la dynamique des eaux souterraine. Dans cet élan Margat (1987), définit la dynamique des eaux souterraine, en tant que branche du savoir est la connaissance, la description et l'explication des phénomènes hydrauliques qui se rapportent à l'étape souterraine du cycle de l'eau depuis les pénétrations d'eau dans le sous-sol (alimentation des aquifères) jusqu'aux retours d'eau au jour (émergences visibles ou émissions). Qui dit dynamique dit mouvement : les eaux souterraines sont bien en effet des eaux mobiles "courantes" et non "stagnantes", bien qu'elles soient souvent mal aperçues comme telles sauf aux lieux de leurs émergences.

Quant à la piézométrie, permet de suivre l'évolution du niveau de l'eau dans chaque aquifère. Au plus près la piézométrie est un suivi quantitatif des nappes d'eau souterraines (Margat, 1987).

La revue a été axée sur la piézométrie, la perméabilité (k) et les mécanismes des recharges de l'aquifère à nappe libre en vue d'une caractérisation hydrodynamique de la zone d'étude.

I.10.1. Piézométrie

Dans la zone d'étude, plusieurs mesures piézométriques ont été faites. Les investigations menées par Aboubakar, (2021), indiquent une variation des niveaux statiques comprise entre 6,07 m à 18,48 m avec une moyenne de 11,26 m et les niveaux piézométriques varient également de 518 m à 571,19 m. D'autres investigations ont été également menées par Abakar (2015), Habib, (2023) et Khalid, (2024) dans la zone d'étude.

I.10.2. Perméabilité ou conductivité hydraulique (K)

La perméabilité, est l'aptitude d'un réservoir à conduire l'écoulement de l'eau dans des conditions hydrodynamiques imposées (Castany, 1982). Les perméabilités déterminées par les analyses granulométriques des échantillons des sols prélevées à 0,5m et 1m de profondeur en Afrique centrale cas du Cameroun varient d'un bassin à un autre. Selon Djeuda et al., (2000), les valeurs des perméabilités sont comprises entre 10^{-4} et 10^{-6} m/s. D'autres investigations ont été faites par Feumba (2005) et Kalla (2007) aboutissant à des valeurs de perméabilités comprises entre 10^{-5} et 10^{-7} m/s. Ces valeurs sont également très rapprochées à celles obtenues en Afrique de l'Ouest cas du Niger (Abou Babaye, 2012) sont respectivement $2,42 \cdot 10^{-7}$ m/s et $2,6 \cdot 10^{-5}$ m/s avec des moyennes de $3,35 \cdot 10^{-6}$ m/s et $1,14 \cdot 10^{-5}$ m/s.

I.10.3. Les mécanismes de recharge de la nappe libre

Il est important de connaître le taux de recharge puisque cette composante est un élément clé, notamment pour la gestion des ressources, l'écologie et le débit de cours d'eau (Gosselin, 2016). La recharge peut être définie comme le flux vertical descendant de l'eau qui atteint la nappe phréatique et entre dans la zone saturée (Rivard et al., 2014). La recharge représente ainsi la fraction des précipitations qui percole à travers le sol et la zone non saturée pour réalimenter les nappes. Ainsi la recharge de l'aquifère à nappe libre se fait par deux processus (Djeuda Tchapnga et al., 1999) :

- une alimentation verticale directe à partir de l'infiltration des eaux de précipitation et de ruissellement du cours d'eau du réseau superficiel ;
- une alimentation latérale depuis les berges des cours à travers les altérites, les fissures et les diaclases du socle.

D'après les travaux réalisés par Habib (2023) et Khalid (2024) sur l'hydrodynamique, on remarque que la recharge se fait d'août à octobre et la décharge se fait de novembre à mai sous l'action de l'évapotranspiration et du déficit pluviométrique.

Conclusion

En résumé, la localité d'Abéché est située dans le département de Oura plus précisément dans la commune de Kachim el-Abéché. Elle se situe entre le parallèle 13° 48' 00'' et 13° 50' 00'' de latitude Nord et les méridiens 20° 48' 00'' et 20° 52' 00'' de longitude Est. Cette zone est caractérisée par un climat de type sahélien avec une faible pluviométrie qui s'étale du mois de Juillet à Septembre et des fortes températures. La zone d'étude est drainée par le Ouadi Chao et ses affluents (Amkamil, et Amsoudourieh). Les eaux souterraines sont captées par des nappes des altérites, des nappes des milieux fracturés/fissurés, des nappes de dépressions inondables, des nappes sous fluviales et des nappes inferoflux. La géologie de la localité repose sur le socle cristallin d'âge précambrien constitué essentiellement de Granite et des Alluvions anciennes fluviales sableuses. Dans cette localité divers types des sols sont rencontrés : les sols ferrugineux tropicaux, les vertisols, les sols halomorphes et les sols peu évolués. La végétation est principalement constituée de steppes arbustives et herbeuses installées sur des systèmes dunaires ou gravillonnaires. Le commerce, l'élevage, l'agriculture et l'artisanat sont les activités menées par la population. Les travaux antérieurs, effectués par les auteurs cités ci-haut ont montré que les investigations faites pour la piézométrie sont trop rapprochées, les valeurs de la perméabilité sont comprises entre 10^{-3} à 10^{-7} m/s, la recharge se fait d'août à octobre et la décharge se fait de novembre à mai.

CHAPITRE II : MATERIELS ET METHODES

Introduction

L'évaluation quantitative de la ressource en eau souterraine repose sur l'acquisition et le traitement des données relatives aux fonctions capacitive et conductrice du réservoir, et aux comportements hydrodynamique et hydrochimique du système considéré (Castany, 1982). Ce chapitre présente les substrats analytiques et les méthodes mises en œuvre pour l'acquisition et le traitement des données indispensables pour une gestion optimale de l'eau de l'aquifère à nappe libre du bassin versant de la localité d'Abéché. La réalisation de ce travail demande un matériel approprié et une méthodologie stricte et rigoureusement menée tant qu'au niveau de l'étude piézométrique que la caractérisation hydrodynamique. Dans ce chapitre, nous allons présenter les matériels et les différentes méthodes utilisées dans la réalisation de cette étude.

II.1. Travaux de terrain

Après avoir délimité la zone d'étude sur la carte topographique d'Abéché, les travaux ont consisté à la reconnaissance du site d'étude, au recensement et la sélection des points d'eau, suivi piézométrique, aux mesures in situ des paramètres physico-chimiques des eaux souterraines et à l'échantillonnage des eaux et des sols pour les analyses au laboratoire.

II.1.1 Reconnaissance du site, recensement, sélection de points d'eau et détermination du bilan hydrique et hydrologique

Une campagne de reconnaissance du site a été effectuée en septembre 2024. Cette campagne donne une vue globale sur les tâches à effectuer, et les diverses contraintes à surmonter.

En ce qui concerne le bilan hydrique, plusieurs chercheurs (Thornthwaite, Blaney, De Serra...) ont mis au point plusieurs méthodes de détermination basées sur l'utilisation des formules empiriques facilitant l'estimation ou le calcul du bilan hydrique. Ce dernier permet d'évaluer le déficit d'écoulement mensuel et tient compte de la réserve du sol d'un mois à l'autre (Réménieras, 1972). La méthode de Thornthwaite consiste à calculer tout d'abord, pour chaque mois, par une formule ou des abaques donnés par l'auteur, une évapotranspiration potentielle que l'on peut assimiler au pouvoir évaporant de l'atmosphère sur la zone d'étude considérée. Cette équation est fonction de la température et de la durée astronomique du jour.

D'après cette méthode l'on pourra également déterminer la lame d'eau écoulée (L_{ep}), l'écoulement (S), l'infiltration (I), le déficit d'écoulement (DE) et le coefficient de température (α), afin qu'il puisse établir le bilan hydrique de la zone suivant un organigramme spécifique (annexe I).

Les formules pour l'estimation de l'**ETP** (mm) sont données par :

$$ETP \text{ (mm)} = 16 \left[\frac{10T}{I} \right]^\alpha \times F(\lambda); i = \left[\frac{T}{5} \right]^{1,514} \text{ et } I = \sum i;$$

$$\alpha = 0,492 + 1,7 \cdot 10^{-2} I - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 6,75 \cdot 10^{-7} I^3$$

Avec I : indice mensuel annuel de température ; T : température moyenne en °C ; i : indice mensuel moyen de température en °C.

Les paramètres suivants du bilan hydrique sont aussi calculés :

- ETP (mm) calculés pour la période allant de 1991-2021 ;
- DE : déficit d'écoulement = ETP – ETR ;
- Lep : lame d'eau écoulée à partir de la pluie = P-ETR ;
- S : surplus disponible pour l'écoulement superficiel ou souterrain ;
- Hr (%) : coefficient mensuel d'humidité relative = $\frac{P-ETP}{ETP} \times 100$.

Pour le bilan hydrologique de la zone d'étude l'on a pu également présenter les différentes valeurs de Précipitations P, Évapotranspiration E, Ruissellement R, et Infiltration I.

Le recensement quant à lui, est une opération qui consiste à énumérer des points d'eau. Les opérations menées lors de la descente consistaient à identifier les ouvrages et prendre leurs coordonnées géographiques (longitude, latitude et altitude) à l'aide d'un GPS (Global Positioning System) de marque Garmin. Lors de la descente, les ouvrages hydrauliques (puits) présents dans le site ont été recensés. A l'issue de cette étape, une méthodologie d'investigation efficace sur le terrain a été élaborée. Le choix des ouvrages a porté sur 18 quartiers, dont le critère de sélection était basé sur :

- l'accord des propriétaires ;
- le type d'eau souterraine (puits) ;
- l'accessibilité de points d'eau ;
- leur représentativité par rapport à l'ensemble de la zone étudiée.

Sur les quarante-quatre (44) ouvrages recensés dans le site d'étude, dix (10) ouvrages ont été prélevés. Ceux-ci ont été réalisées en deux étapes :

- la première étape consistait en la mesure in-situ de paramètres physico-chimiques des eaux (pH, température, conductivité électrique, TDS). Pour cela une sonde multiparamètre de marque AZ86031 (Figure 10) a été utilisé. Les électrodes étaient directement immergées dans un récipient contenant de l'eau du puits à analyser.
- la deuxième phase concernait le prélèvement des échantillons destinés aux analyses complémentaires en laboratoire.

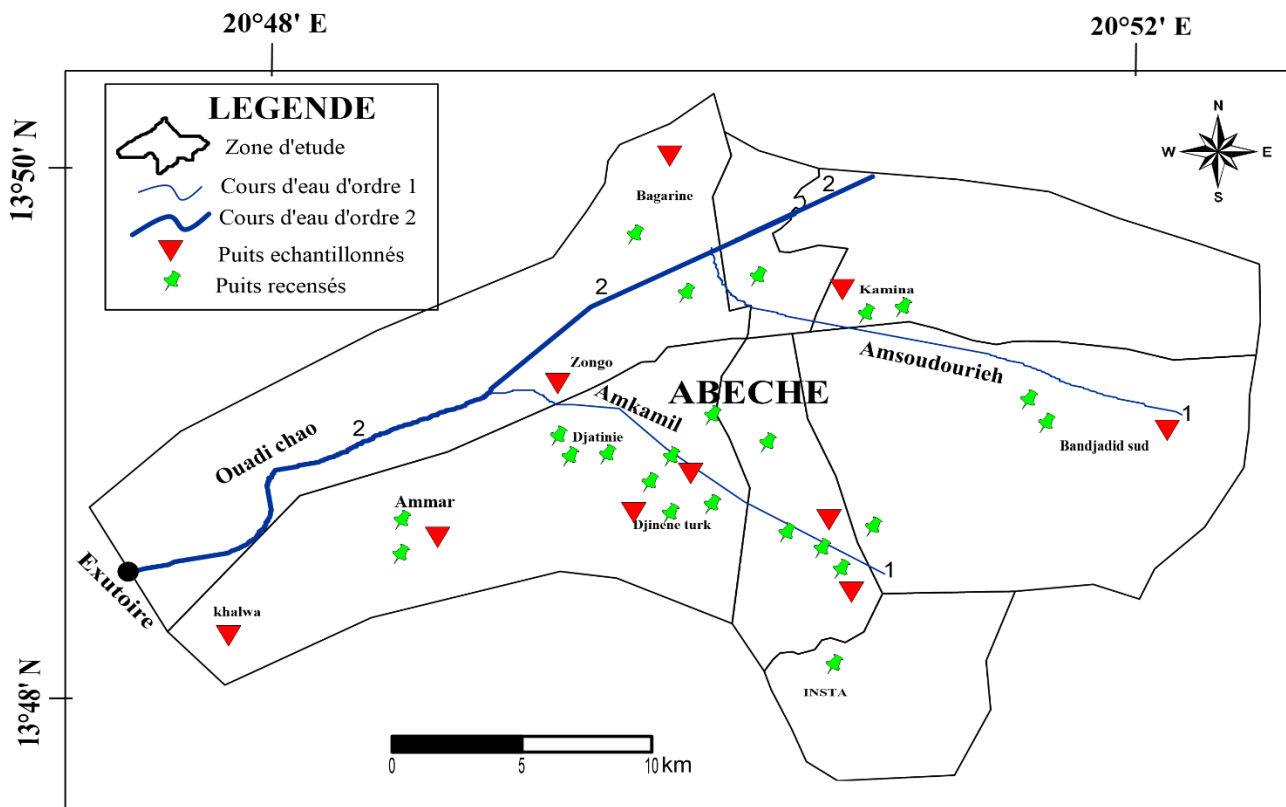


Figure : 9 Carte des ouvrages recensés



Figure 10 : Mesure in-situ des paramètres physiques de l'eau

II.1.2 Suivi piézométrique

Il est important de connaître l'existence et le niveau d'une nappe d'eau dans une couche perméable. Le niveau d'une nappe aquifère conditionne, d'une part, les modalités de son exploitation et, d'autre part, la conception, l'exécution, et la stabilité des ouvrages profonds. D'où la nécessité d'en connaître les variations saisonnières.

Elle s'est effectuée à une fréquence saisonnière (septembre 2024 pour les hautes eaux et mai 2025 pour les basses eaux). Cette opération consistait à relever les niveaux d'eau des quarante-quatre

(44) puits choisis à l'aide d'une sonde lumineuse et sonore et à déterminer leur niveau piézométrique NP(m) suivant la formule dans le cas d'une nappe libre (Castany, 1998).

Avec $NP = Z - NS$.

NS : niveau statique ; Z : altitude de la surface piézométrique.

Après détermination des niveaux piézométriques, l'on envisage d'établir les différentes cartes piézométriques à savoir :

- Carte piézométrique de hautes eaux ;
- Carte piézométrique de basses eaux ;
- Carte de fluctuation.



Figure 11 : Mesure du niveau d'eau

II.1.3 Prélèvement et conditionnement des échantillons d'eau

Comme présenté ci-haut, 10 échantillons d'eaux souterraines ont été prélevés en juillet pour les analyses physico-chimiques. Ces échantillons ont été conditionnés dans des bouteilles en plastique de type polyéthylène remplies à ras bord d'une capacité de 1000 ml préalablement rincées par l'eau distillée. Ces échantillons sont ensuite amenés aux Laboratoires National des Eaux (**LNE**) d'Abéché.

II.1.4. Sélection et échantillonnage des Sols

Lors de la campagne cinq (5) échantillons de sol ont été prélevés à des sites et profondeurs variables (Figure 12). Le matériel utilisé a été une pelle, une pioche et les sacs en plastique pour maintenir l'humidité du sol. L'échantillon de Khalwa (KH41) a été prélevé à une profondeur de 1 m, celui de Bagarine (BG44) et de Djinéné Turk (DT18) sont prélevés à 0,60 m, pour Ammar (AM35) est à 0,80 m et enfin celui de Zongo (ZN3) est à 0,70 m.

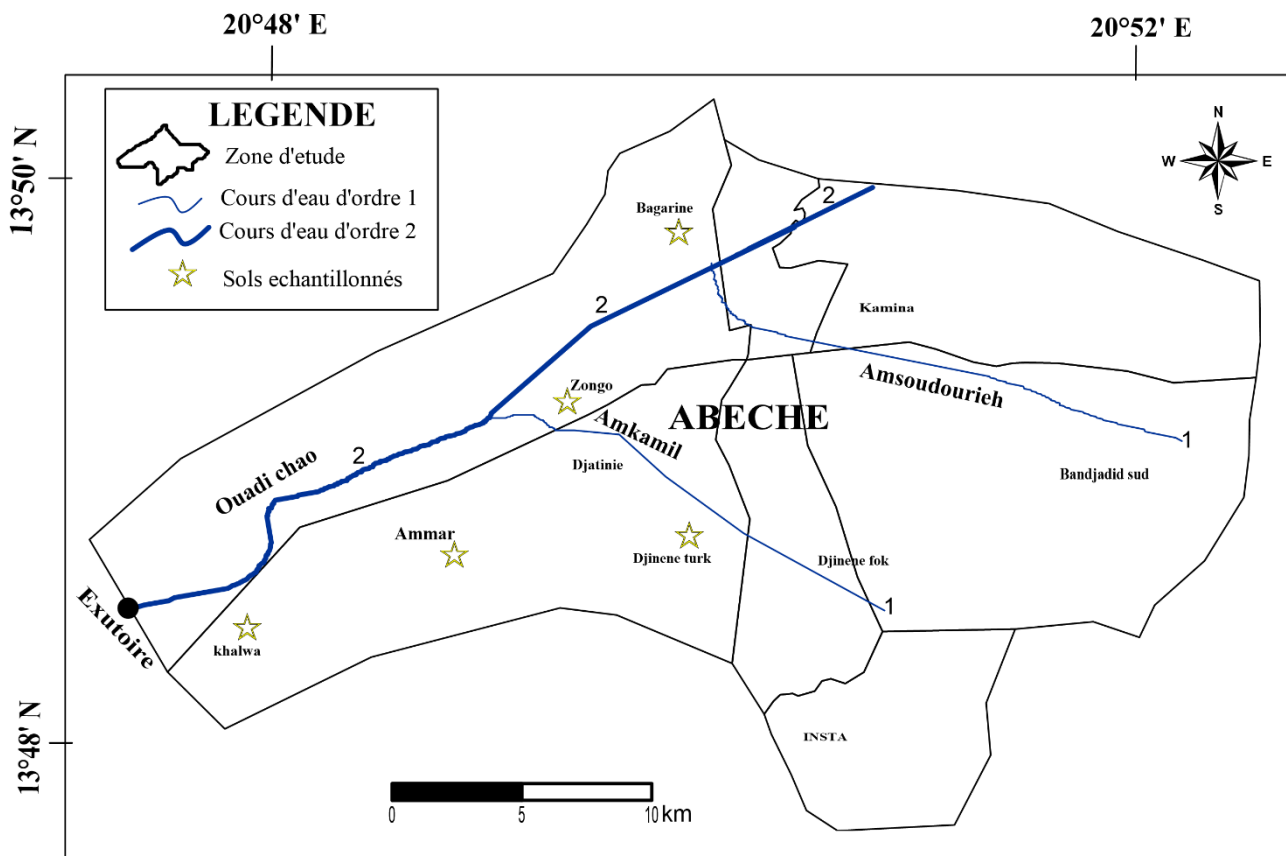


Figure 12 : Carte d'échantillonnage des sols

II.2. Travaux de laboratoire

II.2.1. Analyses des paramètres chimiques des eaux

Les ions majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , Na^+ , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- , F^-) et les éléments tels que : l'ammonium (NH_4^+), le fer (Fe) et le fluor (F^-), ont fait l'objet d'études des analyses physico-chimiques des eaux. Ces analyses ont été faites au Laboratoire National des Eaux d'Abéché. Les méthodes d'analyse adoptées sont : la méthode spectrophotométrique, la méthode photométrique et la méthode de titrage volumétrique. Le spectrophotomètre DR3900 a été utilisé pour la détermination des ions NO_3^- , NH_4^+ , F^- , Fe, et SO_4^{2-} . Le photomètre à flamme distillateur a été utilisé pour déterminer les concentrations des éléments Na^+ et K^+ . Le dosage volumétrique pour déterminer les HCO_3^- , Ca^{2+} , Cl^- . Les principes et modes opératoires d'analyses chimiques sont présentés à l'annexe II

La balance ionique est également calculée pour vérifier la fiabilité des résultats des analyses et vérifier l'équilibre des eaux. Elle est donnée par l'expression suivante :

$$\text{BI} = \frac{\sum \text{cations} - \sum \text{anions}}{\sum \text{cations} + \sum \text{anions}} \times 100$$

D'une manière générale, les analyses chimiques sont considérées :

- Excellente lorsque le $\text{BI} < 5\%$;
- Acceptable lorsque $5\% < \text{BI} < 10\%$;
- Douteuse lorsque $\text{BI} > 10\%$.

