

N° d'ordre

République Algérienne Démocratique et Populaire
Ministère de l'Enseignement Supérieur et de la Recherche Scientifique



Université d'Oran 2

Faculté des Sciences de la Terre, de Géographie et de l'Aménagement du
Territoire

Département des Sciences de la Terre

Mémoire

Présenté pour l'obtention du grade de Master en Géologie

Option : HYDROGEOLOGIE

**Contribution à l'étude hydrogéologique du grès de
Nubie : région des Erdis, Ennedi (Tchad)**

Présenté par : Mahamat ABSAKINE

Soutenue, le 12 juillet 2021 devant le jury composé de :

- | | | |
|------------------------|------------------|-----------|
| ➤ M. FOUKRACHE Mohamed | Maitre-assistant | Président |
| ➤ M. MANSOUR Hamidi | Professeur | Encadreur |
| ➤ M. BORSALI Tewfik | Maitre-assistant | Examineur |

Oran, 2021

Dédicaces

Je dédie ce mémoire ...

A ma défunte mère adoptive et tante

Hadjé khitama, bien qu'aucune dédicace ne saurait exprimer mon respect, mon amour éternel et ma considération pour les sacrifices que vous avez consenti pour mon instruction et mon bien être ; je tiens à vous remercier non seulement pour le soutien mais aussi et surtout pour votre amour inconditionnel que vous me portez depuis mon enfance et j'espère que votre bénédiction m'accompagnera toujours. Paix à votre âme très chère mère.

A mon père adoptive et oncle

Younous Hisseine, je ne saurai comment exprimer ma gratitude, tout ce travail est le fruit de votre assistance et considération pour ma personne.

Que ce modeste travail soit l'exaucement de vos vœux tant formulés, le fruit de vos innombrables sacrifices bien que je ne vous en acquitterai jamais assez. Puisse Dieu, le tout puissant et tout miséricordieux vous accorder vie et fasse que je ne vous déçoive jamais.

A mes très chers parents

Djimié Mahamat & Absakine Hireké, qui m'ont toujours été présent de part leurs amours, soutiens, conseils et prières. Reçevaient à travers ce travail aussi modeste soit-il, l'expression de mes sentiments et de mon éternelle gratitude. Que le bon Dieu vous accorde une longue vie.

A mes très chers frères et soeurs

Hisseine, Mahadi, Haoua, Mariam, Bachar, Indad et Attéïb, qui n'ont ménagé aucun effort pour m'assister sur tous les plans, qui n'ont cessé d'être pour moi des modèles de persévérance, de patience, de courage, de générosité et de solidarité ; en témoignage de mon affection fraternelle et de ma profonde reconnaissance je vous souhaite le meilleur et que Dieu vous récompense en bien, vous protège et vous garde.

A mes tantes

Halimé, Adjiddé, Aché et Hadjé-Halimé et Souad Brahim que j'aime profondément.

A mes amis(es) de toujours et mes collègues de ma promotion, veuillez recevoir dans ce travail l'expression de mon respect le plus profond et mon affection la plus sincère.

Enfin, à tous ceux que j'estime et qui sont chers à mon cœur que j'ai omis de citer.

Mahamat

Remerciements

*Après avoir rendu grâce à Dieu le tout puissant le très miséricordieux qui m'a donné la patience, la foi et le courage, m'a guidé et permis d'en arriver là ; je remercie vivement tous ceux qui de près ou de loin ont participé à la rédaction de ce mémoire, plus particulièrement Monsieur **MANSOUR Hamidi** pour son encadrement, son soutien et assistance tout au long de ce travail malgré cette situation difficile que nous vivons en cette période de pandémie. Sans oublier l'honorable membre du jury: **Foukrache Mohamed, Borsali Tewfek**, qui, sans eux je n'arriverai pas au bout de ce document.*

*Je tiens également à exprimer ma profonde ma gratitude à, **Mme Mebrouk Naïma, Mme Dekkiche, M. Bagamla Lamtoun, M. Singambaye Djekounda, M. Houat Mohammed Abdelghani, M. Guerbouz Mouaad et M. Mazouz Mohamed Amine**, pour leur disponibilité, leur rigueur scientifique et leur sens d'écoute et d'échange.*

*Mes remerciements vont également à **Mme. L. Houaria** (chargé de la bibliothèque) et à l'ensemble du corps professoral du département de Science de la terre (géologie) de la faculté des sciences de la terre, de géographie et d'aménagement du territoire de l'université d'Oran 2.*

Résumé :

Ce travail a été réalisé dans le cadre d'une contribution à l'étude hydrogéologique de la zone des Erdis, située dans la région de l'Ennedi (Nord-est du Tchad) ; c'est une zone particulièrement importante du fait de son intérêt hydrogéologique. L'étude s'est essentiellement portée sur l'aquifère de grès de Nubie d'âge secondaire, qui constitue l'aquifère du continental intercalaire de la région.

La méthodologie adoptée pour ce travail repose sur l'interprétation des résultats obtenus à la suite des études axées sur les contextes suivants : géographique, climatique, géomorphologique, géologique, lithostratigraphique, hydrogéologique, hydrodynamique et hydrochimique.

Les résultats obtenus à la suite de ce travail ont donné une température moyenne annuelle de 18°C, un module pluviométrique annuel égal à 52mm, une transmissivité global de l'aquifère à l'ordre de 2,9 à 3,5.10⁻³ m²/s, des pH homogènes mais basiques au niveau des lacs jusqu'à 11,6 et des conductivités qui varient entre 215 à 147500µS/cm.

Ce qui a amené à déduire que la région possède un climat hyper-aride et trois principaux réservoirs (aquifère gréseux du trias, grès du jurassique et celui du crétacé inférieur) en liaison intime, formant un complexe aquifère à perméabilité moyenne multicouche, représenté par une nappe plate à écoulement majeur de direction du nord-est vers le sud-ouest. La nappe affleure au niveau des différents lacs (Bréver, Yoa et Oma). Les eaux sont définies par un faciès dominant chloruré sodique et bicarbonaté sodique.

Mots clés : Erdis, grès de Nubie, secondaire, perméabilité, multicouche.

ملخص:

تم تنفيذ هذا العمل كجزء من المساهمة في الدراسة الهيدروولوجية لمنطقة أرديس؛ إنها منطقة ذات أهمية خاصة بسبب مصلحتها الهيدروجيوولوجية. كان تركيز الدراسة على طبقة المياه الجوفية من الحجر الرملي النوبي من العصر الثانوي، والتي تشكل طبقة المياه الجوفية القارية في المنطقة.

المنهجية المعتمدة لهذا العمل تعتمد على تفسير النتائج التي تم الحصول عليها من الدراسات التي ركزت على السياقات التالية: الجغرافية، المناخية، الجيومورفولوجية، الجيولوجية، الصخرية، الهيدروجيوولوجية، الهيدروديناميكية، الهيدروكيميائية. النتائج التي تم الحصول عليها نتيجة لهذا العمل أعطت متوسط درجة حرارة سنوية قدرها 18 درجة مئوية، معامل هطول الأمطار السنوي يساوي 52 مم، نفاذية شاملة للخزان الجوفي من 2.9 إلى متر مربع/ثانية، متجانسة ولكن الأس الهيدروجيني الأساسي عند مستوى البحيرة يصل إلى درجة 11.6 والتوصيلات التي تتراوح بين 215 إلى 147500 ميكروثانية/سم.