Pour l'identification des faciès hydrochimiques, différents diagrammes ont été utilisés afin de déterminer les espèces chimiques dominantes et caractériser les faciès des eaux de puits de la zone sont :

- Diagramme de Piper (1944) ;
- Diagramme de Schoeller-Berkalof (Schoeller, 1962) ;
- Diagramme de Riverside ;
- Diagramme de Wilcox (1948).

La réalisation de ces diagrammes a été faite par le logiciel Diagrammes.



Figure 13 : Matériels utilisés en laboratoire. A) Spectrophotomètre DR3900 ; B) Photomètre à flamme distillateur ; C) Agitateur avec l'acide sulfurique ; D) Agitateur avec EDTA 0,01N ; E) 50ml d'eau versé dans la burette graduée ; F) L'eau étant dans la burette est ensuite versé dans un Erlenmeyer

II.2.2. Caractéristiques physiques des sols et hydrodynamiques

La physique du sol est l'étude des propriétés physiques du sol et de ses comportements face aux forces naturelles et aux activités humaines. Elle a pour objectif de faire comprendre comment le sol interagit avec l'eau.

L'hydrodynamique quant à elle, permet de suivre en continu pendant un temps les différents mouvements ou battements de l'eau dans le sol, et ceci en rapport avec la texture de ce dernier. Les courbes granulométriques permettent, par la méthode de Hazen, (1911), d'estimer les différentes perméabilités des sols alors que le suivi piézométrique permet l'établissement des cartes

piézométriques, l'étude de la recharge et les différentes variations des débits des cours d'eau et des niveaux statistiques dans les puits.

Les travaux de laboratoire ont consisté à la réalisation de plusieurs essais de caractérisation des sols, au dépouillement et au traitement des données. Cette opération s'est effectuée au Laboratoire géotechnique de la société Arab-Contractor d'Abéché. Les principaux essais d'identification des sols qui ont fait l'objet d'étude : l'analyse granulométrique, l'essai de teneur en eau, la détermination de la limite d'Atterberg (limite de liquidité WL, limite de plasticité WP, et l'indice de plasticité) et pour finir avec le poids et rapports volumiques.

II.2.2.1. Caractéristiques physiques des sols

II.2.2.1.1. Nature des matériaux

La granulométrie est la répartition pondérale des grains en fonction de leur dimension. En effet, les grains d'un sol n'ont pas tous la même dimension. Un essai d'identification important qui consiste à étudier la granulométrie du sol est l'analyse granulométrique (Schlosser, 1988). Elle consiste à différencier par la taille les éléments minéraux du sol et à quantifier leur répartition pondérale, dans des classes de diamètres prédéfinis. L'analyse granulométrique s'effectue soit par tamisage, soit par sédimentation (densimétrie).

Par tamisage, il s'agit de la distribution dimensionnelle en poids des particules de dimensions supérieures à 80 micromètres (mode opératoire et appareillage annexe III).

II.2.2.1.2. Poids et rapports volumiques

Le poids volumique d'un matériau est le poids par volume dudit matériau. L'essai de Proctor modifiée est utilisé pour déterminer les caractéristiques physiques qui sont : le poids total humide, le poids net humide, la densité humide (ρ_h), la densité sèche (ρ_d). Les autres paramètres tel que l'indice de vide (e), la porosité (n), la compacité (c) sont déterminés par les calculs.

II.2.2.1.3. Essai de la teneur en eau

Par définition la teneur en eau, est le rapport du poids d'eau contenu dans l'échantillon au poids du sol sec. Les mesures des teneurs en eau ont pour but de déterminer le poids de l'eau libre retenue par capillarité ou par gravité et de l'eau d'absorption (eau liée, eau solide, eau hygroscopique) de l'échantillon humide.

II.2.2.1.4. Limite d'Atterberg

Les limites d'Atterberg sont définies comme des teneurs en eau exprimées en pourcentage du poids de matériau sec. Elles s'effectuent sur une fraction de sol tamisée à un diamètre de 0,4 mm, malaxée et homogénéisée. Les limites d'Atterberg sont caractérisées généralement par les paramètres : la limite de liquidité, la limite de plasticité et l'indice de plasticité. La limite de liquidité **WL** est déterminée à l'aide de l'appareil de Casagrande et celle de plasticité **WP** par la formation des rouleaux de 3 mm de densité et d'environ 5 cm de longueur (annexe III).

II.2.2.2. Hydrodynamique du système aquifère

Les propriétés hydrodynamiques permettent de quantifier le flux d'eaux et d'étudier leur circulation dans le sol. Les propriétés comme le coefficient d'emménagement (S) et la transmissivité (T) peuvent être calculées par les essais de pompage. Le coefficient de perméabilité (K) peut être estimé par la formule de Hazen et les essais d'infiltrations de Porchet. La porosité efficace (n_e) du système aquifère s'estime grâce aux formules algébriques des mécaniques des sols.

Dans le cadre de ce mémoire, il était question d'évaluer les coefficients de perméabilité (K) par la formule empirique de Hazen ($K = 100.d^2_{10}$) et la porosité efficace ($1-(\rho_d/\rho_s)$).

Conclusion

L'acquisition des données sur les caractéristiques de l'aquifère à nappe libre s'est faite en trois étapes, la première étant l'étape de calcul des paramètres du bilan hydrique et hydrologique, la deuxième sur le terrain et la troisième au laboratoire. Au terrain l'on a procédé au recensement des ouvrages, aux analyses physiques des eaux, au suivi piézométrique et aux échantillonnages des eaux et des sols. Les analyses chimiques des eaux ont été effectuées au Laboratoire National des Eaux d'Abéché, les faciès hydrochimiques ont été réalisés par le logiciel Diagrammes et puis les essais des caractérisations des sols y ont été effectués au Laboratoire géotechnique de la société Arab-Contractor d'Abéché. Notamment l'essai de granulométrie qui a permis l'identification des matériaux et également de déterminer la conductivité hydraulique. Les essais de teneurs en Eau initiales des matériaux et les limites d'Atterberg qui ont permis de déterminer les limites de plasticités, limites de liquidités, les indices de plasticités et les indices de consistance.

CHAPITRE III : PRESENTATION ET INTERPRETATION DES RESULTATS

Introduction

Les données acquises sur le terrain et les résultats d'analyses des échantillons d'eau et sol au laboratoire ont permis d'apporter d'amples informations sur la dynamique des eaux, la piézométrie, la recharge, et la nature physico-chimique des eaux. Les résultats sont présentés dans les paragraphes suivants.

III.1. Caractérisations hydrologique physique et hydrodynamique

III.1.1. Paramètres hydrologiques

Les résultats du bilan hydrique (Tableau 2) permettent de constater que l'évapotranspiration potentielle (ETP) est supérieure aux précipitations (P) presque pendant toute l'année à l'exception du mois d'Août. Les pertes par évapotranspiration réelle sont de 375,1 mm pour une précipitation de 419 mm soit 89,5%. L'écoulement est nul d'Avril à juillet. La réserve maximale pour les sols est fixée à 50mm (zone tropicale aride). Pour le ruissellement et l'infiltration on observe un équilibre de pourcentage qui est 5,2% chacun (Tableau 3). Quant à la recharge de la nappe phréatique, elle s'amorce dès le mois d'août, tandis que la décharge commence en novembre.

Tableau 2 : Eléments du bilan hydrologique (année moyenne 1991-2021) calculés par la méthode de Thornthwaite

	Avril	Mai	Juin	Juil.	Août	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mar.	Totaux
ETP (mm)	297,3	325,9	262,1	167,3	111,1	140,9	189,4	137,6	87,0	78,2	123,7	207,8	2128,4
P (mm)	1,0	10,0	24,0	119,0	205,0	54,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	419,0
T (°C)	32,5	32,7	31,3	28,0	25,7	27,5	29,5	27,8	24,9	24,3	27,4	30,0	28,5
F (λ)	1,04	1,11	1,08	1,12	1,08	1,02	1,01	0,95	0,97	0,97	0,91	1,03	////////
i	17,0	17,2	16,1	13,6	11,9	13,2	14,7	13,4	11,4	11,0	13,1	15,1	167,6
ETR (mm)	1,0	10,0	24,0	119,0	111,1	104,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	375,1
DE (mm)	296,3	315,9	238,1	48,3	0,0	36,9	183,4	137,6	87,0	78,2	123,7	207,8	1753,3
Lep (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	93,9	-50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	43,9
Ri (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	////////
Dri (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	50,0	-50,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
S (mm)	0,0	0,0	0,0	0,0	21,9	11,0	5,5	2,7	1,4	0,7	0,3	0,3	43,9
Hr (%)	-99,7	-96,9	-90,8	-28,9	84,5	-61,7	-96,8	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0	-100,0	////////

Tableau 3 : Bilan hydrologique (année moyenne 1991-2021) de la zone étudiée

Termes du bilan	Valeurs numériques (mm)	Proportion (%)
P (mm)	419,0	100,0
E (mm)	375,1	89,5
R (mm)	21,9	5,2
I (mm)	21,9	5,2

P : Précipitations ; E : Evapotranspiration ; R : Ruissellement ; I : Infiltration.

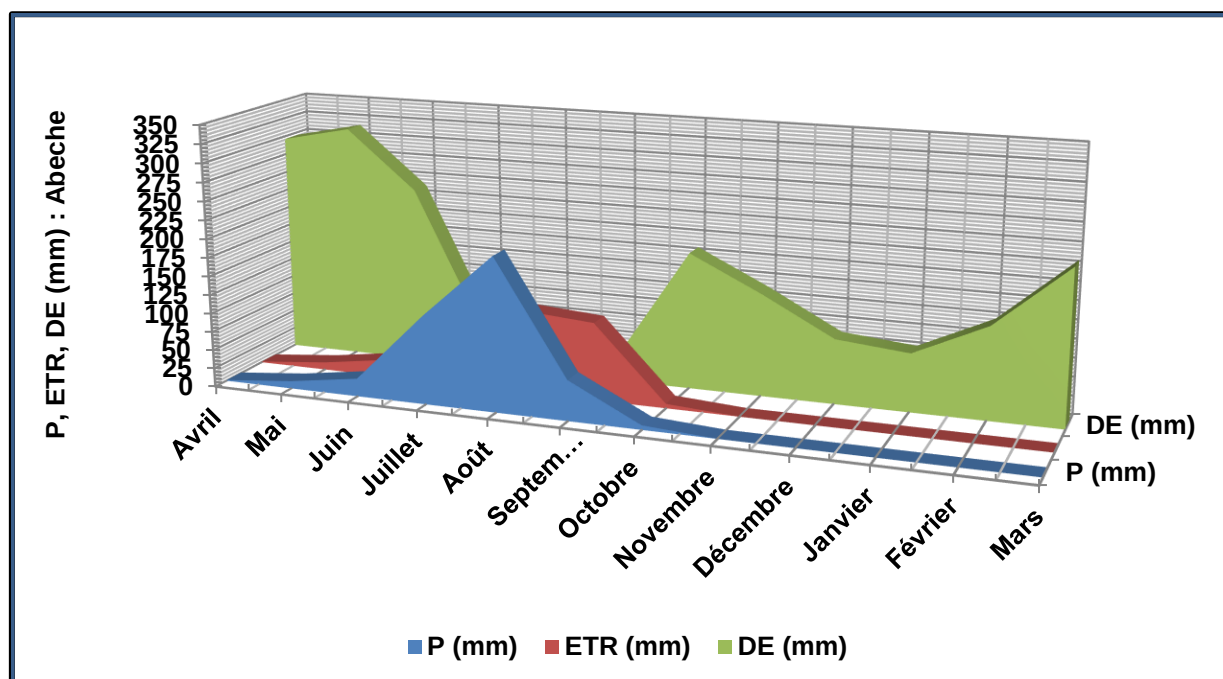


Figure 14 : Diagramme du bilan hydrologique d'Abéché (1991-2021)

III.1.2. Paramètres physiques de sol

III.1.2.1. Granulométrie

La granulométrie a été effectuée sur cinq échantillons (ZN3, KH41, DT18, AM35, BG44). Les résultats obtenus sont consignés dans le Tableau 4. Dans ces échantillons les fractions graveleuses sont comprises entre 80,91 à 56,96%. Les proportions des gros sables varient respectivement entre 29,36 à 11,95%. Les sables fins sont respectivement dans l'ordre de 6,12 à 13,55%. Les différentes courbes granulométriques sont présentées dans la figure 18, montrant presque la même morphologie. Les valeurs décroissent et sont concaves vers le bas. Ces courbes n'ont pas permis d'avoir le diamètre efficace d_{10} . Pour cette raison nous avons inspiré de la méthode d'interpolation linéaire utilisée par Fredlund et al. (2000) pour déterminer le diamètre d_{10} . Ainsi les valeurs trouvées sont comprises entre 0,007 et 0,03 mm.

D'après les différentes propositions obtenues ci-haut, les sédiments ont une nature fortement sableuse favorisant l'infiltration des eaux et leur circulation relativement rapide au sein de la nappe (Le Marechal, 1966).

Tableau 4 : Composition granulométrique des échantillons

Fraction granulométrique	ZN3	DT18	AM35	KH41	BG44
Graviers (%)	79,21	80,91	56,96	66,89	80,05
Gros sables (%)	14,65	11,95	29,36	24,14	13,34
Sables fins (%)	6,12	7,12	13,55	8,97	6,55
Total	100	100	100	100	100

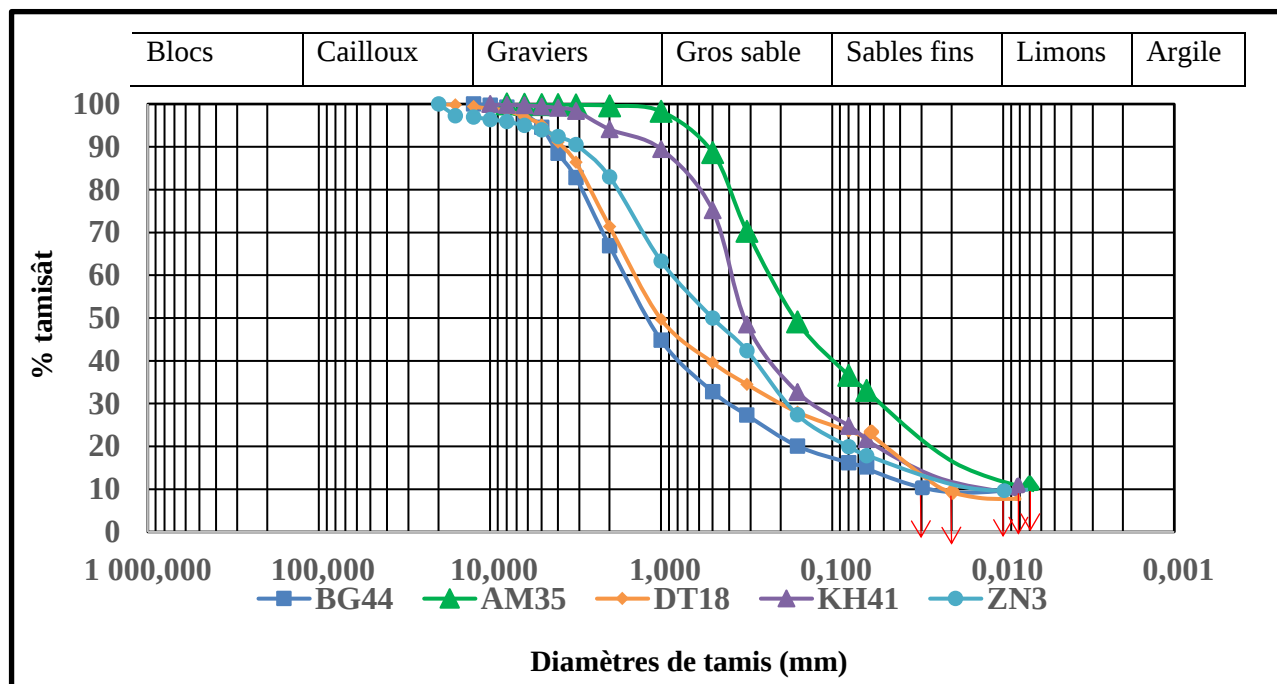


Figure 15 : Courbes granulométriques des matériaux de la localité d'Abéché

III.1.3.2. Teneurs en eau et les caractéristiques physiques de sols

Les résultats issus des mesures de teneurs en eau initiales et des différentes caractéristiques physiques sont consignés dans le Tableau 5.

On observe des teneurs qui sont comprises entre 4,2 % pour l'échantillon (KH41) et 7,3 % pour celui d'AM35. Pour la densité humide, les valeurs sont comprises entre 2,10 et 2,22. La densité sèche est comprise entre 2,01 et 2,08. Les différentes valeurs des poids volumiques humide et sec, de la compacité et de l'indice de vide sont présentées dans le Tableau 5. Pour le poids volumique de la matière constituant les grains solides nous avons pris celui de quartz qui est généralement d'environ 2,65 g/cm³.

Tous les résultats des paramètres physiques des différents échantillons de sols prélevés dans la localité d'Abéché permettent de conclure que ces sols ont :

- une faible capacité de rétention, cela est dû au fait que la fraction graveleuse est importante ;
- des poids volumiques humide et sec qui varient très peu et sont presque constants.

Tableau 5 : Valeurs des teneurs en eau initiales

Échantillons (profondeur)	ZN3 (0,70m)	DT18 (0,60m)	AM35 (0,80m)	KH41 (1m)	BG44 (0,60m)
Teneurs en eau (%)	5,6	4,2	5,6	7,3	6,2
Densité humide	2,20	2,17	2,15	2,22	2,15
Poids volumique humide (g/cm ³)	2,20	2,17	2,15	2,22	2,15

Échantillons (profondeur)	ZN3 (0,70m)	DT18 (0,60m)	AM35 (0,80m)	KH41 (1m)	BG44 (0,60m)
Densité sèche	2,08	2,01	2,06	2,07	2,02
Poids volumique sec (g/cm ³)	2,08	2,01	2,06	2,07	2,02
Indice de vide (%)	27,38	31,83	28,63	28	31,18
Compacité	0,79	0,76	0,78	0,79	0,77

III.1.3.3. Limites d'Atterberg

Les résultats relatifs aux limites d'Atterberg sont consignés dans le Tableau 6. Il ressort de ce tableau que les limites de liquidité sont supérieures à celles de plasticité et les indices de plasticité sont dans la gamme de plasticité faible. Pour les indices de consistance, les valeurs obtenues sont supérieures à l'unité.

Tableau 6 : Valeurs des limites d'Atterberg

Échantillons (profondeur)	ZN3 (0,70m)	DT18 (0,60m)	AM35 (0,80m)	KH41 (1m)	BG44 (0,60m)
WL (%)	20,1	32,1	20,6	18,4	39
WP (%)	17,34	24,29	16,59	15,69	28,74
IP (%)	2,76	7,81	4,01	2,71	10,26
IC (%)	5	3,57	3,7	4,09	3,19

III.1.4. Paramètres hydrodynamiques

D'après les courbes granulométriques et l'interpolation linéaire, les valeurs obtenues des conductivités hydrauliques (perméabilités) sont comprises entre $4,3 \cdot 10^{-3}$ et 10^{-2} m/s. Les porosités efficaces se situent dans l'intervalle de 21 et 24 (Tableau 7).

Tableau 7 : Valeurs des perméabilités & porosités efficaces

Échantillons (profondeur)	ZN3 (0,70m)	DT18 (0,60m)	AM3 (0,80m)	KH41 (1m)	BG44 (0,60m)
Perméabilités (m/s)	$6,4 \cdot 10^{-2}$	$4 \cdot 10^{-2}$	$4,3 \cdot 10^{-3}$	10^{-2}	$9 \cdot 10^{-2}$
Porosités efficaces (%)	21,50	24,15	22,26	21,88	23,77

III.2. Aspects piézométriques

III.2.1. Caractérisation piézométrique

Les niveaux statiques de hautes eaux observés sur le terrain varient de 2,60 à 19,40 m, pour une moyenne de 11,31 m. Par contre, les niveaux statiques de basses eaux oscillent de 4,5 à 33 m, pour une moyenne de 16,48 m (Tableau 8).

Les niveaux piézométriques de quarante-quatre (44) puits suivis fluctuent de 517,1 et 540,88 m avec une moyenne de 528,01 m pendant la période de hautes eaux et entre 513,6 et 535,78 m avec une moyenne de 522,84 m en période minimale. Quant à la variation des niveaux piézométriques, on observe les valeurs de 0,16 m (P43) à 21 m (P40), avec une fluctuation moyenne annuelle de 5,17 m.

Tableau 8 : Synthèse des données piézométriques de la localité d'Abéché

Ouvrages	Altitudes (m)	NS HE (m)	Margelle (m)	NS BE (m)	NP HE (m)	NP BE (m)	VNP (m)
P1	534,03	4	0,6	5,5	530,63	529,13	1,5
P2	535,03	3,5	0,5	4,5	532,03	531,03	1
P3	531,74	6,4	0,5	8,3	525,84	523,94	1,9
P4	531,9	8,2	0,35	9,5	524,05	522,75	1,3
P5	540	19,1		21,5	520,9	518,5	2,4
P6	540,1	16		17,5	524,1	522,6	1,5
P7	540	18,2		20	521,8	520	1,8
P8	542,93	13,8	0,3	20	529,43	523,23	6,2
P9	539,8	14,4	0,8	19	526,2	521,6	4,6
P10	538,64	13,6	0,45	20	525,49	519,09	6,4
P11	539,47	15,3	0,2	19	524,37	520,67	3,7
P12	539,14	16	0,16	20	523,3	519,3	4
P13	540,54	18	0,18	24	522,72	516,72	6
P14	541	18,3	0,18	21	522,88	520,18	2,7
P15	541,11	17,56	0,17	22	523,72	519,28	4,44
P16	539,8	17,5	0,17	24	522,47	515,97	6,5
P17	539,7	16,9	0,16	24	522,96	515,86	7,1
P18	540,8	19,4	0,19	24	521,59	516,99	4,6
P19	542,4	17,5	0,18	20	525,08	522,58	2,5
P20	541,66	14,3		19	527,36	522,66	4,7
P21	541,99	16,3	0,4	21	526,09	521,39	4,7
P22	543,54	4,7	0,4	10	539,24	533,94	5,3
P23	544,01	4,4	0,4	14	540,01	530,41	9,6
P24	542,87	5		12,4	537,87	530,47	7,4
P25	544,06	4,3		8,3	539,76	535,76	4
P26	543,79	7,3		13	536,49	530,79	5,7
P27	543,7	11,6		15,6	532,1	528,1	4
P28	555,58	14,9	0,2	20	540,88	535,78	5,1
P29	537,99	5		9	532,99	528,99	4
P30	536,11	2,6	0,8	6	534,31	530,91	3,4
P31	535,9	2,7	0,6	4,7	533,8	531,8	2
P32	526,25	3,6	0,8	11,3	523,45	515,75	7,7

Ouvrages	Altitudes (m)	NS HE (m)	Margelle (m)	NS BE (m)	NP HE (m)	NP BE (m)	VNP (m)
P33	527,2	2,7	0,2	13	524,7	514,4	10,3
P34	528,8	3,2	0,5	12	526,1	517,3	8,8
P35	529,34	4,5	0,5	11	525,34	518,84	6,5
P36	541,66	18,3	0,2	24	523,56	517,86	5,7
P37	541,66	18		25	523,66	516,66	7
P38	545,83	17		27	528,83	518,83	10
P39	546,81	18	0,1	30	528,91	516,91	12
P40	546,76	12		33	534,76	513,76	21
P41	520	3,5	0,6	7	517,1	513,6	3,5
P42	530,59	6,15	0,4	10	524,84	520,99	3,85
P43	543,87	13,84	0,5	14	530,53	530,37	0,16
P44	539,74	10,1	0,4	11	530,04	529,14	0,9
Moy.	539,04	11,31	0,38	16,48	528,01	522,84	5,17
Med.	540,05	13,70	0,4	18,25	525,97	521,19	4,6
Max.	555,58	19,40	0,8	33	540,88	535,78	21
Min.	520	2,60	0,1	4,5	517,1	513,6	0,16
NS HE : Niveaux statiques de Hautes eaux ; NS BE : Niveaux statiques de Basses eaux ; NP HE : Niveaux piézométriques de Hautes eaux ; NP BE : Niveaux piézométriques de Basses eaux ; VPN : Variations des niveaux piézométriques ; Moy. : Moyenne ; Med. : Médiane ; Max. : Maximum ; Min : Minimum.							

III.2.2. Cartes piézométriques

L'élaboration des cartes piézométriques de l'aquifère à nappe libre de la localité d'Abéché s'est faite par la méthode d'interpolation par krigeage. C'est une méthode géostatistique qui permet de réaliser l'interpolation approximative, spatiale d'une variation régionalisée par calcul de l'espérance mathématique d'une variable aléatoire, utilisant l'interprétation et la modélisation du variogramme expérimental. Le logiciel surfer 12 a été utilisé à cet effet. L'établissement de la carte piézométrique a pour but de déterminer les principales directions de l'écoulement souterrain et les aires d'alimentation de la nappe. Les niveaux piézométriques calculés à partir des données recueillies sur le terrain ont permis de réaliser les cartes piézométriques maximale (hautes eaux) et minimale (basses eaux) voir (Figure 16, 17 et 18). Ces cartes sont marquées par des écoulements non uniforme des eaux souterraines caractérisées par une direction variée des lignes de courant qui sont soit convergentes soit divergentes. Concernant les courbes hydro-isohypses (équidistantes de 1m), l'attention a été portée sur la forme et la courbure de leurs arcs, indicateurs de la direction et de l'intensité de l'écoulement. Et pour finir une carte de fluctuation de l'aquifère a été établie par différence des niveaux piézométriques de hautes et basses eaux (Figure 16, 17).

La carte piézométrique établie pour la période de hautes eaux montre que le sens de l'écoulement général est de NE vers SW, les dômes piézométriques observées autour du secteur SE de la zone d'étude correspondent aux zones de stockage ou zone propice à l'implantation d'autres ouvrages de captage.

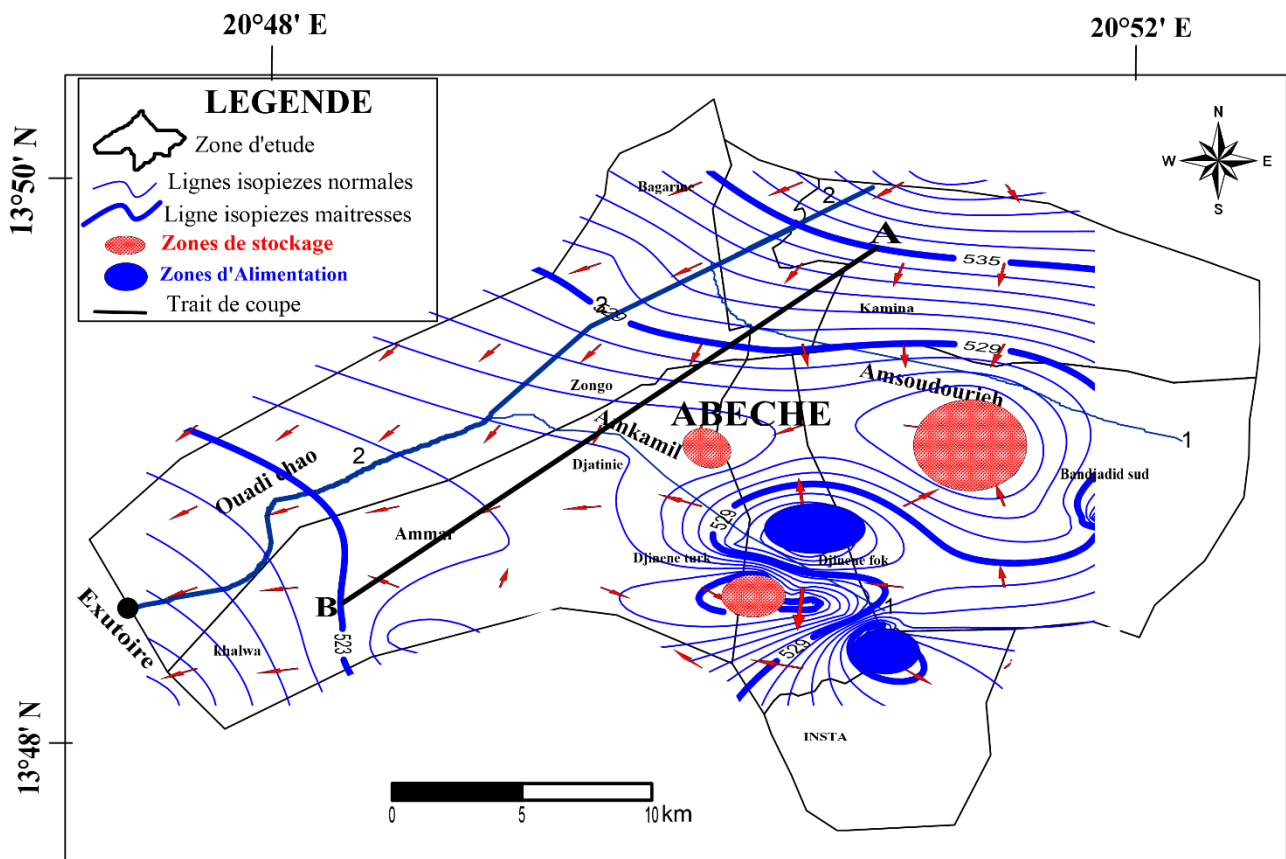


Figure 16 : Carte piézométrique de hautes eaux

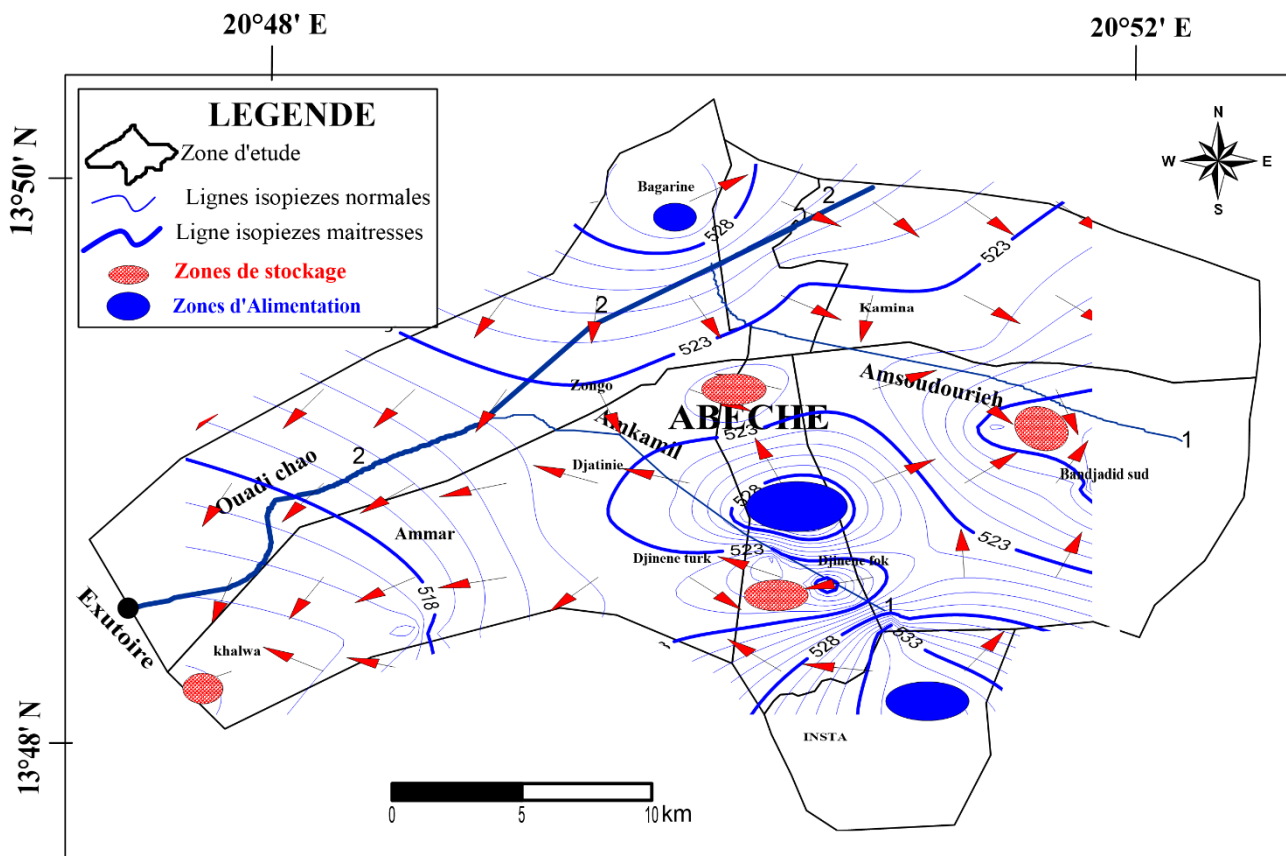


Figure : 17 Carte piézométrique de basses eaux

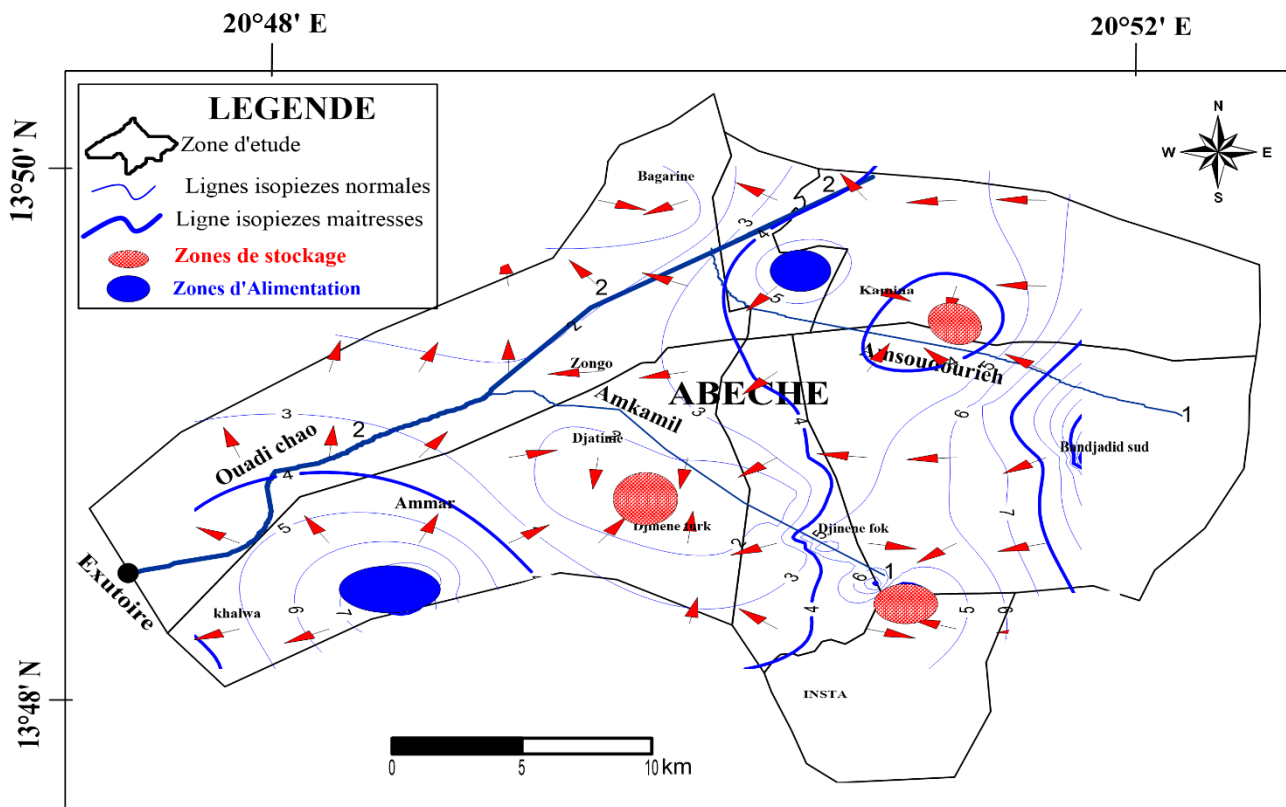


Figure :18 Carte piézométrique de fluctuation des eaux

III.2.3. Mécanisme de la recharge

Afin de mieux illustrer le comportement hydrodynamique et les échanges possibles entre les eaux de surfaces et les eaux souterraines (Figure 19), une coupe a été réalisée suivant le trait de coupe AB (Figure 16).

Sur le plan hydrodynamique, le profil réalisé montre que la courbe piézométrique passe en dessous de cours d'eau, ce qui explique que la nappe est alimentée à la fois par les cours d'eau et par l'infiltration enregistrée durant la saison pluvieuse.