أدى ذلك إلى استنتاج أن المنطق تتمتع بنماخ شديد الجفاف وثلاثة خزانات رئيسية (طبقة المياه الجوفية من الحجر الرملي في العصر الجوراسي وخزان العصر الطباشيري السفلي) في إتصال وثيق، وتشكل طبقة مياه جوفية ذات نفاذية متوسطة متعددة الطبقات، ممثلة ببقعة مسطحة مع تدفق رئيسي شمالي شرقي إلى جنوبي غربي. تتعرض منسوب المياه الجوفية على مستوى البحيرات المختلفة (بريفي - يوأ - أوما). يتم تحديد المياه من خلال الوجوه المسيطرة كلور الصوديوم وبيكربونات الصوديوم.

الكلمات المفتاحية: أرديس - الحجر الرملي النوبي - الثانوي - النفاذية - متعدد الطبقات.

Sommaire

INTRODUCTION GENERALE.....	1
Chapitre I : Caractérisation de la zone d'étude	
I. Cadre géographique.....	2
I.1. Cadre géographique général.....	2
I.2. Cadre géographique local.....	2
II. Cadre climatique.....	3
II.1. Aperçu général sur le climat.....	3
II.2. Etude des précipitations.....	4
II.2.1. Précipitations moyennes mensuelles.....	5
II.2.2. Précipitations moyennes annuelles.....	5
II.3. Etude des températures.....	7
II.3.1. Les maxima et minima.....	7
II.3.2. Températures moyennes.....	8
II.4. Régime climatique.....	8
II.4.1. Courbe pluviothermique.....	8
II.4.2. Indices climatiques.....	9
II.4.2.1. Indice d'aridité de De Martonne.....	9
III. Conclusion.....	10
Chapitre II : Contexte géologique	
I. Contexte géomorphologique.....	11
II. Contexte géologique.....	13
II.1. Aperçu général.....	13
II.2. Description lithostratigraphie.....	15
II.2.1. Les formations anté-nappe : substratum anté à synchro-nappe.....	15
II.2.1.1. Continental de base (dévonien-carbonifère inférieur).....	15
II.2.1.2. Carbonifère (série de Mourdi).....	15
II.2.1.3. Trias inférieur (formation de Madadi).....	16
II.2.2. Les formations post-nappe : Couverture.....	16
II.2.2.1. Crétacé supérieur.....	16
II.2.2.2. Paléogène.....	16
II.2.2.3. Quaternaire.....	16
III. Conclusion.....	19

Chapitre III : Hydrogéologie

1. Cadre général.....	20
2. Cadre local	21
I. Identification des aquifères	22
I.1. Aquifère du crétacé inférieur.....	22
I.2. Aquifère du jurassique	22
I.3. Trias moyen et supérieur	22
II. Piézométrie et interprétation de la carte	22
III. Hydrodynamique	25
IV. Hydrochimie	26
IV.1. Introduction	26
IV.2. Etude des paramètres physico-chimiques.....	28
IV.2.1. Paramètres physiques.....	28
IV.2.2. Paramètres chimiques.....	30
IV.2.2.1. La balance ionique	30
IV.2.2.2. Les cations	31
IV.2.2.4. Dureté des eaux	33
IV.2.2.5. Faciès hydrochimique	34
IV.2.2.6. Interprétation par diagramme de Schöeller-Berkaloff.....	37
IV.2.2.7. Carte de faciès chimique et interprétation	38
IV.2.3. Etude des rapports caractéristiques	39
V. Conclusion	41
CONCLUSION GENERALE ET RECOMMANDATIONS.....	43
Annexes.....	45
Références bibliographiques	47

Liste des tableaux

Tableau n°1 : Coordonnées de la station de Fada.....	5
Tableau n°2 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Fada (1991-2019).....	5
Tableau n°3 : Précipitations moyennes annuelles à la station de Fada.....	6
Tableau n°4 : Températures moyennes annuelles à la station de Fada (1991-2019) ..	7
Tableau n°5 : Précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Fada	8
Tableau n°6 : Classification des climats proposée par De Martonne.....	9
Tableau n°7 : Les données piézométriques des points d'eau	23
Tableau n°8 : Présentation des résultats de l'analyse physico-chimique des eaux (M.L. Vogt, 2016).....	27
Tableau n°9 : Valeurs de l'erreur pour chaque analyse	31
Tableau n°10 : Classification des eaux selon la dureté	33
Tableau n°11 : Valeurs de TH calculé et classification des eaux.....	34
Tableau n°12 : Résultats des analyses chimiques des quantités en réaction r (még/l)	35
Tableau n°13 : Faciès caractéristiques des échantillons prélevés.....	36
Tableau n°14 : Valeurs des rapports caractéristiques	40

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation du secteur d'étude (in A. Moursal, 2016)	2
Figure 2 : Carte des isohyètes annuelles (1951-2004) du Tchad (DEAM/CNAR, 2014)	4
Figure 3 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Fada (1991-2019).....	5
Figure 4 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles de la station de Fada	6
Figure 5 : Températures minimales, maximales et moyennes à la station de Fada (1991-2019).....	7
Figure 6 : Courbe pluviothermique de la station de Fada	9
Figure 7 : Abaque d'Indice d'aridité de De Martonne (station de Fada).....	10
Figure 8 : Carte structurale et géomorphologique du Tchad (P-SIDRAT, 2013).....	12
Figure 9 : Carte géologique du bassin des Erdis (<i>D'après K.H. Hesse et al., 1987</i>). 14	
Figure 10 : Coupe NE-SE du bassin des Erdis (ResEau, 2016).....	17
Figure 11 : Colonne lithostratigraphique de la région des Erdis	18
Figure 12 : Carte générale de l'aquifère transfrontalier (Rapport UNESCO - IHP-VI 2006)	21
Figure 13 : Carte piézométrique de la zone d'étude (2013/2014).....	24
Figure 14 : Classification des eaux selon le diagramme de Schöeller-Berkaloff.....	38
Figure 15 : Carte de faciès chimique	39

Annexe

Tableau n°12 : Résultats des analyses chimiques des quantités en réaction r (méq/l)	45
Tableau n°13 : Faciès caractéristiques des échantillons prélevés.....	46
Tableau n°14 : Valeurs des rapports caractéristiques	46

Acronymes

% : Pourcentage

m : Unité de mesure de distance, mètre

mm : Millimètre

méq/l : Milliéquivalent par litre

mg/l : Milligramme par litre

µS/cm : Micron siemens par centimètre

CT : Continental terminal

CI : Continental intercalaire

CB : Continental de base

Cond : Conductivité

R.S : Résidu secs

pH : Potentiel hydrogène

P-SIDRAT : Programme de système d'information pour le développement rural et l'aménagement du territoire

MA : Million d'année

14C : Carbone-14

NSAS : Nubian sandstone aquifer system

PNSAS : Post-nubian system

FIT : Front intertropical

UNESCO-IHP-VI : United nations educational, scientific and cultural organisation- Intergovernmental hydrological program VI

CEDARE : Centre for environment and development for the arab region and Europe

DEAM/CNAR : Centre national pour la recherche archéologique.

Introduction générale

L'eau est une ressource limitée, indispensable à la vie humaine et animale. Elle intervient dans toutes les activités humaines et dans le développement socio-économique de tout pays. Elle est source de santé à travers sa composition tout comme peut aussi être source de plusieurs maladies hydriques pour l'homme et avoir des impacts négatifs sur l'environnement lorsqu'elle est polluée par certaines activités anthropiques.

De nos jours, cette ressource devient très rare et devient source de plusieurs problèmes géopolitiques. Ce stress hydrique s'explique par le problème fréquentiel depuis des décennies, qui est le changement climatique. Pour ce faire, il est donc nécessaire d'accentuer les études hydrogéologiques afin de mener à bien les recherches et exploitations des ressources en eaux afin de satisfaire le besoin de la population.