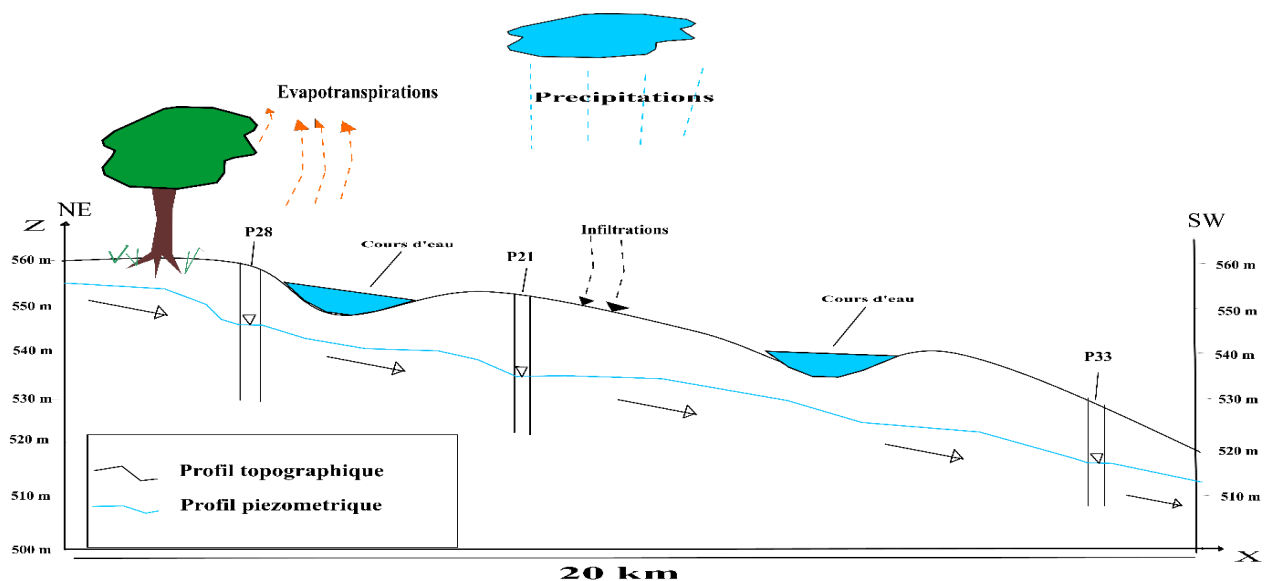


Figure : 19 Interaction entre l'eau de surface et souterraine

III.3. Caractérisations physico-chimiques des Eaux

III.3.1 Paramètres physiques

Les paramètres physiques mesurés sur le terrain sont la température, le pH, la conductivité électrique et les solides totaux dissous (TDS). La turbidité est déterminée au laboratoire. Les valeurs obtenues lors des différentes mesures sont présentées en annexe IV.

Les variations de températures sont comprises entre 29,4 à 31,4 °C avec une moyenne de 30,33 °C (Tableau 9).

Les valeurs du pH enregistrées sont respectivement 6,52 à 7,86 pour une moyenne de 7,32 (Tableau 9). L'analyse des valeurs de la conductivité électrique montre que les eaux de la localité présentent une gamme comprise entre 277 µS/cm pour l'échantillon KHP41 et 4 450 µS/cm pour l'échantillon BGP44 avec une moyenne de 1 310 µS/cm.

Les TDS varient de 139 à 2230 mg/l avec une moyenne de 655,9 mg/l (Tableau 9).

La turbidité échelonne entre 1,17 et 5,81 NTU pour une moyenne de 2,74 NTU.

Tableau 9 : Variations statistiques des paramètres physiques

Paramètres	T	pH	CE	TDS	Turbidité
Unités	°C	-	µS/cm	NTU	mg/l
N	10	10	10	10	10
Min.	29,4	6,52	277	139	1,17
Max.	31,4	7,86	4450	2230	5,81
Moy.	30,33	7,32	1310	655,9	2,74
Med.	30,3	7,33	819,5	409,5	2,62
T : température ; pH : potentiel d'hydrogène ; CE : Conductivité électrique TDS : solide totaux dissous ; N : nombre ; Min : minimum ; Max : maximum ; Moy : moyenne ; Med : médiane					

III.3.2. Paramètres chimiques des eaux

Les différentes valeurs obtenues lors de mesures au laboratoire sont consignées en Annexe IV.

III.3.2.1. Cations majeurs et sommes des équivalents cations (TZ+)

Les teneurs alcalins (Na⁺ et K⁺) sont respectivement comprises entre 0,7 et 3,7 mg/l pour le sodium avec une moyenne de 1,8 mg/l et 3 et 44,1 mg/l avec une moyenne 9,3 mg/l pour le potassium (Tableau 10). Les alcalino-terreux (Ca²⁺ et Mg²⁺) varient respectivement de 15 et 181 mg/l avec une moyenne de 80 mg/l pour le calcium, par contre le magnésium est compris entre 3,89 et 35,96 mg/l avec une moyenne de 9,33 mg/l (Tableau 10).

Pour la somme des équivalents cations (TZ⁺) on y retrouve les valeurs comprises entre 1,57 et 13,29 méq/l avec une moyenne de 5,10 méq/l (Tableau 10).

III.3.2.2. Anions majeurs et sommes des équivalents anions (TZ-)

Les concentrations en bicarbonates (HCO_3^-) varient entre 29 et 151 mg/l avec une moyenne 77 mg/l (**Tableau 10**). La teneur en ion chlorure (Cl^-), échelonne de 9 et 232 mg/l avec une moyenne 75 mg/l.

Quant aux teneurs des ions sulfate (SO_4^{2-}) et nitrate (NO_3^-), les valeurs sont comprises entre 15 et 164 mg/l, 0 et 36 mg/l avec des moyennes respectives 70,30 mg/l pour les ions sulfates et 11,13 mg/l pour les nitrates.

La somme d'équivalents anions (TZ-) oscille entre 1,55 et 13,03 méq/l pour une moyenne de 5 méq/l.

Tableau 10 : Variations statistiques des paramètres chimiques (ions majeurs)

Paramètres	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{2-}	NO_3^-	TZ ⁺	TZ ⁻
Unités	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	méq/l	méq/l
N	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10
Mn.	3	0,7	15	4,37	29	9	15	0	1,57	1,55
Max.	44,1	3,7	181	35,96	151	232	164	36	13,29	13,03
Moy.	9,3	1,8	80	9,94	77	75	70,3	11,13	5,1	5
Med.	4	1,9	52	6,8	60	65	59	5,55	4,14	4,08

III.3.2.3. Éléments mineurs

Les teneurs des ions ammonium varient entre 0 et 2,51 mg/l avec une moyenne de 0,56 mg/l (Tableau 11). Le fer a pour teneurs comprises entre 0 et 0,36 mg/l avec une moyenne de 0,07 mg/l. Le fluor varie également de 0 à 0,73 mg/l avec une moyenne de 0,38 mg/l.

Tableau 11 : Variations statistiques des éléments en trace

Paramètres	Fe	F ⁻	NH ₄ ⁺
Unités	mg/l	mg/l	mg/l
N	10	10	10
Min.	0	0	0
Max.	0,36	0,73	2,51
Moy.	0,07	0,38	0,56
Med.	0	0,38	0,22

III.3.2.4. Balance ionique

Afin de s'assurer de la qualité ou de la fiabilité des analyses effectuées, la balance ionique des résultats est présentée à la Figure 20. Dans la présente étude, la balance ionique de tous les

échantillons analysés a été déterminée. Elle se situe dans l'intervalle de fiabilité de résultats d'analyses excellente où **BI** est inférieure 5%. De ce fait, l'on peut retenir qu'il y'a équilibre entre les cations et les anions.

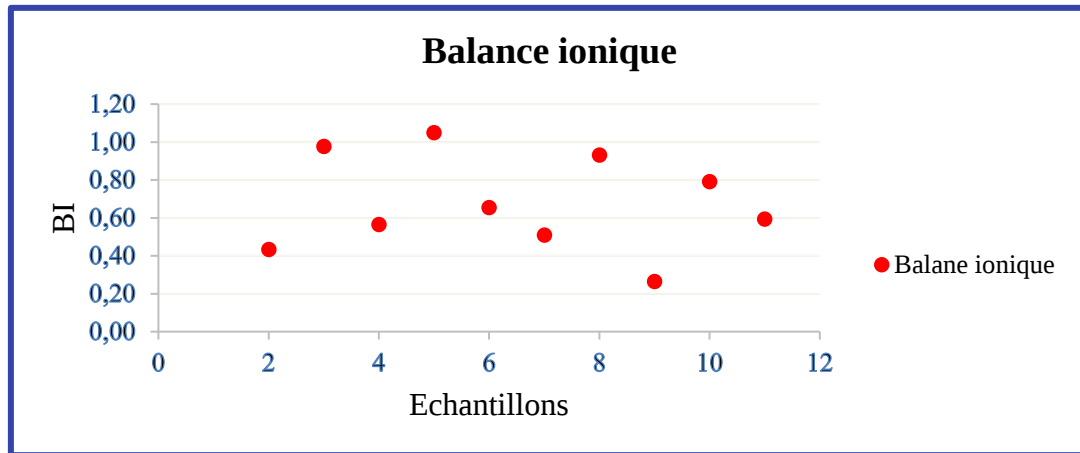


Figure 20 : Balance ionique des eaux souterraines

III.3.2.5. Faciès chimiques

III.3.2.5.1. Projection sur le Diagramme de Piper

La répartition synthétique des ions majeurs dans le diagramme de Piper, relève que les eaux analysées sont diversifiées, couvrant plusieurs zones du losange central :

- Un faciès bicarbonaté calcique et/ou magnésien (KHP41) ;
- Un faciès chloruré et sulfaté, calcique et/ou magnésien (DTP14, BGP44, DTP18, AMP35, ZNP3, BSP40, DFP20, KMP36) et Un faciès hyper chloruré calcique, sulfaté calcique DFP27.

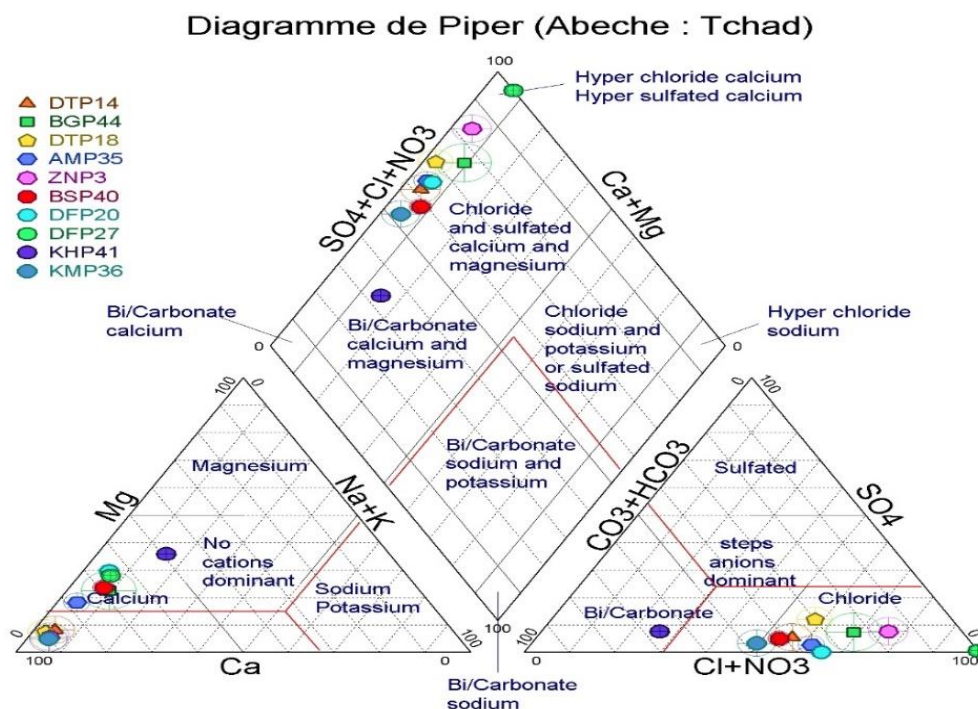


Figure 21 : Diagramme de Piper des eaux souterraines de la zone d'étude

III.3.2.5.2. Projection sur le Diagramme de Schoeller-Berkalof

Après la projection des points sur le Diagramme, l'on peut retenir que la totalité des points présente une composition en éléments majeurs assez semblables exception l'échantillon **DFP27**. En effet, l'allure des courbes des différentes eaux montre une minéralisation dominée par le calcium, le chlorure et légèrement le bicarbonate (Figure 22).

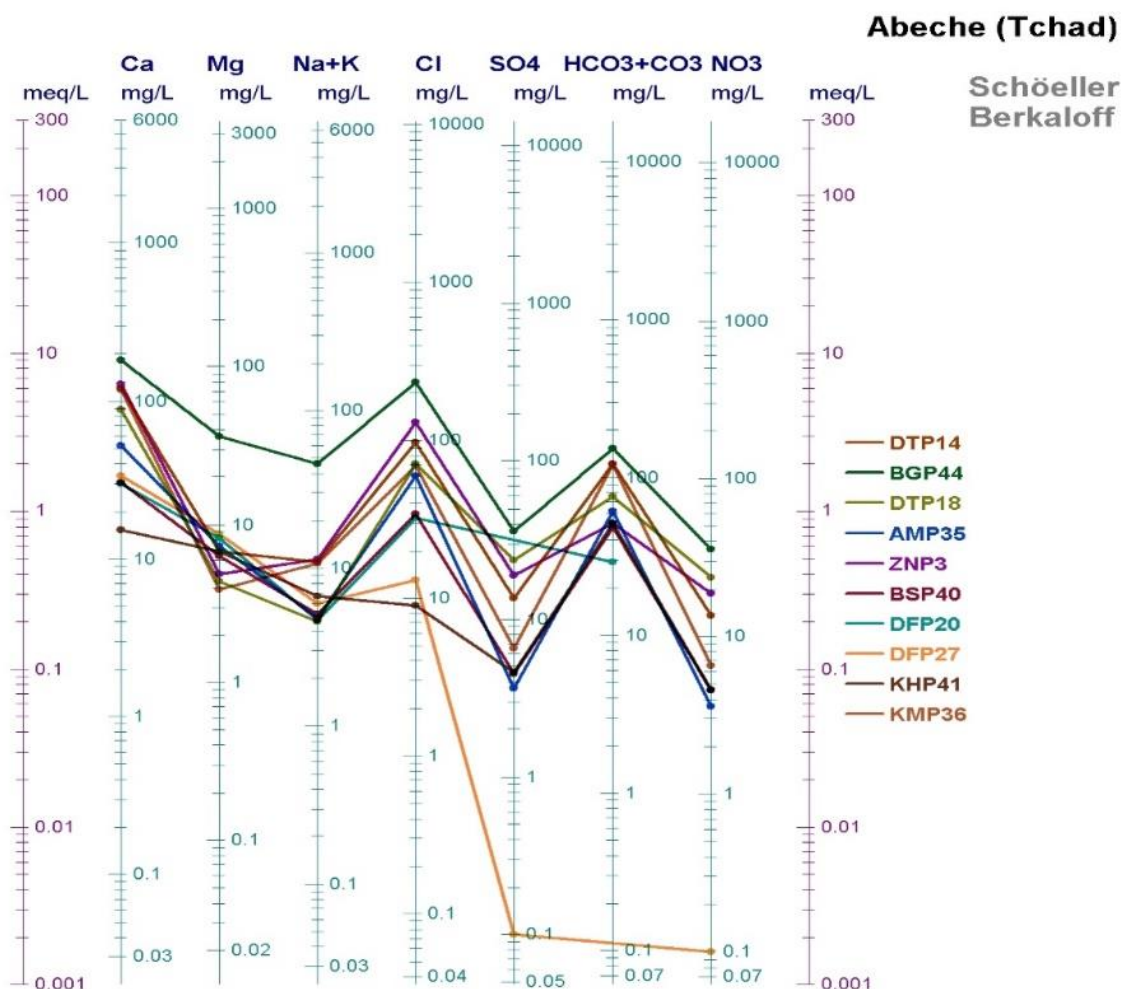


Figure 22 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux souterraines de la zone d'étude

III.3.2.5.3. Projection sur le Diagramme de Riverside et Wilcox

L'analyse des données du rapport d'absorption de sodium (SAR) en fonction de la conductivité électrique sur le Diagramme de salinité de Richards (Figure 23), montre que 10% des échantillons sont dans la classe de C1S1 ; 60% sont dans la classe de C1S2 ; 10% dans la classe C1S3 et 20% des échantillons dans la classe C1S4.

Selon le diagramme de Wilcox (Figure 24) il ressort que 70% des échantillons sont excellents pour l'irrigation ; 10% sont admissibles ; 10% sont médiocres et 10% des échantillons sont mauvais.

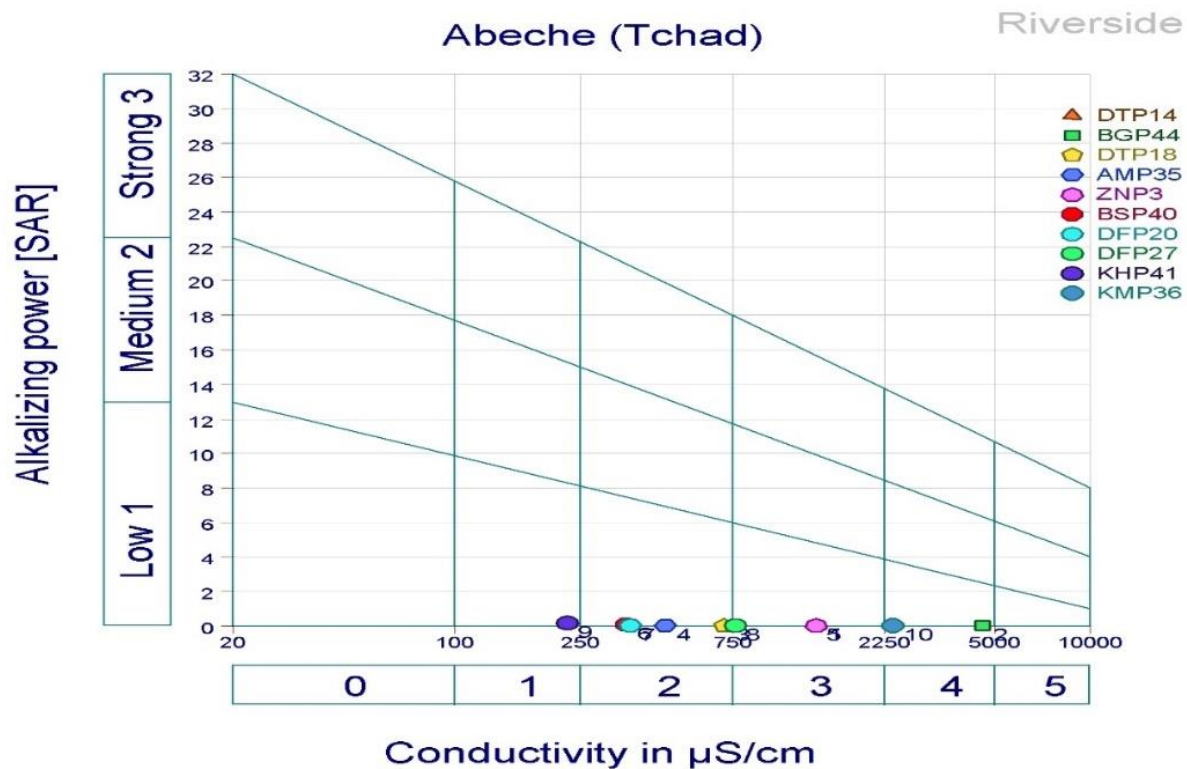


Figure 23 : Répartition des eaux dans le Diagramme de Riverside

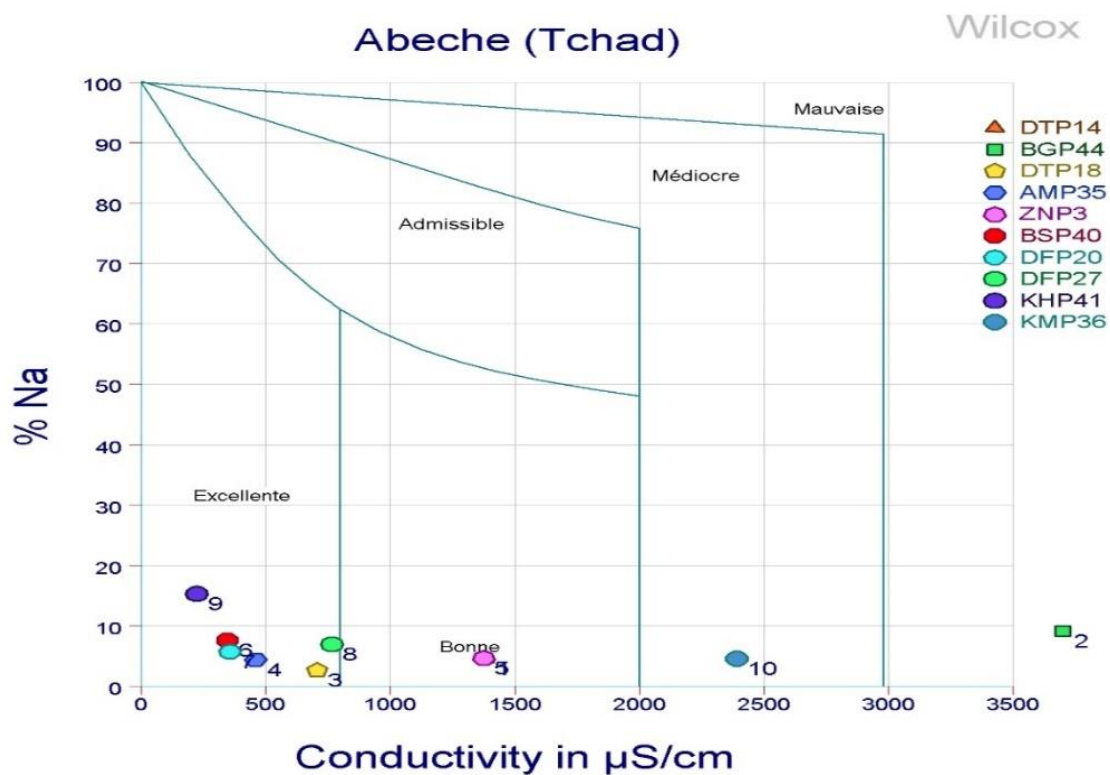


Figure 24 : Répartition des eaux dans le Diagramme de Wilcox

III.4. Interprétation des résultats

Cette partie est réservée aux interprétations des résultats présentés ci-haut.

- Paramètres physiques

Les résultats du Tableau 4 montrent une forte proportion des sols en fractions graveleuses, mais également une faible proportion des sols en fractions fines. La forte proportion de fractions graveleuses confère au sol un comportement grossier caractérisé par une perméabilité élevée.

Les poids volumiques humides des différents sols prélevés à 60 et 100 cm de profondeur ont une faible fluctuation. Le maximum du poids volumique humide est de $2,22 \text{ g/cm}^3$ obtenu à 100 cm de profondeur pour un minimum de $2,15 \text{ g/cm}^3$ pour une profondeur de 60 et 70 cm. Le poids volumique sec minimum est $2,01 \text{ g/cm}^3$ pour une profondeur de 60 cm et maximum est $2,08 \text{ g/cm}^3$ pour une profondeur de 70 cm. Cette faible fluctuation est due à la nature quasi identique de ces sols qui sont tous des produits d'altération issus d'une même roche mère.

La porosité et l'indice de vide ne présentent pas de valeurs assez importantes. Ce qui peut être lié à la nature de la roche.

La teneur en eau varie de 4,2 (60 cm) à 7,3 (100 cm). L'on se rend compte que les matériaux de la zone d'étude entre 60 et 100 cm ont des faibles contenances en eau. Ce qui peut être lié à leur nature mais aussi à la permanence de la nappe phréatique en profondeur et aux variations climatiques en subsurface.

Les limites de liquidité et de plasticité sont très variables. Elles présentent des valeurs élevées à 60 cm de profondeur (**BG44**) et des faibles valeurs à 100 cm de profondeur (**KH41**), Tableau 56. La diminution observée en profondeur indique que le sol est moins fin, moins plastique et présente une granulométrie plus grossière.

Les indices de plasticité des échantillons **ZN3**, **DT18**, **AM35**, **KH41**, **BG44** sont inférieurs à 15. Ce qui leur confère une plasticité assez faible et donc, ont une composition en fractions grossière très importante.

L'indice de consistance de ces sols est supérieur à l'unité. Dans le système de classification des sols généralement utilisés (AASHTO et USCS), l'on qualifie ces sols de « dure ».

- Hydrodynamique

Suivant la référence établie par Collin (2004) :

- Si $k \leq 10^{-9} \text{ m/s}$, la formation est peu perméable à perméable, et non aquifère ;
- Si $10^{-7} \text{ m/s} \leq k \leq 10^{-6} \text{ m/s}$, la formation est peu perméable, l'aquifère est médiocre à mauvais ;
- Si $k = 10^{-5} \text{ m/s}$, la formation est assez perméable, l'aquifère est assez bon ;
- Si $10^{-4} \text{ m/s} \leq k \leq 10^{-2} \text{ m/s}$, la formation est perméable et l'aquifère est très bon à bon.

Ces différentes valeurs de la perméabilité sont d'ordre de grandeur. Selon cette référence nous pouvons conclure que la formation de la zone d'étude est perméable et l'aquifère est très bon à bon.

- Aspects Piézométriques

Les mesures effectuées durant les deux périodes ont servi à l'élaboration de graphes (Figure 25). Ces derniers permettent de faire les observations suivantes :

- En période sèche (basses eaux), les niveaux piézométriques commencent à s'abaisser brusquement du côté des ouvrages où la demande en eau est assez importante ;
- En période pluvieuse (hautes eaux), on observe une remontée brutale et progressive des niveaux des nappes. Les maxima sont atteints en septembre voire en octobre soit deux à trois mois après le début de la saison des pluies.

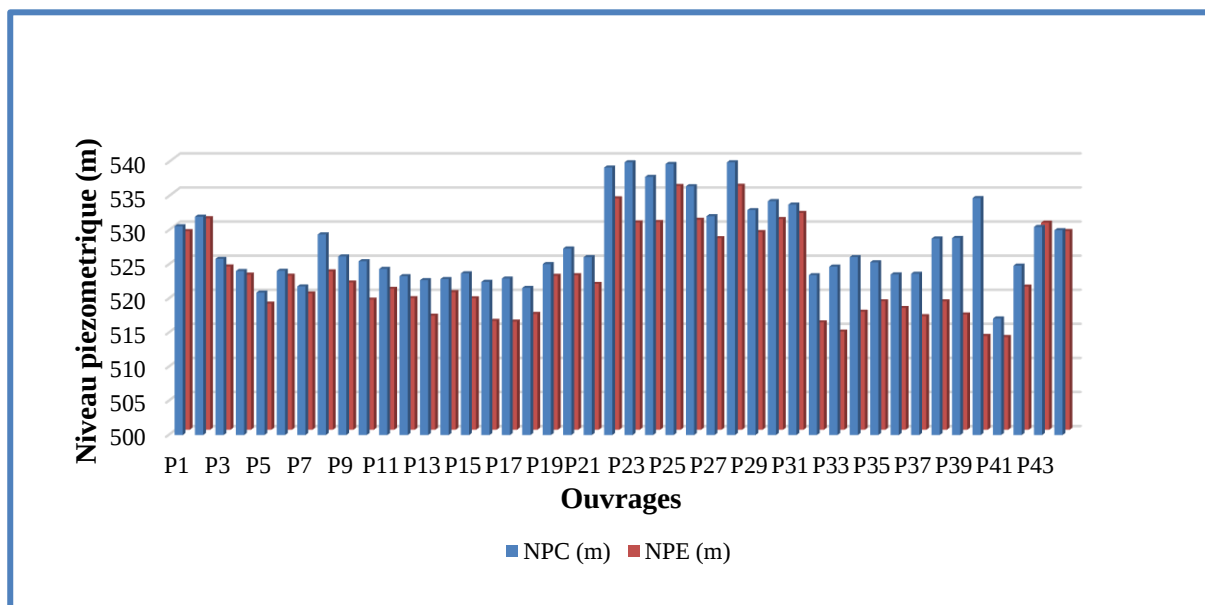


Figure 25 : Histogramme de fluctuation des niveaux piézométriques

- Hydrochimique

D'après les résultats de différentes analyses physico-chimiques des eaux souterraines, l'on peut retenir que les valeurs obtenues sont majoritairement dans la gamme de directives de l'OMS/Tchad. Par contre on observe certains échantillons (**BDP44** et **KMP36**) qui ont des paramètres (la conductivité électrique, le calcium, chlorure) avec des concentrations assez élevées. Cela est dû à la nature géologique où l'eau de l'ouvrage est en contact direct avec la roche (Figure 27 et 28). Du côté des faciès hydrochimiques l'on a pu identifier deux faciès reflétant la diversité des processus de minéralisation des eaux. Cette dernière est d'origine anthropique.

L'ordre d'abondance des éléments chimiques dans les eaux souterraines de la zone se présente comme suit (Figure 26) :

- Cations : 80% Ca^{2+} > 9,3% Mg^{2+} > 8,9% k^+ > 1,7% Na^+ ;
- Anions: 33% Cl^- > 32% HCO_3^- > 30% SO_4^{2-} > 5% NO_3^-

Pour l'irrigation, les diagrammes de salinité de Richards et de Wilcox montrent que les eaux de la zone sont majoritairement excellentes.

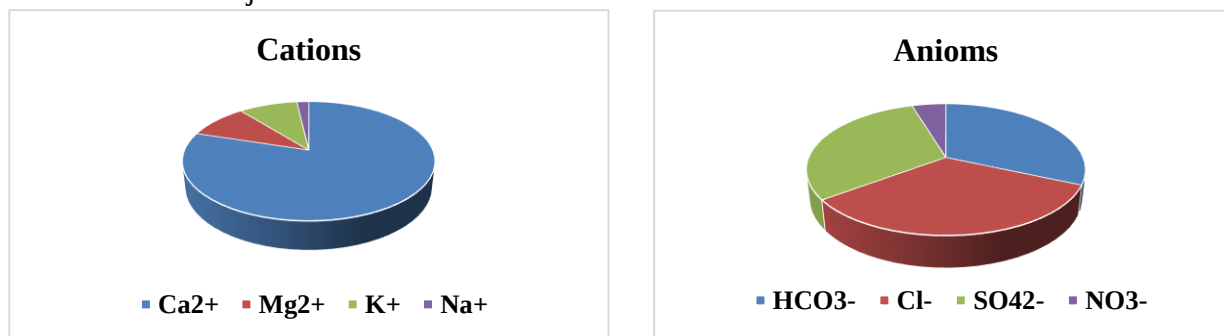


Figure 26 : Diagramme de pourcentage des Cations et Anions

- L'environnement immédiat des ouvrages

L'environnement immédiat de l'ouvrage constitue une zone d'une extrême vulnérabilité en ce qui concerne les risques de l'eau captée. Lors des campagnes de terrain, il a été observé que la majorité des ouvrages recensés sont destinés à la consommation domestique et à l'irrigation. Toutefois, certains d'entre eux présentent des périmètres immédiats mal aménagés ne répondant pas aux normes sanitaires requises (Figure 27 et 28). Cette situation est corroborée par les résultats des analyses physico-chimiques qui relèvent une qualité douteuse des eaux souterraines.



Figure 27 : Puits à côté d'un dépotoir des ordures ménagères



Figure 28 : Eau du puits en contact avec la roche

Conclusion

Au terme de ce chapitre, les méthodes de calcul, les travaux de terrain ainsi que les travaux de laboratoire ont permis la caractérisation du bassin versant sur les plans physique, hydrologique et hydrodynamique.

Pour les méthodes de calcul, les paramètres hydrologique (Evapotranspiration, Ruissèlement, Infiltration, Déficit d'écoulement...) ont été déterminés.

Les travaux de terrain ont permis d'avoir les résultats de paramètres physiques des eaux, les différents niveaux statique et piézométrique des ouvrages pour l'élaboration des cartes piézométriques de la zone.

Les travaux de laboratoire quant à eux ont permis la détermination des paramètres chimiques des eaux, les paramètres physiques des sols ainsi que la construction des courbes granulométriques des sols prélevés de la zone d'étude.

CHAPITRE IV : DISCUSSION DES RESULTATS

Introduction

Dans ce chapitre, il sera question de discuter sur la dynamique des eaux souterraines, la piézométrie, et l'hydrochimie.

IV.1. Hydrodynamique

IV.1.1. Perméabilité ou conductivité hydraulique

Les valeurs de la conductivité hydraulique obtenues sont dans la gamme de $10^{-4} \text{ m/s} \leq K \leq 10^{-2} \text{ m/s}$. la comparaison des données sur la perméabilité du bassin versant du ouadi chao avec les travaux antérieurs montrent que les perméabilités obtenues pour les sédiments du bassin versant de la zone d'étude sont très élevées, contrairement à celles obtenues par Feumba (2005) au Cameroun (soit 1.10^{-12} m/s pour un sable argileux et 7.10^{-11} m/s pour une argile rougeâtre), Abou Babaye (2012) au Niger (respectivement $2,42.10^{-7} \text{ m/s}$ et $2,6.10^{-5} \text{ m/s}$). Ces données se rapprochent de celles déterminées par Djeuda et al. (2000) dans le bassin versant de l'Anga'a, soit $2,3.10^{-5} \text{ m/s}$ et 11.10^{-3} m/s .

Les valeurs de la conductivité du bassin versant de la zone laissent envisager une alimentation rapide de l'aquifère supérieur par les eaux de précipitations, donc un taux d'infiltration important dans ce bassin. Ces valeurs témoignent d'un écoulement latéral grandement facilité par la granulométrie, présentant l'avantage d'une alimentation des aquifères par les cours d'eau en période de crues.

IV.1.2. Fluctuation de nappe

Les niveaux statiques de mai 2025 (basses eaux) ont varié entre 4,5 et 33 m, ce qui représente une baisse assez importante par rapport à ceux d'Octobre 2024 (hautes eaux) qui varient 2,60 et 19,40 m. Les fluctuations les plus importantes sont observées aux puits (P39, P40). Les fortes fluctuations des niveaux d'eau souterraine observées dans la zone seraient liées à la variabilité du climat dominée par une longue saison sèche qui favorise l'évaporation et le tarissement des ouvrages. Elles seraient également dues à l'importante exploitation des ouvrages. Les niveaux statiques mesurés sont légèrement supérieurs à ceux trouvés par Aboubakar (2021) soit 6,07 et 18,48 m et Habib (2023) soit 0,4 et 19,48 m dans la zone d'étude. Par contre, ces niveaux statiques sont du même ordre de grandeur que ceux obtenus par Khalid (2024) dans la même zone.

IV.1.3. Cartes piézométriques

L'analyse des cartes piézométriques fait ressortir les points suivants :

- Les zones à axes d'écoulement centripètes, constituent les aires d'alimentations de la nappe. Elles sont illustrées par de dômes piézométriques (figure 16, 17 et 18)
- Les zones à axes d'écoulement centrifuges sont les zones de drainage ou de recharge ; celles-ci présentent l'avantage d'être toujours alimentées. Elles constituent de bons sites favorables à

l'implantation des ouvrages de captages quel qu'en soit la période de l'année (Figure 16, 17 et 18)

IV.2. Hydrochimiques

Les études menées sur les eaux souterraines de la ville d'Abéché présentent des résultats d'une part qui sont en accord avec certains travaux antérieurs et d'autre part en contradiction. Les valeurs des cations et anions sont variables. Ceci pourrait s'expliquer par les types de milieux étudiés, les conditions climatiques et la nature géologique des sols qui peuvent influencer les eaux.

IV.2.1. Paramètres physiques

▪ Température

Dans l'ensemble des eaux souterraines, les températures mesurées sont assez homogènes. Elles sont concentrées entre 29,4°C et 31,4°C. Dans la plupart des régions sahéliennes à environ moins de 30 m de profondeur, la température des eaux souterraines est à peu près égale à la température moyenne de l'air (Ngounou Ngatcha, 1993). La zone d'étude est caractérisée par un climat semi-aride, se singularise et échappe en partie à cette règle générale d'où la température moyenne de l'air est comprise entre 26°C et 28°C. Les valeurs de températures obtenues sont en accord avec celles trouvées par Khalid (2024) et Aboubakar (2021).

▪ Potentiel d'hydrogène (pH)

Le potentiel d'hydrogène est un paramètre physique qui varie fortement. Selon les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS), le pH est compris entre 6,5 et 9. Le pH ainsi obtenu des différents échantillons se situe autour de la neutralité. Il s'étend entre 6,52 et 7,86 avec une moyenne de 7,32. Les valeurs de pH trouvées sont en accord avec les normes préinscrites par l'OMS et Khalid (2024).

▪ Conductivité électrique (CE)

Les valeurs de la conductivité électrique obtenues lors de mesures montrent que les eaux souterraines de la zone d'étude sont en général moyennement minéralisées. Elles sont comprises entre 277 $\mu\text{S/cm}$ et 4450 $\mu\text{S/cm}$. Toutefois, quelques points se démarquent par leur forte minéralisation. Cette dernière peut être liée à la nature géologique et à une pollution d'origine anthropique. Quarante-vingt-dix pour-cent (90%) des échantillons ont une valeur inférieure à celle préinscrite par la norme européenne ($\text{CE} \leq 2500 \mu\text{S/cm}$) et dix pour-cent (10%) supérieure. Les valeurs de CE obtenues sont proches de celles de Khalid (2024) et Habib (2023) et supérieures aux valeurs trouvées par Aboubakar (2021) et Dombor et Djébé (2018).

▪ Turbidité

Les valeurs de Turbidité sont dans l'ensemble moins élevées et conformes aux normes de l'OMS à l'exception du puits P44. La valeur élevée de la turbidité observée à Bagarine (P44) pourrait être dû au contact l'eau la roche. Cette forte valeur également soulignée par Khalid (2024) dans ces travaux de recherche. Les autres valeurs sont en concordance avec celles de Dombor et Djébé (2018).

- **Les Solides totaux dissous (TDS)**

Les TDS présentent des valeurs significatives traduisant une minéralisation plus ou moins élevée des eaux souterraines. Ceci serait lié au temps de séjour prolongé des eaux dans les réservoirs souterrains (Abderamane, 2012). Ces valeurs se rapprochent de celles trouvées par Khalid (2024).

IV.2.2. Eléments chimiques

- **Cations majeurs (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ et K^+)**

Les résultats des analyses des eaux montrent que le calcium représente le principal cation alcalino-terreux. Les concentrations en magnésium sont très faibles à celles de calcium. Cette dominance pourrait provenir d'une solubilisation préférentielle des minéraux de calcite du réservoir (Abakar, 2015).

Du côté de rapport sodium/potassium, les concentrations en potassium sont supérieures à celles de sodium. Ceci s'explique par le fait que les formations argileuses de la zone sont riches en potassium et il y'a également l'excès de l'utilisation des engrais chimiques dans la zone. Ces valeurs sont en contradiction avec les travaux de Khalid, (2024) et Aboubakar, (2021).

- **Anions majeurs (Cl^- , HCO_3^- , SO_4^{2-} , NO_3^-)**

Les concentrations en ions chlorures, bicarbonates, et sulfates sont très rapprochées avec des faibles teneurs en Nitrate.