C'est dans l'optique de contribuer à l'étude hydrogéologique du continental intercalaire (grès de Nubie) que notre choix s'est porté. Du faite de son extension, le système aquifère nubien présente un intérêt hydrogéologique immense. Cependant, la zone des Erdis est caractérisée par des formations gréseuses et parfois argileuses d'âge secondaire.

Compte tenu les objectifs de notre travail, le présent travail est noté comme suit :

- Le premier chapitre, consacré à la caractérisation générale de la zone d'étude, qui traitera la localisation et le climat avec la détermination du régime de la zone d'étude ;
- Le deuxième chapitre, sera consacré à la description détaillé de la géomorphologie et de la géologie du secteur d'étude ;
- Le dernier chapitre, le plus important du travail, traitera l'hydrogéologie de la zone d'étude où nous avons fait sortir les différents aquifères. Dans le même cadre, on présentera également l'étude piézométrique et hydrodynamique. La partie hydrochimie sera le dernier point du chapitre, qui, mettra en évidence la qualité des eaux de la région.

Chapitre I : Caractérisation de la zone d'étude

I. Cadre géographique

I.1. Cadre géographique général

Situé à cheval entre l'Afrique du nord et l'Afrique subsaharienne, le Tchad, s'étend entre les 8^{ème} et 23^{ème} degrés de latitude nord et les 14^{ème} et 24^{ème} de longitude est. Limité au nord par la Libye, au sud par la République Centrafricaine, à l'est par le Soudan et à l'ouest par le Niger, le Nigéria et le Cameroun. Cependant, la partie nord-est (Ennedi) fera l'objet de notre d'étude.

I.2. Cadre géographique local

Le domaine qui fait l'objet du présent travail correspond à la zone des Erdis, nord du pays. Ce dernier occupe la partie marginale du Sahara nord-est du pays. Erdis, est limité :

- A l'est et au nord-est, par les plateaux de l'Ennedi, recoupés par deux grands corridors dunaires, le Marhdogoum et l'Erg Idrisi ;
- Au sud, par la dépression de Mourdi ;
- Au nord, par les sables du désert libyen ;
- A l'ouest par les Lacs d'Ounianga.

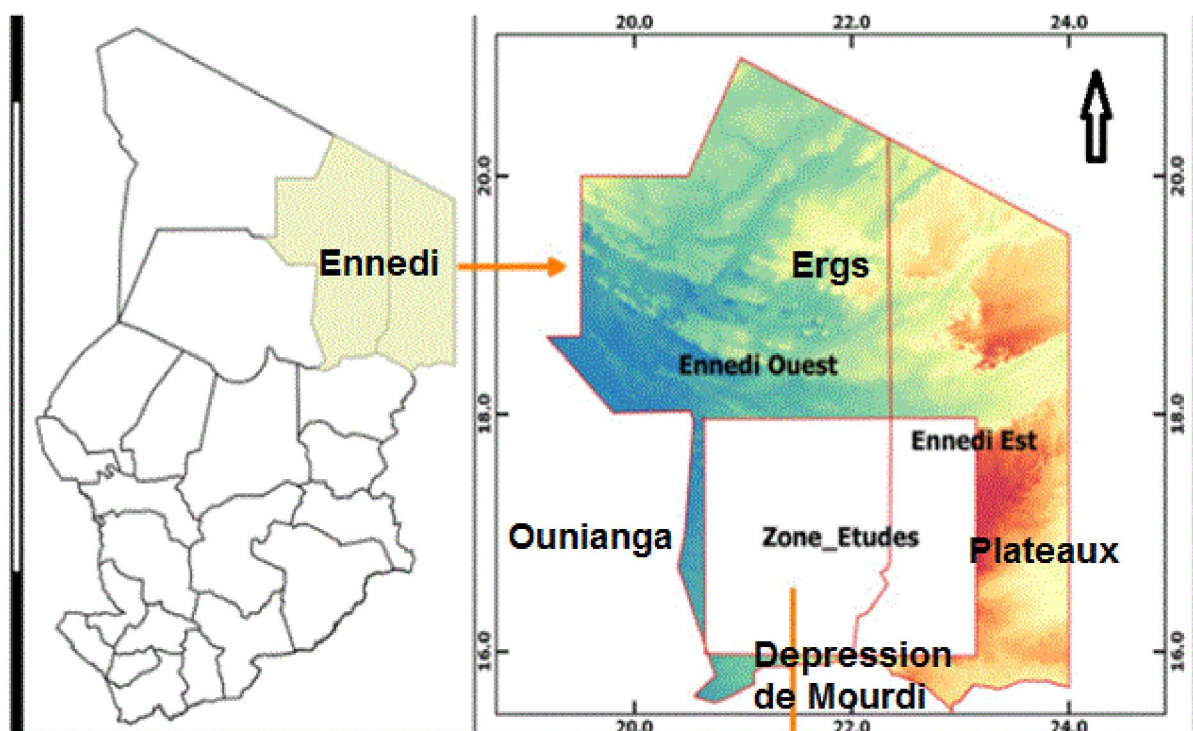


Figure 1 : Carte de localisation du secteur d'étude (in A. Moursal, 2016)

II. Cadre climatique

II.1. Aperçu général sur le climat

Deux groupes de facteurs déterminent le climat, aussi bien régional que local. Ce sont les facteurs géographiques (latitude, altitude, ...) et les facteurs météoriques liés au déplacement des masses d'air.

En raison de sa plus grande étendue en latitude (8° à 23° de latitude nord soit sur 1760km), le Tchad présente une variation climatique importante avec un passage progressif du sud au nord, d'un climat tropical semi-humide à un climat désertique : soudano-guinéen puis soudanais jusqu'au 11^{ème} parallèle, sahélo-soudanais jusqu'au 14^{ème} parallèle, sahélo-saharien jusqu'au 15^{ème} parallèle, puis saharien.

Les changements saisonniers sont liés aux variations de FIT (Front Intertropical) qui provoque en position méridionale un déplacement d'air continental avec l'harmattan, vent du nord-est qui souffle d'octobre en avril et donne la saison sèche, et en position septentrionale amène de l'ouest-sud-ouest le vent humide de la mousson qui détermine la saison des pluies (J.L. Schneider et J.P. Wolff, 1992).

Les lames d'eau moyennes de notre secteur d'étude lues sur la carte ci-dessous sont inférieures à **100mm/an**.

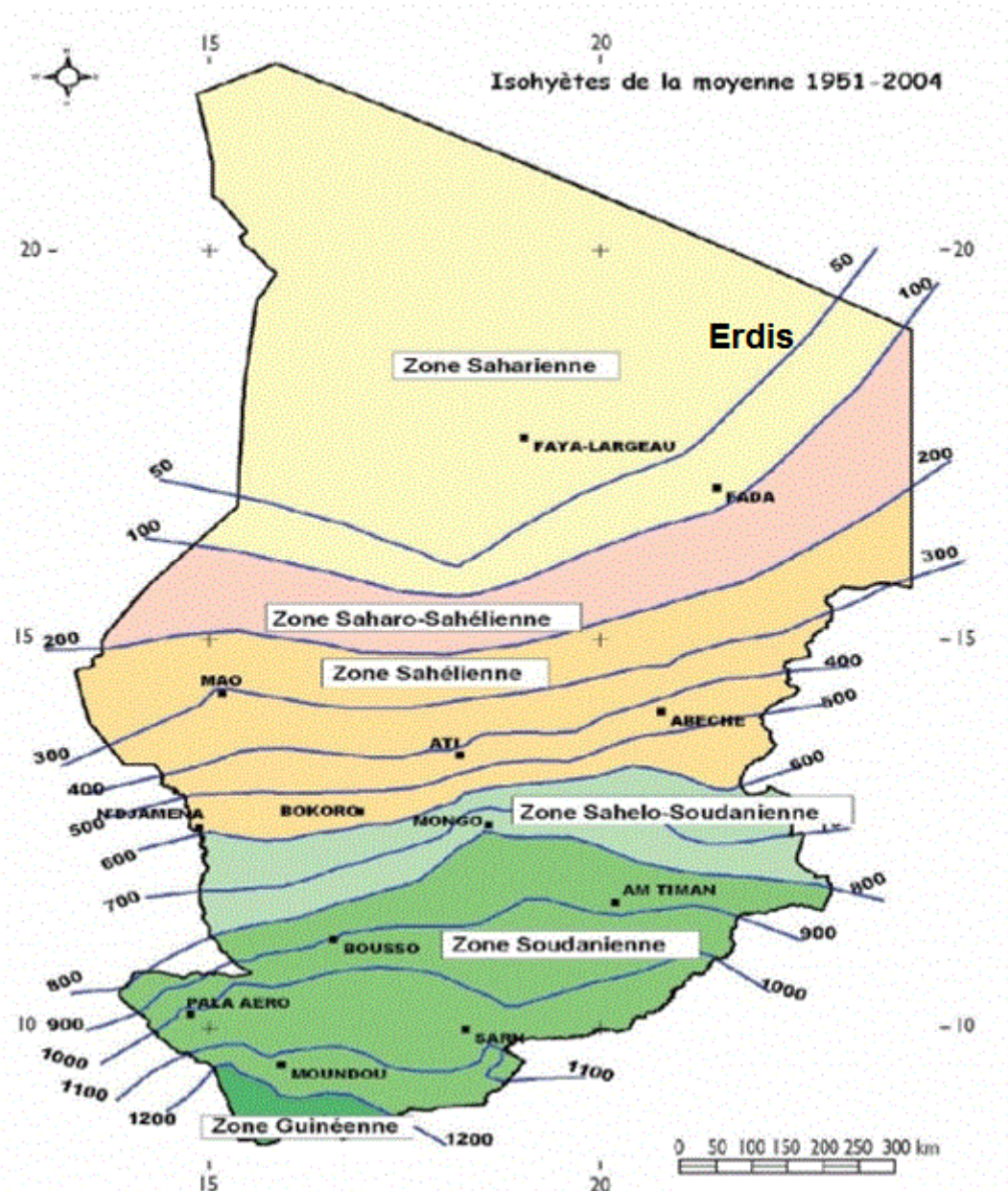


Figure 2 : Carte des isohyètes annuelles (1951-2004) du Tchad (DEAM/CNAR, 2014)

II.2. Etude des précipitations

Considérée comme l'élément le plus important du climat dans une région d'étude. Elle permet d'estimer la quantité de la pluviométrie abattue sur une région. Cette étude est faite à partir des données récoltées au niveau d'une station. L'analyse de ces données permet probablement d'étudier le changement climatique sur le fonctionnement de la nappe.

Chapitre I : Caractérisation de la zone d'étude

Pour le secteur d'étude, nous avons considéré les données de précipitations s'étendant de la période allant de 1991 à 2019, pour la station de Fada.

Tableau n°1 : Coordonnées de la station de Fada

Station	X	Y	Z	Période
Fada	21.55	17.17	540	1991-2019

II.2.1. Précipitations moyennes mensuelles

La répartition mensuelle des données de précipitations est reportée dans le tableau ci-dessous, sous forme d'histogramme.

Tableau n°2 : Précipitations moyennes mensuelles à la station de Fada (1991-2019)

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juit.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Total annuel
P moy. (mm)	0	0	0	0,25	1,65	3,5	12,5	29	5,13	0,32	0	0	52,38

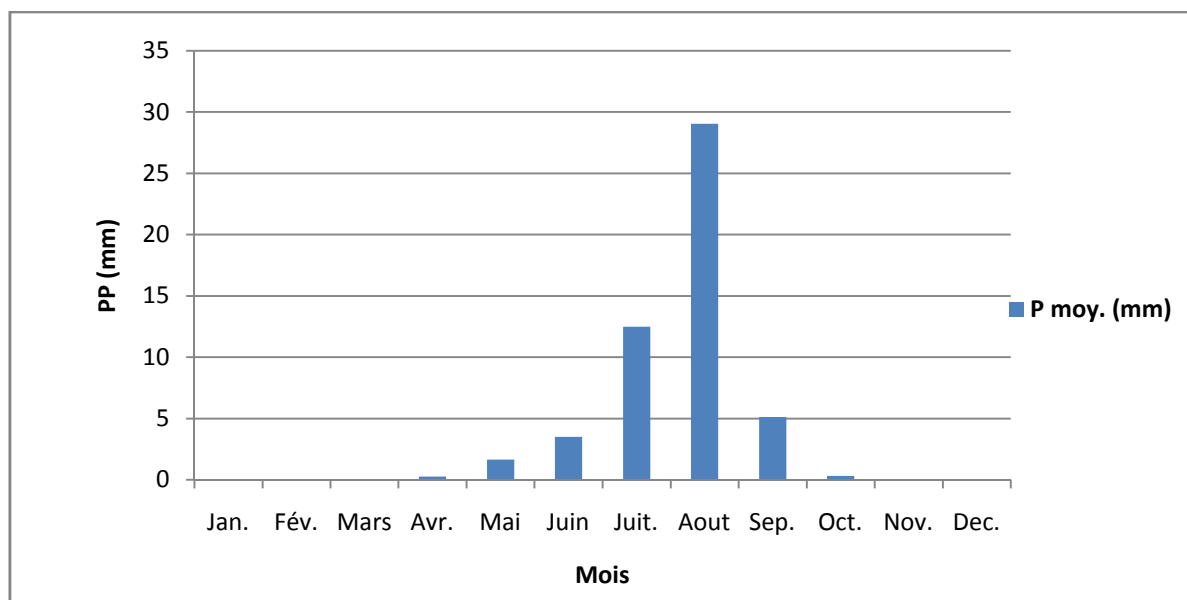


Figure 3 : Histogramme des précipitations moyennes mensuelles à la station de Fada (1991-2019)

D'après le tableau et l'histogramme, le mois d'août, a reçu la plus grande quantité de précipitations (**hiver**) tandis que les mois allant de novembre jusqu'en mars, possèdent les plus faibles quantités (**été**).