La présence en grande quantité de chlorure dans les eaux analysées de la zone est due au fait que l'utilisation des engrais chimiques est assez importante. Et comme l'ion chlorure possède des caractéristiques différentes de celles des autres éléments, il n'est pas adsorbé par les formations géologiques, ne se combine pas facilement avec les éléments et reste très mobile (Rodier, et al. 2009). On constate également dans cette zone où l'évapotranspiration est importante soit 89,5%. Pour cela que Ngounou Ngatcha, (1993) a souligné que les chlorures sont des bons marqueurs de l'influence de l'évaporation.

La présence des ions bicarbonates dans les eaux souterraines est due à la dissolution des minéraux carbonatés et l'action du CO_2 des eaux météoriques (Parizot, 2008).

La présence des ions sulfates dans les eaux souterraines peut être d'origine naturelle ou anthropique. Leur présence dans les eaux du secteur d'étude ne pourrait être qu'anthropique liés à l'utilisation des engrais chimiques et des produits phytosanitaires.

Les ions nitrates sont le moins représentés dans ces eaux. Ils pourraient provenir de la dégradation microbienne de la matière organique, de l'oxydation d'azote ou des activités anthropiques (Nana, 2015).

- **Éléments mineurs (Fe et NH_4^+)**

Les résultats montrent que la concentration en fer est inférieure à celle préinscrite par l'OMS.

Pour l'ammonium, la quasi-totalité des échantillons ont des valeurs inférieures à celles fixées par l'OMS. Sauf deux (2) qui ont des valeurs supérieures à la norme. Cette concentration serait liée à une origine anthropique et géogénique.

IV.2.3. Faciès hydrochimiques

L'analyse du diagramme de Piper (Figure 24) met en évidence deux faciès chimiques : un faciès chloruré sulfaté calcique et/ou magnésien ; un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. Des résultats semblables ont été obtenus par (Abakar, 2015) dans la zone d'étude.

Conclusion

Au regard de cette discussion, il ressort que les résultats de cette étude sont d'une part en accord avec les travaux antérieurs et d'autre part, en contradiction avec certains d'entre eux. C'est précisément cette dualité qui constitue l'essence même de la recherche.

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

La localité d'Abéché a fait l'objet de la présente étude est située à l'Est du Tchad entre les parallèles 13°48' et 13°50' de latitude Nord et les méridiens 20°48' et 20°52' de longitude Est. Sa superficie est de 3600 hectares avec une altitude moyenne de 615 m. Dans cette zone le climat dominant est de type sahélien avec une longue saison sèche et une courte saison de pluie. Les sols observés sont typiques aux zones sahéliennes dans lequel on trouve : les sols ferrugineux tropicaux, les vertisols, les sols halomorphes et les sols jaunes peu évolués qui naissent souvent sur les granites. Ces sols sont favorables au développement d'une végétation de savane arbustive, herbacée et de steppe. Son réseau hydrographique est constitué essentiellement des cours d'eau temporaire qui sont tributaires de la saison des pluies. L'orographie est marquée par des plaines, des plateaux et des petits massifs montagneux. Sa géologie est constatée et comprend : les formations sédimentaires (Alluvions anciennes fluviales et Dunaires anciens), les formations magmatiques (Roches intrusives anciennes (Granite calco-alcalin)) et les formations métamorphiques (Quartzites et quartzites micacés). Sur le plan hydrogéologique, les nappes rencontrées sont celles des altérites et des alluvions d'une part et celles du socle fracturé/fissuré d'autre part.

Le présent travail avait pour objectif d'effectuer entre autres, une caractérisation physique des sols, à comprendre le comportement hydrodynamique et à évaluer les paramètres physiques de sols et les paramètres physico-chimiques des eaux. Les principaux résultats sont les suivants :

- l'analyse granulométrique des sols de la localité montre une forte proportion en fractions graveleuses et une fraction fine de proportion faible. Ces matériaux ont des valeurs d'indice de plasticité qui varie de 2,7 à 10,26 et des indices de consistances qui sont supérieurs à l'unité. Les valeurs de densité humide sont comprises entre 2,10 et 2,22. Pour la densité sèche les valeurs vont de 2,01 à 2,08. Les perméabilités déterminées varient entre $4,3 \cdot 10^{-3}$ et 10^{-2} m/s, illustrant ainsi que les formations de la localité sont perméables.
- les mesures des niveaux statistiques varient entre 2,60 et 33 m de profondeur et les niveaux piézométriques variant de 513,6 à 540,86 m. Les fluctuations sont observées dans les bas-fonds tandis que les plus fortes sont observées au sommet de collines. Les cartes piézométriques de l'aquifère à nappe libre montrent un écoulement non uniforme des eaux souterraines. Cela est caractérisé sur les cartes par une direction variée des lignes de courant qui sont soit convergentes, soit divergentes. Ces cartes révèlent ainsi des zones à arc de cercle concentrique portant des lignes de courant divergentes et celles à arc de cercle concentrique portant également des lignes de courant convergentes. Ces zones constituent respectivement des zones d'alimentations et de stockages de l'aquifère à nappe libre. Le sens de l'écoulement des eaux va du Nord-est vers le Sud-ouest.

- le bilan hydrique établi, montre que la nappe se recharge de juin à octobre sous l'action de l'excédent pluviométrique et se décharge de novembre à mai lors de l'étiage. Ainsi le comportement hydrodynamique de la nappe est étroitement lié aux fluctuations pluviométriques.
- les analyses physico-chimiques montrent que les eaux sont dans l'ensemble neutre à légèrement basiques ($7,06 \leq \text{pH} \leq 8,17$) avec des minéralisations faibles à excessives ($225 \mu\text{S}/\text{cm} \leq \text{CE} \leq 4590 \mu\text{S}/\text{cm}$). Tous les éléments physico-chimiques analysés sont dans la gamme préinscrite par l'OMS à l'exception de la conductivité électrique (CE) et le potassium (k) de l'échantillon BGP44 qui présentent des concentrations supérieures à la norme de l'OMS. La répartition synthétique des ions majeurs dans le diagramme de Piper montre deux faciès : un faciès chloruré sulfaté calcique et/ou magnésien et un faciès bicarbonaté calcique et/ou magnésien.

La représentation des différents échantillons dans le diagramme de Wilcox montre que les eaux de la zone sont de qualité excellente et bonne pour l'irrigation, exceptée ceux des puits **KMP36** et **BGP44** qui sont médiocre et mauvaise. L'évaluation de la qualité des eaux pour la consommation humaine (potabilité) est faite par la comparaison des valeurs des différents paramètres physico-chimiques des eaux de la localité à celles admises dans les normes de l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS). De ce fait l'on peut retenir que les eaux de la zone sont bonnes pour la consommation humaine selon les normes de l'OMS et aptes pour l'irrigation, mais le risque de leur pollution sont établis. Il est donc important de mettre en place des périmètres de protection autour de ces ouvrages (puits) et de procéder à un traitement préalable de ces eaux avant toute consommation humaine. Il s'agit d'un traitement physique par exemple (filtration et chauffage de l'eau) et chimique (chloration de l'eau).

PERSPECTIVES

Pour améliorer ce travail ou encore compléter cette étude, il serait nécessaire de faire :

- une caractérisation hydrodynamique de l'aquifère profond (Transmissivité T, Coefficient d'emménagement S) ;
- des suivis piézométriques à l'échelle hebdomadaire ou mensuelle sur un cycle hydrologique pour bien observer le comportement des aquifères présents dans la zone étudiée ;
- des analyses bactériologiques afin d'avoir une idée sur la contamination microbiologique des eaux ;
- une étude géophysique afin de mieux caractériser l'aquifère profond.

REFERENCES

- ABAKAR, A. H., (2015).** Cartographie géologique et hydrogéologique de la ville d'Abéché et ses environs : caractérisation de la ressource en eau ; mémoire master en hydrologie et SIG univ.de N'Djamena. 63 p.
- ABDELSALAM, M. G., LIEGEOIS, J. P., STER, R. J., 2002.** The Sahara metacraton. *Journal of African Earth Sciences*, 34, 119-136.
- ABDERAMANE, H., (2012).** Étude du fonctionnement hydrogéochimique du système aquifère du Chari Baguirmi (République du Tchad). Thèse. Univ. de Poitiers. 319 p.
- ABDOU BABAYE, M. S., (2012).** Evaluation des ressources en eau souterraine dans le bassin de Dargol (Liptako – Niger). Thèse de doctorat, Université de Liège / Université Abdou Moumouni.
- ABOUBAKAR, I. S., (2021).** Caractérisation physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines destinées à la consommation humaine dans la ville d'Abéché (Est Tchad) ; mémoire master en hydrogéologie, université de Dschang, 74 p.
- ANONYME, 2024.** Climat d'Abéché. [http://fr.climatedata.org/afrique/tchad/ouaddai région/abéché-766944](http://fr.climatedata.org/afrique/tchad/ouaddai_région/abéché-766944).
- BAGNOULS, F., GAUSSEN, H., (1957).** Les climats biologiques et leur signification géographique. *Ann. Géol XXVI*, pp 193-230.
- BESSELES, B. TRMPETTE, R., (1980).** Géologie de l'Afrique. La chaîne panafricaine « Zone mobile d'Afrique Centrale (partie Sud) et zone mobile soudanaise ». Mémoire. B.R.G.M, Orléans.93. 394 p.
- BLACK, R., LIEGEOIS, J.-P. (1993).** Cratons, mobile belts, alkaline rocks and continental lithospheric mantle: The Pan-African testimony. *Journal of the Geological Society*, 150(1), 89-98. <https://doi.org/10.1144/gsjgs.150.1.0088>
- BOCQUIER, G., ANDRY, P., BARBERY, J., CHEVERRY, C., FROMAGET, M., POISOT, P., GAUTIER, Y., (1975).** Carte pédologique de reconnaissance de la République du Tchad au 1/2000000e. AbouGoulem, Adré, Am Zoer, Guéreda.
- BOUCHER, M., MASSUEL, S., FAVREAU, G., (2006).** Caractérisation hydrogéologique de l'aquifère libre du continental terminal 3 (CT3) au Niger par la méthode de résonance magnétique protonique (RMP). Rapport final BRGM-54746-Fr.
- BRAHIM, M. N., (2020).** Apport de la Géophysique et de la Télédétection à la connaissance des aquifères du socle précambrien de Mangalmé et Eref (Gera, Tchad). Mémoire de master, Université de Ngaoundéré, 91 p.
- BRGM. (1987).** Actualisation des connaissances sur les ressources en eau souterraines de la République du Tchad (deuxième partie) : Synthèse des données hydrogéologiques et carte à 1/1.500.000 (87 TCD 246 EAU ; p. 122).

- BURKE, K., MACGREGOR, D. S., CAMERON, N. R. (2003).** Africa's petroleum systems: Four tectonic 'Aces' in the past 600 million years. Geological Society, London, Special Publications, 207(1), 21-60. <https://doi.org/10.1144/GSL.SP.2003.207.3>
- CASTANY, G., (1982).** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Éd Bordas, Paris, 236 p.
- CASTANY, G., (1988).** Principes et méthodes de l'hydrogéologie. Ed. Dunod, Paris V, 236p.
- COLLIN, J.J., (2004).** Les eaux souterraines. Connaissance et gestion. Éd. BRGM, 174 p.
- DJEUDA TCHAPNGA, H.B., (1988).** Géologie et hydrogéologie d'un secteur de la zone mobile d'Afrique centrale : région de Poli, Nord – Cameroun. Thèse Doct. Univ. Sci. Tech. et Méd. de Grenoble I, France, 333 p.
- DJEUDA TCHAPNGA H.B., TANAWA E., TEMGOUA E., SIAKEU J., NGO MASSANA B., (1999).** Modèles de circulation, mécanismes de recharge et temps de séjour des eaux souterraines des altérites en milieu cristallin : cas du bassin versant de l'Anga'a, Yaoundé – Cameroun. Collect. GÉOCAM, 2/1999, Éd. Sci. : VICAT J.P., BILONG P., Éd. Press. Univ. de Yaoundé, pp 117 – 126.
- DJEUDA TCHAPNGA H.B. TANAWA E., TEMGOUA E., NGNIKAM E., SIAKEU J., NGO MASSANA B., (2000).** Caractéristiques structurales et propriétés hydrodynamiques des altérites de la zone périurbaine de Yaoundé IV – Cameroun. Rapport inédit, 17 p.
- DOMBOR, D. D., DJÉBÉ, M., (2018).** Problématique de l'accès à l'eau potable dans la ville d'Abéché (Tchad). 93-119 p.
- FEUMBA R., (2005).** Hydrogéologie en zone de socle cristallin : Cas du bassin versant de l'Ekozoa, secteur nord de la ville de Yaoundé – Cameroun. Mém. DEA. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 94 p.
- FREDLUND M. D., D.G. FREDLUND, AND G. WARD WILSON (2000).** An equation to represent grain-size distribution Canadian Geotechnical Journal, 37, 817-827 p.
- GLEESON, T., BEFUS, K. M., JASECHKO, S., LUIJENDIJK, E., & CARDENAS, M. B. (2016).** The global volume and distribution of modern groundwater. Nature Geoscience, 9(2), 161-167. <https://doi.org/10.1038/ngeo2590>.
- GOSSELIN J-S (2016).** Estimation de la recharge à partir de séries temporelles de la température du sol, des niveaux d'eau dans les puits et de données météorologiques : développement méthodologique et évaluation de l'incertitude. Doctorat en sciences de la Terre (Institut national de la recherche scientifique, Québec). 216p. <http://espace.inrs.ca/id/eprint/5122>.
- HABIB, A. M. (2023).** Caractérisation hydrodynamique et hydrochimique des aquifères de socle du Ouaddaï : cas de la ville d'abéché et ses environs (Est-Tchad) ; mémoire master en Hydrogéologie, université de Ngaoundéré, 68 p.

- HAZEN A., (1911).** Discussion of « Dams on Sand foundation, par A.C. Koenig », Trans. Am. Soc. Civ. Eng., 199 p.
- INSEED (20016).** Deuxième recensement général de la population et de l’habitat (RGPH2, 2009). République du Tchad, 88 p.
- IPCC. (2014).** Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, R.K. Pachauri and L.A. Meyer (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, 151.
- ISSEINI, M., HAMIT, A., ABDERAMANE, M. (2013).** The tectonic and geologic framework of the Mongo area, a segment of the Pan-African Guera Massif in Central Chad: Evidences from field observations and remote sensing. *Revue Scientifique du Tchad*, 16.
- KALLA MPAKO F., (2007).** Caractérisation physique et hydrodynamique de l’aquifère à nappe libre du bassin versant de Ntem à Yaoundé-Cameroun. Mém. DEA. Fac. Sci. Univ. Yaoundé I, 99 p.
- KHALID, A. B. (2024).** Evaluation quantitative et qualitative des eaux souterraines de la localité d’Abéché (Est du Tchad) ; mémoire master en Hydrogéologie, université de Yaoundé 68 p.
- KUSNIR, I. (1995).** Géologie, ressources minérales et ressources en eau du Tchad. Travaux et documents scientifiques du Tchad. 2ème Edition, CNAR, Tchad, 115.
- KUSNIR, I., MOUTAYE, H. A. (1997).** Ressources mindrales du Tchad : Une revue. *Journal of African Earth Sciences*, 24(4), 549-562. [https://doi.org/doi:10.1016/S0899 5362\(97\)00080-8](https://doi.org/doi:10.1016/S0899 5362(97)00080-8)
- LASM T. (2000) :** Hydrogéologie des réservoirs fracturés de socle : Analyses statistiques et géostatistiques de la fracturation et des propriétés hydrauliques. Application à la région des montagnes de Côte d’Ivoire (Domaine Archéen). *Thèse Univ. Poitiers*, 272 p.
- LE MARECHAL, A. (1966).** Contribution à l’étude des plateaux Batékés (géologie, géomorphologie, hydrogéologie), ORSTOM, Brazzaville.
- LIÉGEOIS, J.-P., ABDELSALAM, M. G., ENNIH, N., OUABADI, A. (2013).** Metacraton : Nature, genesis and behavior. *Gondwana Research*, 23(1), 220-237. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.016>
- MAHAMAT, N. M., (2021).** Croissance urbaine et problématique de l’accès aux soins de santé dans la ville d’Abéché à l’Est du Tchad. Mémoire de Master, Université de N’Ngaoundéré, Cameroun.
- MARGAT, J. (1987).** Initiation à la dynamique des eaux souterraines (alimentation, écoulement, régime), BRGM, 41p. 87 SGN 511 EAU.
- MARSILY, G., BESBES, M. (2017).** Les eaux souterraines : Annales des Mines Responsabilité et environnement, N° 86(2), 25-30. <https://doi.org/10.3917/re1.086.0025>.