II.2.2. Précipitations moyennes annuelles

Le tableau ci-dessous donne les valeurs de l'évolution de la pluviométrie annuelle sur une période de 29ans (1991-2019) :

Tableau n°3 : Précipitations moyennes annuelles à la station de Fada

Ordre	Années	PP (mm)	Ordre	Années	PP (mm)
1	1991	113,1	16	2006	29,5
2	1992	114,9	17	2007	48,1
3	1993	66,1	18	2008	55,8
4	1994	130,5	19	2009	53,3
5	1995	63,7	20	2010	31,2
6	1996	38,6	21	2011	35,6
7	1997	66,7	22	2012	29,8
8	1998	21	23	2013	30,5
9	1999	32,9	24	2014	15,2
10	2000	15,9	25	2015	47,8
11	2001	10,3	26	2016	54,7
12	2002	36,3	27	2017	32,7
13	2003	66,3	28	2018	120,7
14	2004	89,9	29	2019	62,3
15	2005	6,7			

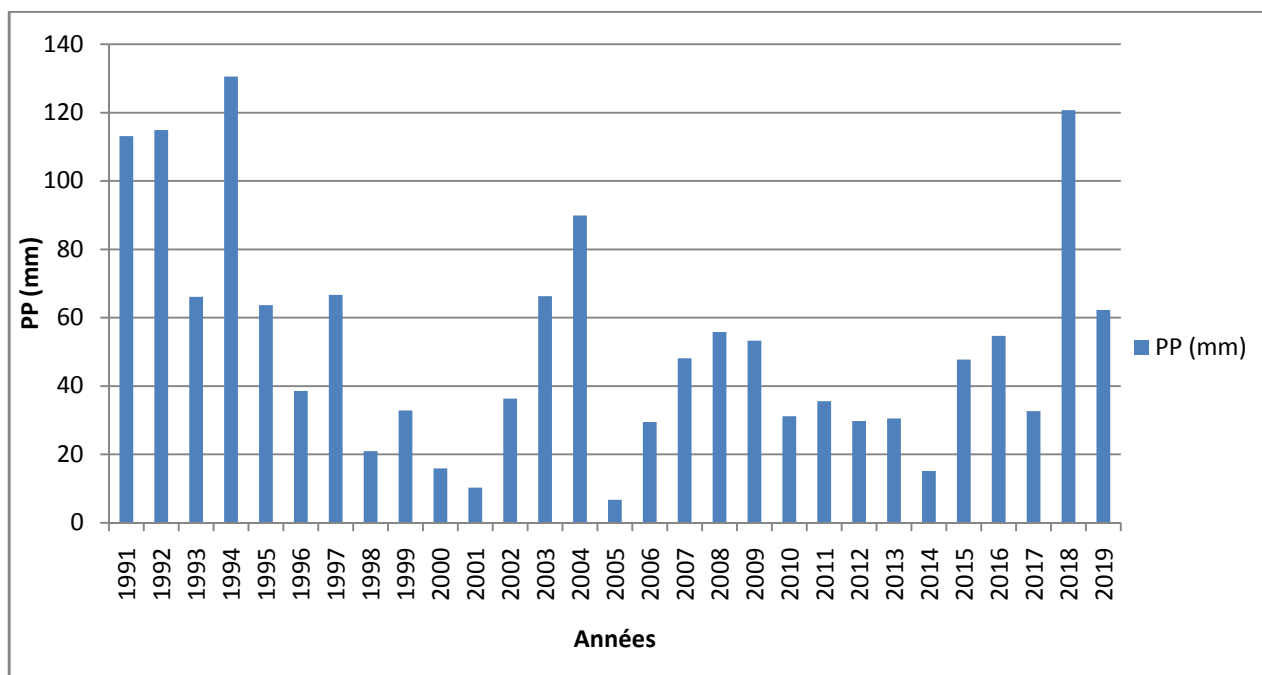


Figure 4 : Histogramme des précipitations moyennes annuelles de la station de Fada

L'analyse de notre Histogramme des précipitations moyennes annuelles de la station de Fada, nous montre que l'année enregistre la plus petite quantité de précipitations de l'ordre de **6,7mm (2005)**, par rapport à l'année **1994** qui accumule un maximum de **130,5mm**. Les précipitations sont caractérisées par leur variabilité mais aussi par leurs faibles intensités. Ainsi, cette variabilité interannuelle nous donne un module pluviométrique moyen annuel égal à **52,41mm**.

II.3. Etude des températures

II.3.1. Les maxima et minima

La température est une donnée indispensable pour la détermination d'un climat. Il permet d'estimer le déficit d'écoulement. Le tableau ci-dessous résume les variations mensuelles des minima, des maxima et des moyennes qui y ont été relevées.

Tableau n°4 : Températures moyennes annuelles à la station de Fada (1991-2019)

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juit.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
T min.	17,42	18,13	22,55	25,07	25,65	25,96	23,71	22,41	22,71	22,64	20,73	17,48
T max.	33,33	35,45	38,36	40,33	40,65	39,45	35,53	33,72	35,92	38,12	36,77	34,46
T moyennes	25,38	26,79	30,46	32,7	33,15	32,71	29,62	28,07	29,32	30,38	28,75	25,97

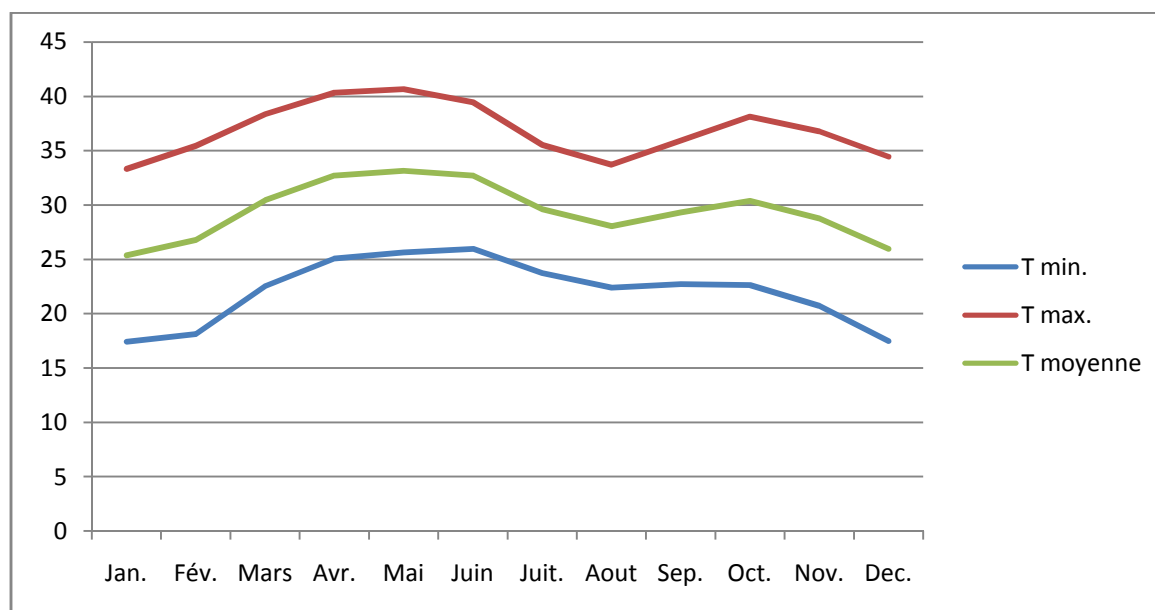


Figure 5 : Températures minimales, maximales et moyennes à la station de Fada (1991-2019)

On y observe que :

- **Les minima** : De décembre au février, ils sont inférieurs à 20°C. La valeur la plus basse se présente en janvier (17,42°C) (Tab.4).
- **Les maxima** : La fourchette est de 33, 33°C en janvier à 40,65°C en mai.

II.3.2. Températures moyennes

La région est caractérisée par une moyenne annuelle de 29,44°C, une moyenne du mois le plus froid (janvier) de: 25,38°C et une moyenne du mois le plus chaud (août) : 33,15°C.

La courbe représente une forme irrégulière, c'est ce qui explique la présence de deux épisodes froides : celui de décembre jusqu'au février et celui du mois août (Fig.5).

II.4. Régime climatique

II.4.1. Courbe pluviothermique

Selon F. Bagnoul et H. Gaussen, un mois sec est celui où le total moyen des précipitations est inférieur ou égal au double de la température.

$P \text{ (mm)} \leq 2T \text{ } ^\circ\text{C}$

Cette relation permet d'établir un diagramme pluviothermique sur lequel les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations. La courbe des températures passe au dessus de celle des précipitations pendant les mois secs.

Tableau n°5 : Précipitations et températures moyennes mensuelles à la station de Fada

Mois	Jan.	Fév.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juit.	Août	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.
P moy. mensuelles (mm)	0	0	0	0,25	1,65	3,5	12,49	29,04	5,13	0,32	0	0
T moy. mensuelle (°C)	16,67	17,73	19,18	20,17	20,33	19,73	17,77	16,86	17,96	19,06	18,39	17,23

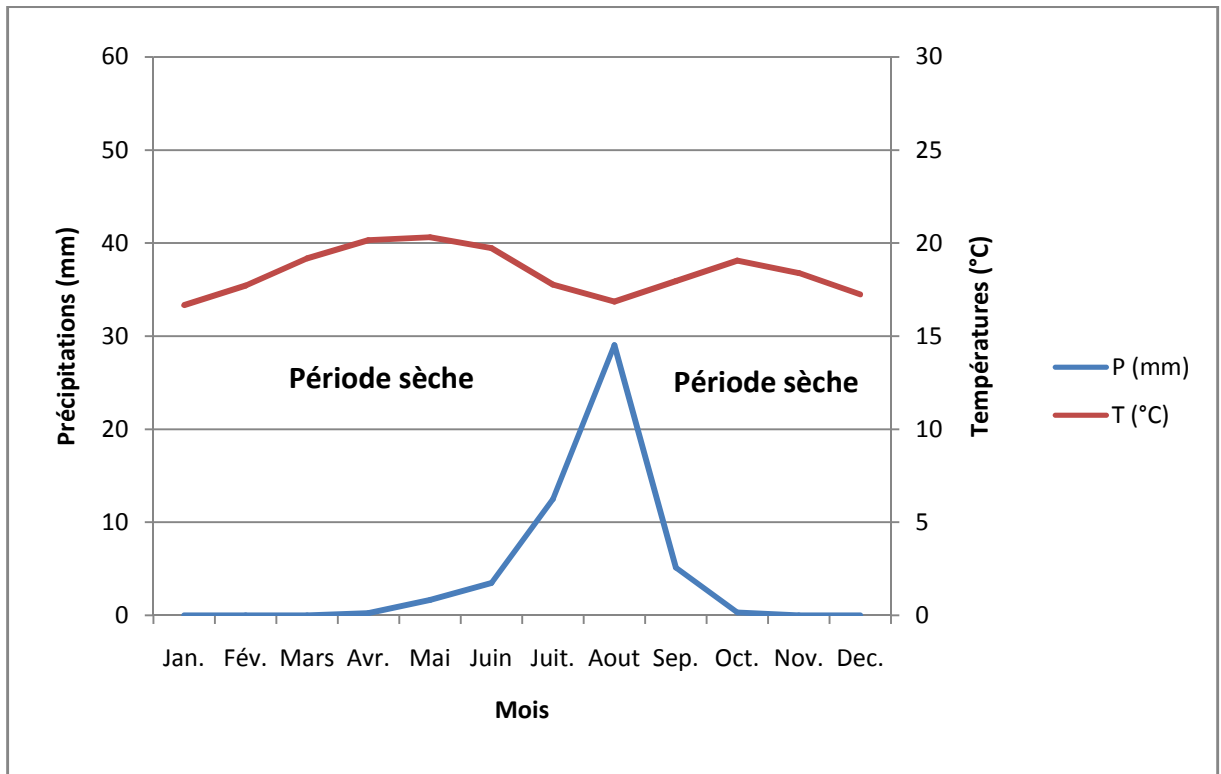


Figure 6 : Courbe pluviothermique de la station de Fada

Notre courbe reflète une période sèche s'étendant sur toute l'année. Le mois d'aout est le seul mois peu humide mais il reste toujours sec.

II.4.2. Indices climatiques

II.4.2.1. Indice d'aridité de De Martonne

Cet indice nous donne le degré d'aridité d'une région lors d'une étude hydro-climatologique. C'est le rapport entre la hauteur moyenne des précipitations annuelles et la moyenne des températures annuelles : $I = P/T+10$

Où :

I : indice d'aridité annuel de De Martonne ;

P : précipitations moyennes annuelles (mm) ;

T : température moyenne annuelle (°C).

Tableau n°6 : Classification des climats proposée par De Martonne

Valeur de "I"	< 5	5 < I < 7,5	7,5 < I < 10	10 < I < 20	20 < I < 30
Type de climats	Hyperaride	Désertique	Steppique	Semi-aride	Tempéré

Pour la station de Fada, l'indice d'aridité est obtenu comme suit :

$$I = 52,41 / (18,42 + 10)$$

$$I = 1,84$$

Avec l'indice d'aridité obtenue qui est, $I = 1,84$, donc notre " I " est inférieur à 5, on déduit que la station de Fada est caractérisée par un **hyperaride**.

Ci-dessous, notre station d'étude est représentée sur un abaque donné par De Martonne.

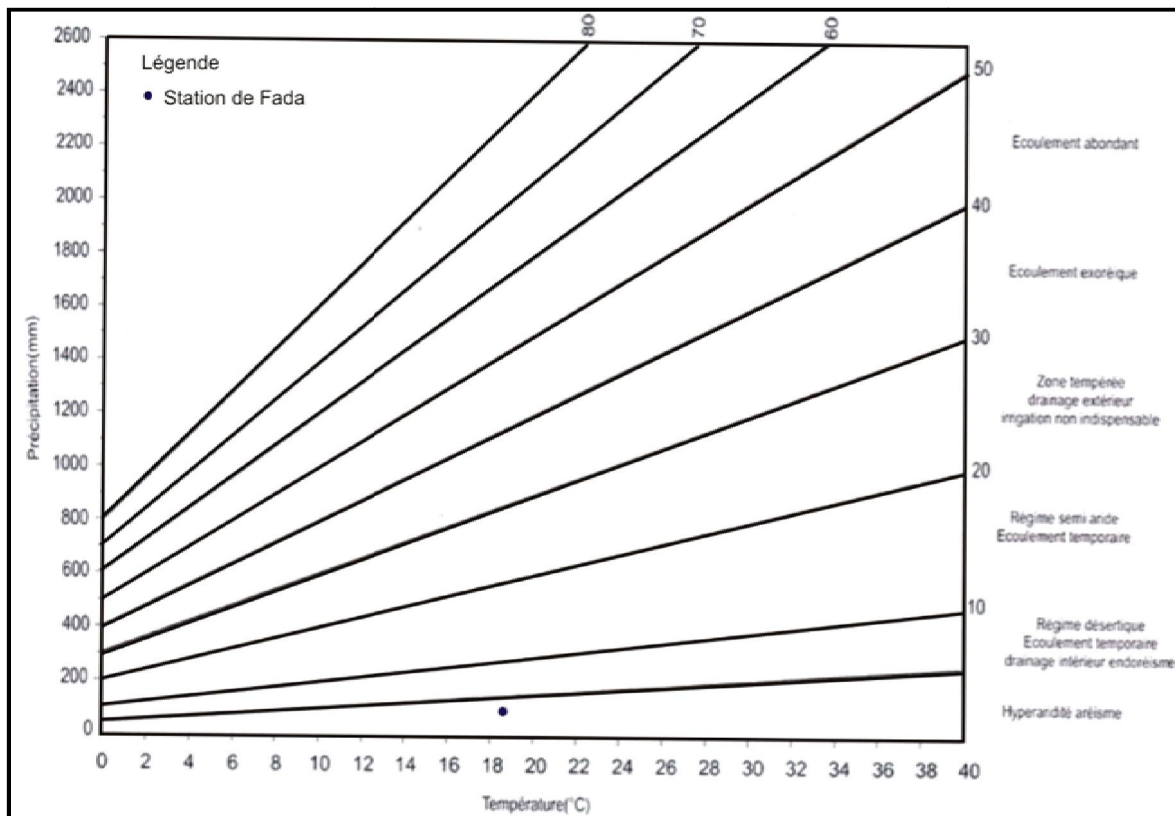


Figure 7 : Abaque d'Indice d'aridité de De Martonne (station de Fada)

III. Conclusion

Notre secteur d'étude fait partie des plateaux de l'Ennedi, jouissant d'un climat continental hyperaride. Le secteur présente une précipitation moyenne annuelle de **52 mm** avec une valeur de température moyenne mensuelle de **18°C**. La région est caractérisée par un bref épisode pluvieux (août) et une longue saison sèche (septembre au juillet).