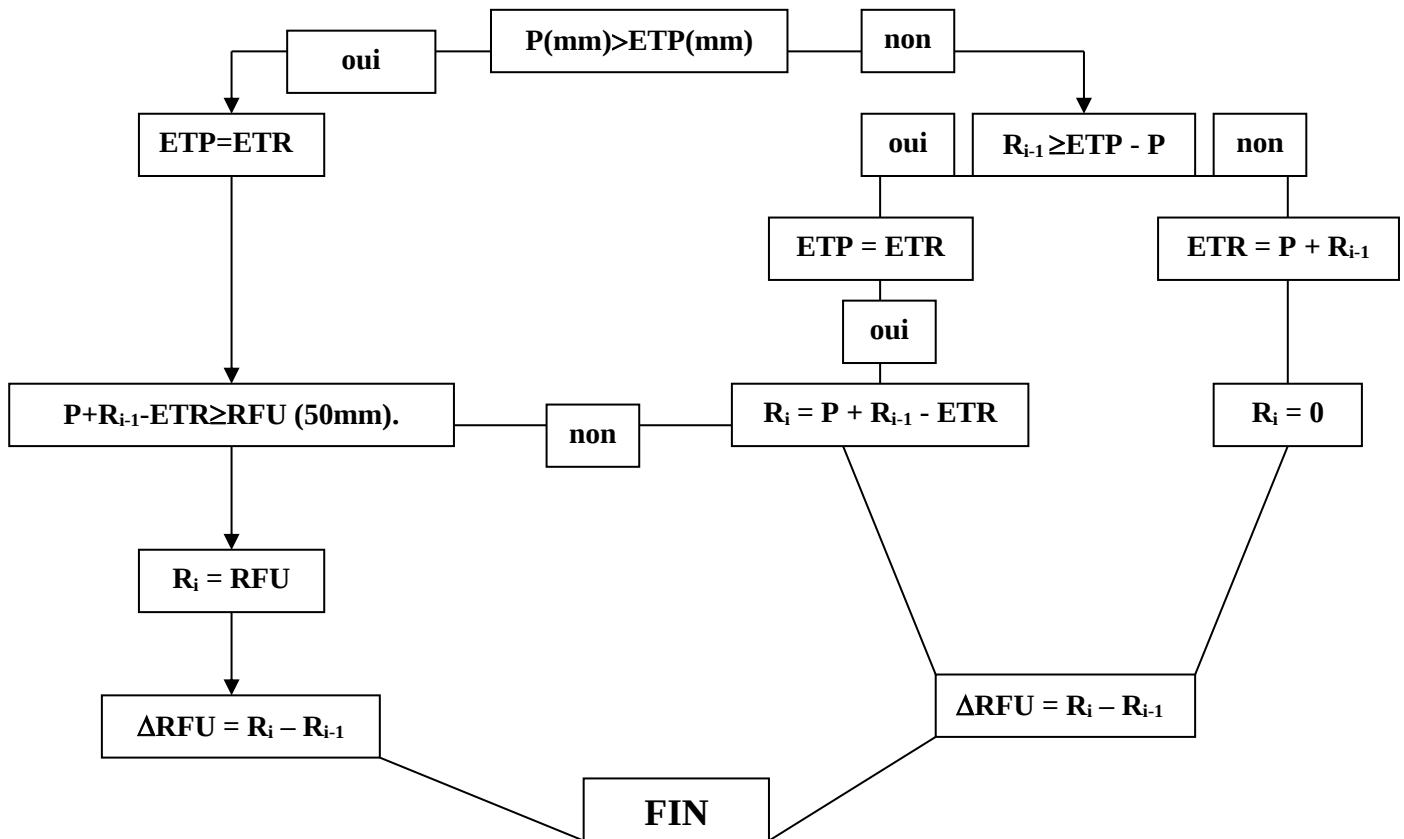
- NANA, G. A. (2015).** Caractérisation hydrodynamique et qualité des eaux de l'aquifère à nappe libre du bassin versant de Mewoulou (Nord-Yaoundé). Mém. Master II, Fac. Sci. DST. Université de Yaoundé I, 83 p.
- NGOLONA G. (1992).** Etude de la relation “ averses - crues”. Application d'un modèle global et essais de mise au point d'un modèle distribué sur le bassin versant du Bam-Bam (Tchad), Thèse de doctorat, Université d'Avignon et des Pays de Vaucluse, 276 p.
- NGOUNOU NGATCHA B, (1993).** Hydrogéologie d'aquifères complexes en zone semi-aride. Les aquifères Quaternaire du grand Yaéré (Nord Cameroun). Thèse. Université de Grenoble I. 352p. 49
- NGOUNOU NGATCHA B. (2011).** Application de la géophysique dans la gestion des ressources en eaux souterraines dans la région du Guera (Tchad). Article, 13 p.
- NON-ASSEM A. (2020).** Caractérisation hydrogéologique des aquifères en zone de socle cristallin : Cas des départements du Guera et d'Abtuyour (Guera-Tchad Central). Mémoire de master, Université de Ngaoundéré, 104 p.
- PENAYE, J., KRÖNER, A., TOTEU, S. F., VAN SCHMUS, W. R., DOUMNANG, J.-C. (2006).** Evolution of the Mayo Kebbi region as revealed by zircon dating: An early (ca. 740Ma) Pan African magmatic arc in southwestern Chad. Journal of African Earth Sciences, 44(4-5), 530-542. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.018>
- PARIZOT M, (2008).** Contrôle de surveillance de la qualité des masses d'eau souterraine de la Guyane conformément à la Directive Cadre Européenne sur l'Eau : saison des pluies 2008 Rapport final BRGM/RP-56890-FR.
- PHPTC1/AFD., (2008).** Réalisation de 73 forages de reconnaissance dans le Guera (66) et le Batha (07). Rapport de fin de travaux. Document ANTEA/IRAM, Annexe Hydro 2, Rapport N° A 50701. République du Tchad, Ministère de l'Eau, 22.
- PIPER, A. M. (1944).** A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. Transactions American Geophysical <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>. Union. 25(6), 914.
- POUCLET, A., DURAND, A. (1983).** Structures cassantes cénozoïques d'après les phénomènes volcaniques et néotectoniques au nord-ouest du lac Tchad (Niger oriental). Annales de la société géologique du Nord, 103, 143-154.
- POUCLET, A., VIDAL, M., DOUMNANG, J.-C., VICAT, J.-P., TCHAMENI, R. (2006).** Neoproterozoic crustal evolution in Southern Chad: Pan-African Ocean basin closing, arc accretion and late- to post-orogenic granitic intrusion. Journal of African Earth Sciences, 44(4-5), 543-560. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2005.11.019>
- RÉMÉNIÉRAS G., (1972).** Hydrologie de l'ingénieur. 3e Éd. Eyrolles, Paris, 454 p.

- ResEau. (2016).** Synthèse hydrogéologique du nord et de l'est du Tchad. (Chapitre 1 ; p. 243).
- RIVARD, C. LEFEBVRE, R. PARADIS, D., (2014)** Regional recharge estimation using multiple methods: an application in the Annapolis Valley, Nova Scotia (Canada). *Environmental Earth Sciences* 71(3) :1389-1408.
- RODIER, J., BERNARD, L., NICOLE, M. (2009).** L'analyse de l'eau. 9e Edition, Dunod, Paris, France 156 p.
- SAGNA, P., NDIAYE, O., DIOP, C., NIANG, A. D., & SAMBOU, P. C. (2015).** Les variations récentes du climat constatées au Sénégal sont-elles en phase avec les descriptions données par les scénarios du GIEC ? Are recent climate variations observed in Senegal in conformity with the descriptions given by the IPCC scenarios? 17.
- SCHLOSSER F., (1988).** Éléments de mécanique des sols. Press. de l'école nationale des ponts et chaussées, Paris, 271 p.
- SCHNEIDER, J. L., J.P. WOLFF, (1992).** Carte géologique et cartes hydrogéologiques à 1/1500000 de la république du Tchad mémoire explicatif BRGM. 125 p.
- SCHNEIDER, J. L., (2001).** Géologie, Archéologie et Hydrogéologie. République du Tchad, Ministère de l'Environnement et de l'Eau. Préface de mémoire., 1, 462.
- SCHOELLER, H., (1962).** Les eaux souterraines (No. BOOK). Masson, 642.
- SDEA., (2001).** Schéma directeur de l'eau et de l'assainissement du Tchad. Le bilan diagnostic des ressources en eau. (Partie 1 ; p. 112).
- SHELLNUTT, J. G., PHAM, N. H. T., DENYSZYN, S. W., YEH, M.-W., LEE, T.-Y. (2017).** Timing of collisional and post-collisional Pan-African Orogeny silicic magmatism in south central Chad. *Precambrian Research*, 301, 113-123.
<https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.08.021>
- TAYLOR, R., HOWARD, K., (2000).** A tectono-geomorphic model of the hydrogeology of deeply weathered crystalline rock: evidence from Uganda. *Hydrogeology Journal* 8(3):279-294.
- THORNTHWAITE C. W., (1954).** The measurement of potential evapotranspiration, John P. Mather Seebrook, New Jersey, 222 p.
- WILCOX, L. V., (1948).** Classification and use of irrigation waters, USDA Circ. 969. Washington, DC. 19p.

ANNEXES

ANNEXE I : Organigramme spécifique

Organigramme selon Thornthwaite pour l'évaluation des termes du bilan hydrologique (In Hydrologie de l'Ingénieur, Réménieras, 1972).



ANNEXE II : principes et modes opératoires d'analyses chimiques, spectrophotométrie, photométrie à flamme et dosage volumétrique

a) Spectrophotométrie

Par un ajout de réactif (Sulfa ver, Nitra ver, Ferro ver, Alcool polyvinylique+ Stabilisateur minéral+ Nessler, Fluorite) dans l'échantillon, on convertit la substance à analyser en une substance absorbant la lumière à une longueur d'onde spécifique. La spectrophotométrie consiste à mesurer l'absorption de cette lumière, laquelle est proportionnelle à la concentration de la substance (loi de Lambert-Beer). Techniquement, la procédure de détermination des teneurs des éléments se fait de la manière suivante :

- verser un volume donné de l'échantillon sans y mettre de réactif pour en faire le blanc ;
- verser ensuite le même volume de l'échantillon que le précédent dans lequel on ajoute le réactif spécifique à l'élément recherché ;
- après avoir allumé le spectrophotomètre, choisir le programme correspondant à l'analyse à effectuer et minuter l'appareil au temps de réaction nécessaire, correspondant à l'élément recherché ;
- nettoyer et introduire le blanc dans le spectrophotomètre à travers son orifice ;
- appuyer sur Zéro pour étalonner, puis enlever le blanc et introduire l'échantillon contenant le réactif, appuyer sur « Mesurer » pour effectuer la mesure ;
- enfin, lire la valeur qui s'affiche à l'écran en mg/l.

b) Photométrie à flamme

La photométrie à flamme consiste à présenter un échantillon à une flamme à un taux constant. La flamme du photomètre joue un rôle important, l'intensité de la couleur de celle-ci détermine l'énergie qui a été absorbée par les atomes. Il suffit de sélectionner le filtre correspondant à l'ion recherché pour détecter automatiquement sa concentration. Concrètement, les procédures de mesures sont les suivantes :

- allumer la machine pendant au moins 30 min ;
- prélever le diluant dans une cuvette pour nettoyer le tuyau aspirateur ;
- prélever l'eau à analyser dans une autre cuvette puis introduire le tuyau aspirateur dans le diluant dilué pour initialiser les données des éléments recherchés ;
- insérer le tuyau dans l'échantillon en réglant le bouton de la machine jusqu'à ce que le signe moins (-) apparaisse puis lire les valeurs affichées sur l'écran : le sodium et le potassium.

c) Dosage volumétrique

La méthode volumétrique ou titration consiste à ajouter graduellement un réactif afin de « neutraliser » l'espèce à déterminer dans la solution inconnue (tableau II). Au moment où la substance à analyser est complètement consommée, on atteint le point d'équivalence qui détermine la fin du

titrage. Ce point d'équivalence peut correspondre à une valeur donnée de pH ou au changement de couleur d'un indicateur, par exemple. La quantité de réactif utilisé permet de calculer la concentration de la substance à analyser (OFEFP, 2003). Concrètement, il s'agit de :

- Verser un volume donné de l'échantillon dans un erlenmeyer ;
- Ajouter l'indicateur coloré au volume d'échantillon prélevé ;
- Titrer en ajoutant le réactif contenu dans une burette digitale au fur et à mesure qu'on agite l'Erlenmeyer contenant l'échantillon + indicateur coloré ;
- Noter ensuite le volume auquel a lieu le virage de couleur.

ANNEXE III : caractérisation physique des sols

1. Analyse granulométrique (NF P94-056)

Elle permet de déterminer la proportion relative de chaque particule (gravier, sable, limon et l'argile) présente dans l'échantillon de sol.

Principe

Il consiste à séparer les grains agglomérés d'une masse connue de matériau par brassage sous l'eau, à fractionner ce sol une fois séché au moyen d'une série de tamis, et à peser successivement le refus cumulé sur chaque tamis. La masse de refus cumulée sur chaque tamis est rapportée à la masse totale sèche de l'échantillon soumis à l'analyse.

Appareillage

L'appareillage nécessaire pour la réalisation de cet essai est constitué d'une étuve ventilée réglée à 105°C pour sécher les échantillons, d'une colonne de tamis de mailles différentes, des tares et d'une balance électrique pour la pesée des refus.



Matériels utilisés pour la réalisation d'une analyse granulométrique : **A)** Colonne de tamis ; **B)** Tamis de 0,080 mm pour l'AG ; **C)** Balance ; **D)** les tares avec les différents échantillons ; **E)** Etuve ; **F)** Assèchement des matériaux à 105°C pour une durée de 24h.

Mode opératoire

Après l'échantillonnage, les matériaux sollicités à emporter en premier pour les analyses de laboratoire sont ceux destinés à l'analyse granulométrique par quartage. Ce matériau est recueilli dans une tare en le pesant. Par la suite, on trempe le matériau pesé dans l'eau pendant 24 heures, puis on le lave à l'aide d'un tamis de 80 μm pour éliminer les éléments fins (argiles). Ce lavage est terminé lorsque l'eau qui s'écoule devient claire (incolore). Après le lavage, les refus sont mis à l'étuve de 105 °C pendant 24 heures. À leur sortie de l'étuve, on pèse les matériaux secs et la différence entre le poids humide et le poids sec donne le pourcentage de matériaux fins passant au tamis de 80 μm .

Après les étapes ci-dessus, on fait passer l'échantillon à travers une série de tamis emboîtés les uns sur les autres par ordre décroissant. L'échantillon étant versé sur le tamis supérieur et fermé avec un couvercle, on effectue une série de secousses pour le tamiser. On agite chaque tamis individuellement à partir du supérieur. Ensuite, on pèse le matériau retenu sur le premier tamis (le refus), et le matériau qui passe à travers ce tamis (tamisât) est ajouté au contenu suivant. On répète cette opération avec le deuxième tamis, et le niveau de refus est placé sur la balance avec le premier, d'où le terme "refus cumulés". De même, le matériau qui passe à travers le deuxième tamis est versé dans le tamis suivant, et ainsi de suite jusqu'au dernier tamis. La somme des refus cumulés mesurés sur les différents tamis, ainsi que le matériau retenu sur le tamis inférieur (tamisât du fond), doivent correspondre au poids sec de l'échantillon initial introduit en tête de la colonne de tamis.



A) Les échantillons ; B) Le quartage ; C) Prélèvement des échantillons pour l'AG

Diamètre (mm)	% tamisât				
	DT18	ZN3	BG44	KH41	AM35
40,000					
31,500					
25,000					
20,000	100	100			
16,000	99,8	97,3			
14,000					
12,500	99,4	97	100		
10,000	98,9	96,4	99,7	100	
8,000	98,5	95,9	99,3	99,8	100
6,300	97	95	97,6	99,7	99,98
5,000	95,1	94	94,6	99,4	99,9
4,000	91,1	92,4	88,5	99,1	99,9
3,150	86,4	90,5	82,8	98,4	99,8
2,000	71,4	83	66,9	94,1	99,6
1,000	49,7	63,3	44,8	89,5	98,3
0,500	39,6	50	32,8	75,2	88,7
0,315	34,5	42,4	27,3	48,5	70,3
0,160	28	27,4	20,1	32,7	49,1
0,080	23,6	19,9	16,2	24,8	36,6
0,063	22,2	17,8	15,2	21,7	33,1

2. Essai Proctor Modifié (NF P94-093)

Il permet de déterminer les paramètres de compactage d'un matériau, notamment la densité sèche ou le poids volumique sec maximal, ainsi que la teneur en eau optimale.

Principe

L'essai Proctor consiste à placer dans un moule de dimensions connues un échantillon de sol humidifié de manière homogène à une teneur en eau donnée, puis à compacter cet échantillon à l'aide d'une dame de poids standardisé tombant d'une hauteur standardisée. Pour chaque teneur en eau considérée, on détermine le poids volumique sec du sol et on établit la courbe des variations de ce poids volumique en fonction de la teneur en eau.

Appareillage

L'appareillage nécessaire pour la réalisation de cet essai est composé d'un moule CBR, d'une dame Proctor modifié, d'une règle à araser, des bacs d'homogénéisation, d'un tamis de 20 mm de diamètre, de tares, d'une balance électronique, d'une étuve de 105°C, d'une truelle.



A) Matériel de l'essai Proctor modifiés Moule CBR + Dame Proctor modifié ;

B) Moule + la règle de raser ; **C)** Tare + matériau pour la teneur en eau

Mode opératoire

Le compactage débute par le malaxage du matériau avec 2 % d'eau, soit 120 g d'eau pour 6000 g de matériau. Ensuite, on compacte le matériau mélangé dans un moule Proctor en utilisant une énergie modifiée, c'est-à-dire 56 coups par couche. Après le compactage, on arase délicatement en commençant par le centre. Ensuite, on retire l'embase et le disque d'espacement, puis on pèse le moule avec son contenu. On répète l'essai de la même manière plusieurs fois en variant uniquement la teneur en eau de manière croissante.

Les résultats

BG44	Détermination de la Densité Humide					
N° d'essai		1	2	3	4	5
Eau de mouillage		4%				
Poids Total humide	(g)	8262				
Poids du moule	(h)	3792				
Poids de sol Humide	(i=g-h)	4470				
Volume de moule	I	2076				
Densité Humide	(k=i/I)	2,15				
Détermination de la teneur en eau et Densité sèche						
N° de la tare		56				
Poids total humide	(a)	304				
Poids total sèche	(b)	290				
Poids de tare	(c)	65				
Poids d'eau	(d=a-b)	14				
Poids de sol sèche	(e=b-c)	225				
Teneur en eau	(f=100*d/e)	6,2				
Densité sèche	(l = k/(1+f))	2,02				

ZN3	Détermination de la Densité Humide					
N° d'essai		1	2	3	4	5
Eau de mouillage		4%				
Poids Total humide	(g)	8363				
Poids du moule	(h)	3792				
Poids de sol Humide	(i=g-h)	4571				

Volume de moule	I	2076				
Densité Humide	($k=i/I$)	2,20				
Détermination de la teneur en eau et Densité sèche						
N° de la tare		68				
Poids total humide	(a)	267,0				
Poids total sèche	(b)	256,5				
Poids de tare	(c)	70,5				
Poids d'eau	($d=a-b$)	10,5				
Poids de sol sèche	($e=b-c$)	186				
Teneur en eau	($f=100*d/e$)	5,6				
Densité sèche	($l = k/(1+f)$)	2,08				

DT18	Détermination de la Densité Humide					
N° d'essai		1	2	3	4	5
Eau de mouillage		4%				
Poids Total humide	(g)	8203				
Poids du moule	(h)	3857				
Poids de sol Humide	($i=g-h$)	4346				
Volume de moule	I	2066				
Densité Humide	($k=i/I$)	2,10				
Détermination de la teneur en eau et Densité sèche						
N° de la tare		16				
Poids total humide	(a)	293				
Poids total sèche	(b)	283,5				
Poids de tare	(c)	57,5				
Poids d'eau	($d=a-b$)	9,5				
Poids de sol sèche	($e=b-c$)	226				
Teneur en eau	($f=100*d/e$)	4,2				
Densité sèche	($l = k/(1+f)$)	2,01				

AM35	Détermination de la Densité Humide					
N° d'essai		1	2	3	4	5
Eau de mouillage		6%				
Poids Total humide	(g)	8308				
Poids du moule	(h)	3792				
Poids de sol Humide	($i=g-h$)	4516				
Volume de moule	I	2076				
Densité Humide	($k=i/I$)	2,17				
Détermination de la teneur en eau et Densité sèche						
N° de la tare		18				
Poids total humide	(a)	246,5				
Poids total sèche	(b)	237,0				
Poids de tare	(c)	66				
Poids d'eau	($d=a-b$)	9,5				
Poids de sol sèche	($e=b-c$)	171,0				
Teneur en eau	($f=100*d/e$)	5,6				
Densité sèche	($l = k/(1+f)$)	2,06				

KH41	Détermination de la Densité Humide					
N° d'essai		1	2	3	4	5
Eau de mouillage		4%				
Poids Total humide	(g)	8457				
Poids du moule	(h)	3857				
Poids de sol Humide	(i=g-h)	4600				
Volume de moule	I	2066				
Densité Humide	(k=i/I)	2,22				
Détermination de la teneur en eau et Densité sèche						
N° de la tare		1				
Poids total humide	(a)	202,5				
Poids total sèche	(b)	193,5				
Poids de tare	(c)	70,5				
Poids d'eau	(d=a-b)	9				
Poids de sol sèche	(e=b-c)	123				
Teneur en eau	(f=100*d/e)	7,3				
Densité sèche	(l = k/(1+f))	2,07				

3. Limites d'Atterberg (NF P 94 – 051-1)

Elle permet de déterminer la consistance des sols, c'est-à-dire les limites entre les différents états de consistance d'un sol. Ces limites sont utiles pour caractériser le comportement des sols, en particulier leur plasticité et leur aptitude à être déformés.