Chapitre II : Contexte géologique

I. Contexte géomorphologique

De point de vue géomorphologique, lithologique et structural, le Tchad est constitué des unités géologiques suivantes (Fig.8) :

- Les massifs du Tibesti et les hauts plateaux de l'Ennedi, au nord;
- Le plateau du Ouaddaï, à l'est;
- Le Massif Central du Guéra, centre-est;
- Le massif de Yadé et le batholite du Mayo-Kebbi;
- Le bassin Crétacé-Tertiaire-Quaternaire, à l'ouest et au sud.

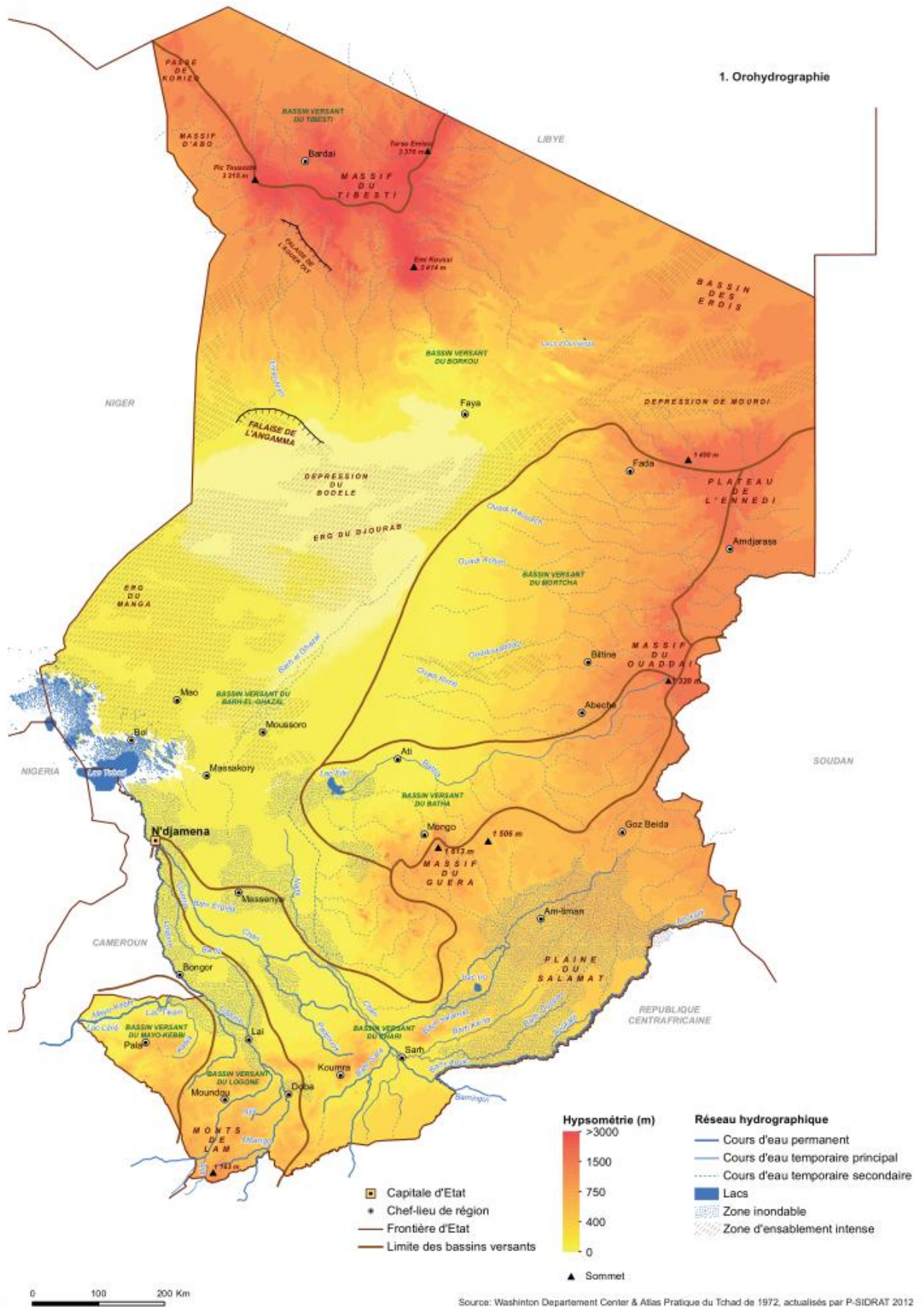


Figure 8 : Carte structurale et géomorphologique du Tchad (P-SIDRAT, 2013)

II. Contexte géologique

Les premiers travaux, reposent sur des observations de surface et des levés de coupes de terrains, ont été menés par les autorités françaises pendant la période coloniale, contrairement aux études récentes plus précises basées sur l'investigation géophysique (sondages, coupes géo-électriques) et l'analyse des coupes de forages.

Notre secteur d'étude est représenté par le massif de l'Ennedi (altitude maximale de 1 415m) au nord-est, est constitué de terrains paléozoïques sédimentaires. Entre les deux massifs, le bassin des Erdis (plus de 2000m) est constitué essentiellement de terrains d'âge secondaire (Grès de Nubie).

II.1. Aperçu général

Les Erdis se présentent sous forme d'un plateau : les grès de Nubie sont subhorizontaux avec des pendages très faibles convergeant vers le centre du bassin. A la limite du carbonifère marin sur lequel les grès sont transgressifs, une succession de quatre falaises emboîtées (Ph. Wacrenier, 1951) a été établit :

Les dépôts sont constitués des cuirasses latéritiques, des grès ferrugineux (au roche noir) et d'alternances d'argiles flammées et des grès ; les facies sont donc très proches de ceux du continental terminal, mais des calcaires lacustres sont interstratifiés dans le grès.

Il y a lieu de noter les alternances des argiles violacées et des grès présentant de nombreux niveaux des silex repris dans des conglomérats intraformationnels (falaise de Té kro) ; les bois silicifiés sont nombreux, notamment du genre Dadoxylon (A. Hisseine, 1986).

Des alternances des grès roses à stratification entrecroisée et des grès fin en plaquettes avec quelques niveaux des pélites et d'argiles très subordonnées (falaise d'Ounianga kébir) ; les bois silicifiés sont encore ici très abondants ; la série est épaisse d'environ 250m.

En fin, à la falaise extrême (série de Soeka), comprend des argiles gréseuses (150m) avec des intercalations des grès bigarrées à stratification entrecroisée, souvent grossiers, reposant à la base sur les argiles rouges à nodules de manganèse.