Principe

L'essai s'effectue sur la fraction passante du tamis de 400 µm en deux phases à savoir :

La détermination de la limite de liquidité (LL) consiste à réaliser une rainure dans un sol placé dans une coupelle de caractéristiques imposées, se fermant à 10 mm, après 25 chocs répétés. Cette limite de liquidité correspond à une résistance au cisaillement conventionnelle ;

La détermination de la limite de plasticité (LP) consiste à réaliser un rouleau de sol de dimension fixée et confectionné manuellement, qui se fissure à 3 mm de diamètre. Cette limite correspond à une résistance à la traction conventionnelle.

Appareillages

L'appareillage nécessaire ayant permis la réalisation de cet essai est constitué d'un appareil de Casagrande pour effectuer l'essai, d'une plaque en marbre lisse, d'un outil à rainure, d'une spatule, d'une balance électrique de précision de 0,01 g, d'un tamis à maille de 400 µm, d'un récipient d'au moins 2 L, de bacs et d'une étuve réglée à 105°C.



A) Appareil de Casagrande + outil à rainure + plaque lisse ; B) Etuve ; C) Balance ; D) Spatule.

Mode Opérateur

L'agronome suédois Atterberg a proposé une procédure permettant de définir précisément les limites en eau pour chaque état, appelées limites d'Atterberg. Les limites d'Atterberg les plus couramment utilisées en mécanique des sols sont la limite de liquidité (WL) et la limite de plasticité (WP). Elles sont mesurées sur la fraction du sol qui passe à travers un tamis de 400 μm (Y Atlan, 1978). En effet, le matériau doit être immergé pendant 24 heures avant le processus. Ensuite, un tamisage manuel doit être effectué à l'état humide, et les éléments fins qui passent à travers le tamis de 0,04 mm sont recueillis à l'état pâteux pour l'essai.

Limite de liquidité (appareil de casagrande)

On place la pâte sur la coupelle et on la mélange à l'aide d'une spatule afin de former une boule. L'épaisseur du matériau au centre de la coupelle doit se situer entre 15 et 20 mm. Ensuite, à l'aide d'un outil à rainurer, on divise la pâte en deux de manière symétrique. La coupelle est ensuite soumise à plusieurs chocs à l'aide d'une manivelle. On note alors le nombre de chocs nécessaires pour que les deux bords de la rainure se rejoignent sur une distance de 1 cm, ce qui peut être observé à l'œil nu.

On répète la même opération trois fois avec l'échantillon restant, ce qui permet le traçage de la droite qui le différencie des autres par leur teneur en eau. Cette variation est obtenue par l'ajout d'eau à chaque fois qu'on entame un essai. Tous les échantillons sont pesés après avoir effectué l'essai et mis à l'étuve de 105 °C afin d'éliminer la teneur en eau et de garder la partie solide pour la mesure du poids sec. La courbe établie représente la teneur en eau en fonction du nombre de chocs et la limite de liquidité correspond à la teneur en eau lors du 25^e choc.

Limite de plasticité

Après avoir déterminé la limite de liquidités, l'échantillon est étalé sur une plaque de marbre pour diminuer la teneur en eau. Ensuite, on pétrit une boulette de mortier de la taille d'une noisette et on la roule sur la plaque à marbre propre, lisse et sèche jusqu'à ce que le cylindre atteigne environ 3

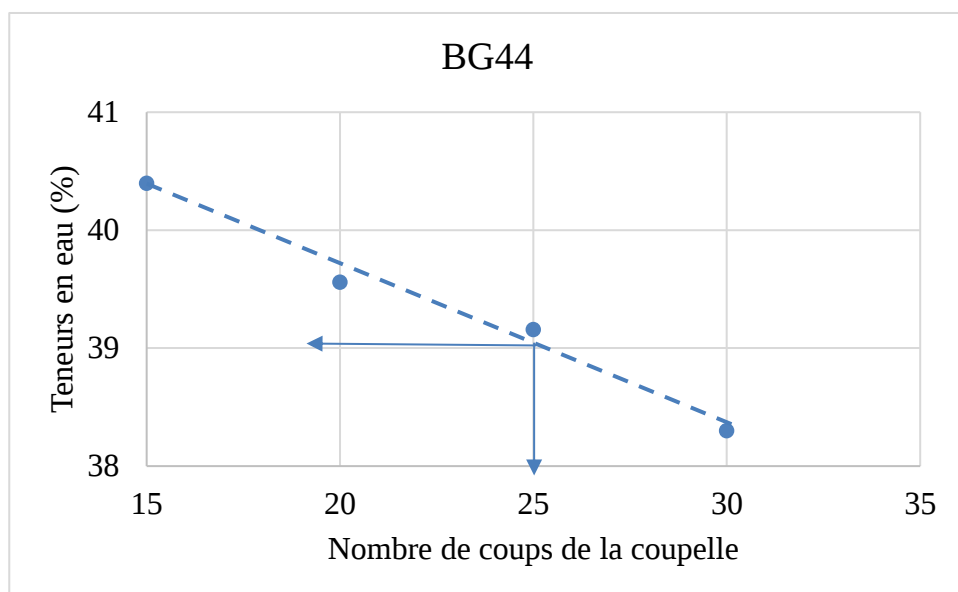
mm de diamètre sur une longueur d'environ 10 cm. Ainsi, la limite de plasticité est la teneur en eau à laquelle le cylindre se fissure lorsque son diamètre atteint 3 mm. L'échantillon est ensuite placé dans une étuve pour déterminer les paramètres dont on se sert pour calculer la limite de plasticité.



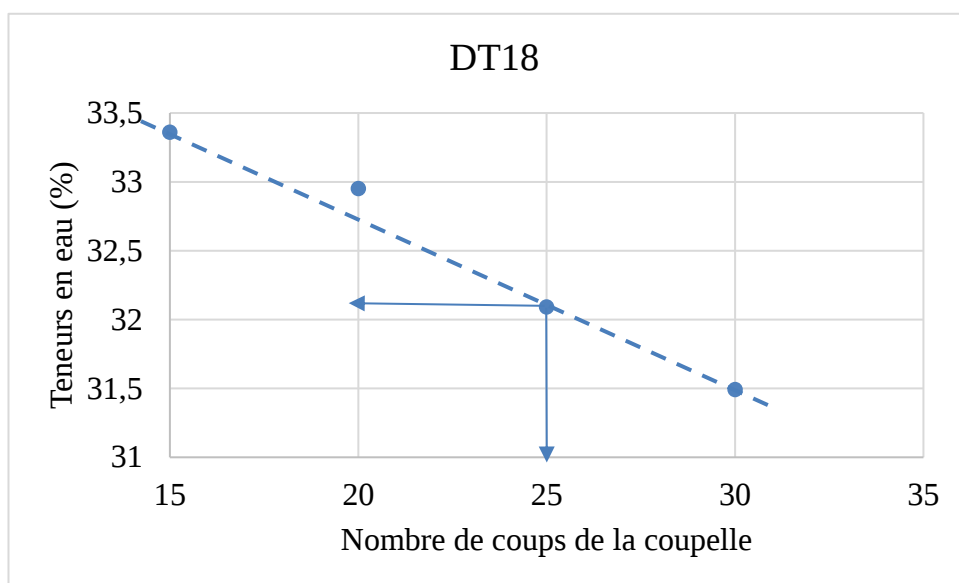
A et B) immersion des matériaux ; C) Assèchement des matériaux à 105°C pour une durée de 24h ; D) Assèchement des boules et des rouleaux à 105°C pour une durée de 24h ;

LL= 20,10				LP= 17,34						IP=LL-LP= 2,76	
Désignation		Limite de liquidité								Limite de plasticité	
Nombre de coups		16		21		26		31		1er Essai	2e Essai
N° de Tares		71	102	78	115	75	93	100	110	120	115
Poids total humide	P1	34,28	34,42	39,27	38,92	33,75	33,34	34,96	33,87	10,47	9,36
Poids total Sèche	P2	29,55	29,67	33,82	33,52	29,34	28,99	30,69	29,52	10,19	9,05
Poids de Tares	P3=P1-P2	4,73	4,75	5,45	5,40	4,41	4,35	4,27	4,35	0,28	0,31
Poids d'eau	P4	7,23	7,27	7,25	7,27	7,26	7,31	8,69	7,31	8,57	7,27
Poids sol sèche	P5=P2-P4	22,32	22,40	26,57	26,25	22,08	21,68	22,00	22,21	1,62	1,78
Teneur en eau	(P3/P5) *100	21,19	21,20	20,51	20,57	19,97	20,06	19,41	19,58	17,28	17,41
Moyenne		21,19		20,54		20,01		19,49		17,34	

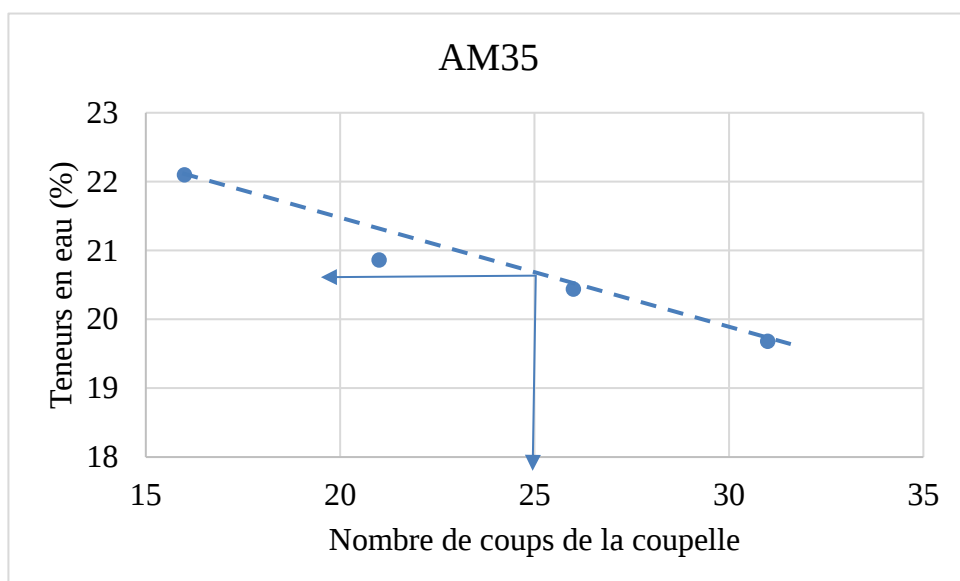
LL= 39				LP= 28,74						IP=LL-LP= 10,26	
Désignation		Limite de liquidité								Limite de plasticité	
Nombre de coups		15		20		25		30		1 ^{er} Essai	2 ^e Essai
N° de Tares		82	86	91	98	99	103	106	116	118	121
Poids total humide	P1	31,37	30,9	29,27	28,7	28,24	27,53	27,19	26,96	8,79	9,1
Poids total Sèche	P2	24,45	24,1	23,04	22,8	22,32	21,83	21,66	21,51	8,45	8,7
Poids de Tares	P3=P1-P2	6,92	6,82	6,23	5,94	5,91	5,7	5,53	5,45	0,34	0,4
Poids d'eau	P4	7,3	7,25	7,28	7,79	7,3	7,22	7,25	7,25	7,29	7,28
Poids sol sèche	P5=P2-P4	17,15	16,86	15,76	15	15,03	14,61	14,41	14,26	1,16	1,42
Teneur en eau	(P3/P5)*100	40,35	40,5	39,53	39,6	39,32	39,01	38,38	38,22	29,31	28,17
Moyenne		40,4		39,56		39,16		38,3		28,74	



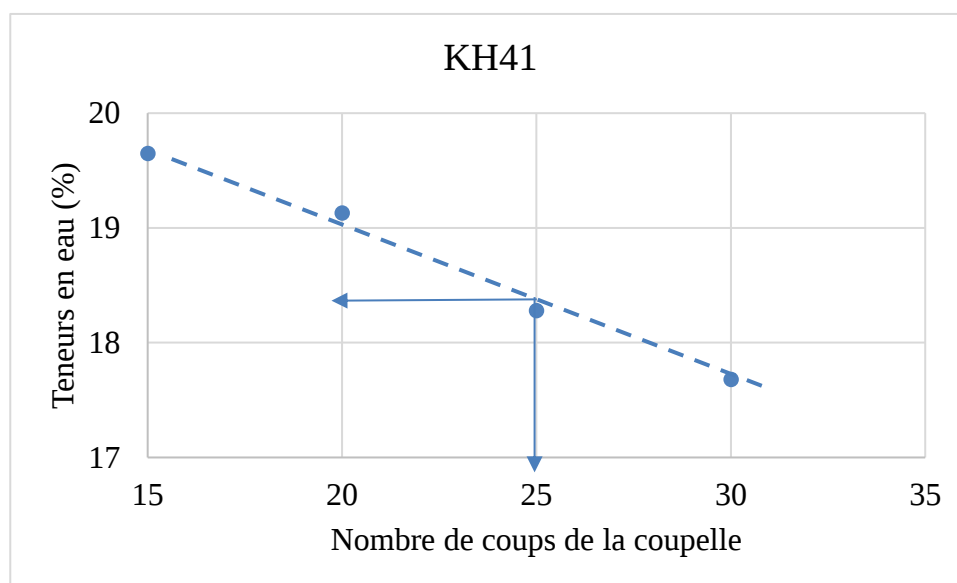
LL= 32,10				LP= 24,29						IP=LL-LP= 7,81	
Désignation		Limite de liquidité								Limite de plasticité	
Nombre de coups		15		20		25		30		1 ^{er} Essai	2 ^e Essai
N° de Tares		95	109	92	73	127	85	96	89	94	80
Poids total humide	P1	30,26	30,09	28,59	28,48	27,63	27,64	27,08	26,62	8,14	8,61
Poids total Sèche	P2	24,52	24,9	23,31	23,22	22,71	22,71	22,33	22	7,92	8,36
Poids de Tares	P3=P1-P2	5,74	5,15	5,28	5,26	4,93	4,93	4,75	4,62	0,26	0,25
Poids d'eau	P4	7,33	9,49	7,26	7,28	7,28	7,24	7,3	7,3	6,88	7,3
Poids sol sèche	P5=P2-P4	17,19	15,45	16,05	15,9	15,38	15,47	15,05	14,7	1,04	1,06
Teneur en eau	(P3/P5)*100	33,39	33,3	32,9	33	32,31	31,87	31,56	31,43	25	23,58
Moyenne		33,36		32,95		32,09		31,49		24,29	



LL= 20,60				LP= 16,59						IP=LL-LP= 4,01	
Désignation		Limite de liquidité								Limite de plasticité	
Nombre de coups		16		21		26		31		1er Essai	2e Essai
N° de Tares		80	85	115	110	100	120	75	106	95	109
Poids total humide	P1	34	33,61	30,69	31,4	37,53	37,58	33,7	32,5	10,37	12,73
Poids total Sèche	P2	29,20	28,87	26,64	27,25	32,5	32,66	29,34	28,36	9,93	12,24
Poids de Tares	P3=P1-P2	4,80	4,82	4,05	4,15	4,9	4,92	4,36	4,14	0,44	0,45
Poids d'eau	P4	7,30	7,24	7,27	7,31	8,69	8,57	7,26	7,25	7,36	9,48
Poids sol sèche	P5=P2-P4	21,90	21,63	19,37	19,94	23,94	24,09	22,08	21,11	2,57	2,8
Teneur en eau	(P3/P5)*100	21,92	22,28	20,91	20,81	20,47	20,42	19,75	19,61	17,12	16,07
Moyenne		22,1		20,86		20,44		19,68		16,59	



LL= 18,40				LP= 15,69						IP=LL-LP= 2,71	
Désignation		Limite de liquidité								Limite de plasticité	
Nombre de coups		15		20		25		30		1er Essai	2e Essai
N° de Tares		96	116	127	121	71	112	102	118	93	94
Poids total humide	P1	32,4	30,7	33,7	31,94	33,59	33,43	32,5	33,63	11,81	11,69
Poids total Sèche	P2	28,27	26,85	29,45	27,99	29,51	29,39	28,71	29,67	11,2	11,04
Poids de Tares	P3=P1-P2	4,13	3,85	4,25	3,25	4,08	4,04	3,79	3,96	0,61	0,65
Poids d'eau	P4	7,29	7,24	7,29	7,29	7,23	7,23	7,26	7,29	7,32	6,89
Poids sol sèche	P5=P2-P4	20,98	19,61	22,16	20,7	22,28	22,28	21,45	22,38	3,88	4,15
Teneur en eau	(P3/P5)*100	19,68	19,63	19,18	19,08	18,31	18,25	17,67	17,69	15,72	15,66
Moyenne		19,65		19,13		18,28		17,68		15,69	



ANNEXE IV : résultats des analyses d'eaux

Nom de l'échantillon		DTP1 4	BGP4 4	DTP1 8	AMP 35	ZNP3	BSP4 0	DFP2 0	DFP2 7	KHP4 1	KMP 36	Directives OMS/Tch ad pour l'eau de boisson
Date de prélèvement	Unités	12/07/ 2025	12/07/ 2025	11/07/ 2025	11/07/ 2025	11/07/ 2025	11/07/ 2025	11/07/ 2025	11/07/ 2025	11/07/ 2025	12/07/ 2025	
pH au labo à 25°C	[H3 O+]	7,15	7,67	7,09	7,40	7,14	8,17	7,57	7,59	7,74	7,06	$6,5 \leq pH \leq 9$
Conductivité électrique	$\mu S/cm$	1378	4590	706	459	1374	347	356	765	225	2390, 0	≤ 2500
Solides totaux dissous	mg/ L	689	2295	353	229,5	687	173,5	178	382,5	112,5	1195, 0	$\leq$ aucune mention
Turbidité (NTU)	mg/ L	2,32	5,81	2,78	2,49	1,88	2,91	1,56	1,17	3,8	2,75	≤ 5
Dureté totale (CaCO ₃)	mg/ L	330	600	240	160	340	102	108	120	66	314	$\leq$ aucune mention
Calcium (Ca ²⁺)	mg/ L	121	181	88,8	52	128	30,4	30	33,6	15,2	119,2	≤ 200
Magnésium (Mg ²⁺)	mg/ L	6,80	35,96	4,37	7,29	4,86	6,32	8,26	8,75	6,80	3,89	≤ 50
Potassium (K ⁺)	mg/ L	9,1	44,1	3,6	3,5	8,9	3,0	4,0	4,6	3,0	9,2	≤ 12
Sodium (Na ⁺)	mg/ L	1,9	2,0	1,0	1,3	2,6	2,1	0,7	1,4	3,7	1,6	≤ 200
Bicarbonates (HCO ₃ ⁻)	mg/ L	122	151,2 8	75,64	61	51,24	48,80	29,28	58,56	51,24	119,5 6	$\leq$ aucune mention
Chlorures (Cl ⁻)	mg/ L	96	232	71	60	130	34	32	13	9	69	≤ 250
Sulfates (SO ₄ ²⁻)	mg/ L	93,00	164,0 0	60,00	25,00	107,0 0	15,00	40,00	58,00	17,00	124,0 0	≤ 250
Nitrates (NO ₃ ⁻)	mg/ L	13,60	36,00	23,60	3,60	18,80	4,50	0,00	0,10	4,60	6,50	≤ 50
Fluorures F- (mg/l)	mg/ L	0,11	0,22	0,03	0,00	0,27	0,73	0,64	0,62	0,49	0,73	$\leq 1,5$
Fer (Fe)	mg/ L	0,07	0,13	0,00	0,00	0,16	0,00	0,00	0,00	0,36	0,00	$\leq 0,3$
Ammonium (NH ₄ ⁺)	mg/ L	0,49	1,69	0,07	0,00	0,34	0,00	0,04	0,14	0,30	2,51	$\leq 1,5$