Les grés de Nubie sont d'âge mésozoïque, sont composés d'alternances de grès et d'argiles, avec niveaux ferrugineux. La puissance totale de cet ensemble peut

dépasser les 600 m. La période de dépôt est postérieure à Ladinien; elle semble s'achever au Crétacé (cénomannien).

Les grès de Nubie ont subi une érosion très intense avant les dépôts tertiaires et quaternaires, marins ou continentaux du sorte que la série est incomplète sur plusieurs endroits.

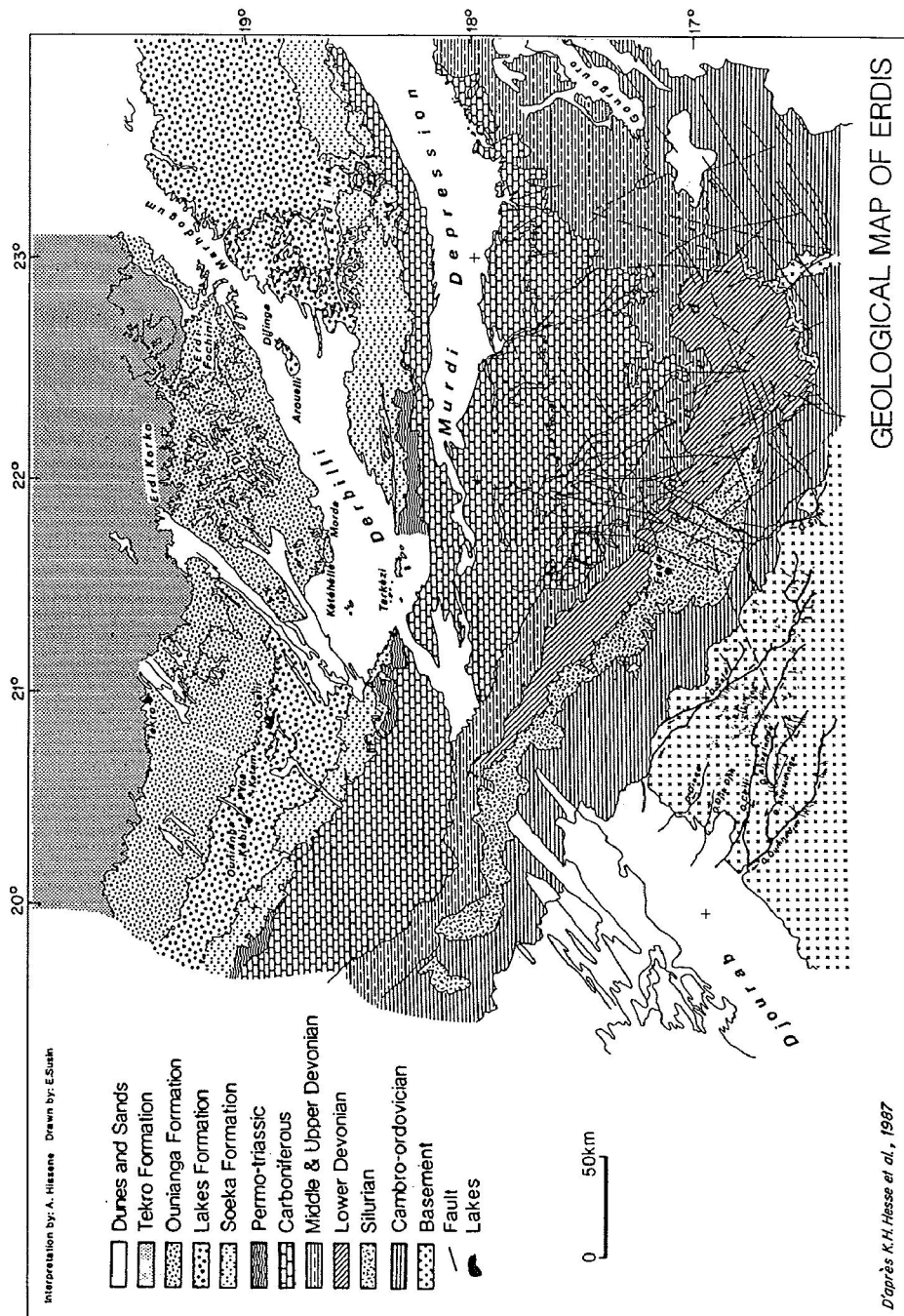


Figure 9 : Carte géologique du bassin des Erdis (D'après K.H. Hesse et al., 1987)

II.2. Description lithostratigraphie

Notre secteur d'étude fait partie du domaine ayant fait l'objet de divers travaux géologiques menés par K.H. Hesse(1987), J.L. Schneider et J.P. Wolff (1992, P.M. Vincent (1959), A. Hisseine (1986) et récemment avec le ProjetResEau de M.L. Vogt (2016). Des observations des affleurements (plateaux des oasis, palmerais, dépression...) et l'analyse des cuttings recueillis dans plusieurs puits et forages, ont permis la description lithostratigraphique de la région. Ainsi deux grands ensembles ont été définis :

- Un premier anté à synchro-nappe,
- Une seconde post-nappe.

Le bassin des Erdis, est caractérisé par des terrains dont l'âge varie du dévonien au cénozoïque.

II.2.1. Les formations anté-nappe : substratum anté à synchro-nappe

Dans le bassin des Erdis, les séries les plus anciennes, affleurent au sud-ouest de la coupe (Fig.10), appartiennent au continental de base supérieur, suivi de série de Mourdi et de la formation de Madadi. Cette dépression, d'une largeur d'environ 40km, est formée d'une épaisse série d'argilites, de calcaires et de grès du carbonifère, souvent recouverte par des dunes (M.L. Vogt, 2016).

II.2.1.1. Continental de base (dévonien-carbonifère inférieur)

Il s'agit des grès et des grès argileux en plaquettes du Dévonien-Carbonifère inférieur, formant le versant nord du massif de l'Ennedi et s'enfonçant sous la dépression de Mourdi. Le carbonifère marin est représenté uniquement en Ennedi, dans la dépression du Mourdi, où il repose sur les grès dévonien et disparaît sous les grès du Nubie qui le recouvre en discordance. Le continental de base fait 350m d'épaisseur.

II.2.1.2. Carbonifère (série de Mourdi)

Il est représenté par des sédiments d'origine marine et fait barrière semi-perméable entre les séries des grès du continental de base de l'Ennedi et celle du continental intercalaire des Erdis. Peu connue, ces couches sont les plus tendres, comme les argiles, sont en grande partie masquées par des couvertures des sables éoliens et des dépôts alluviaux et lacustres. Les seuls bancs à l'affleurement, dans la partie

orientale de la dépression, sont des grès arkosiques, des microconglomérats, des grès à ciment calcaire et quelques grès oolithiques gris. Cette série, épaisse d'environ 100m.

II.2.1.3. Trias inférieur (formation de Madadi)

Cette formation, aux affleurements épars et discontinus, comprend des sédiments principalement argileux, riche en bois fossile, déposés en discordance sur la série du Mourdi (Klitsch, 1966 ; M. Hisseine, 1986). Elle constitue localement un horizon étanche à la base du continental intercalaire avec une épaisseur de 15m. Il est spécifié par le nodule de manganèse (Mn).

II.2.2. Les formations post-nappe : couverture

Le toit du bassin des Erdis, affleure au nord-ouest de l'Ounianga, d'âge crétacé inférieur et suivi des dépôts continentaux d'âge paléogène.

II.2.2.1. Crétacé supérieur

Les remplissages du bassin des Erdis, débutent par le crétacé supérieur, constitué par une alternance des grès bruns orangés en bancs, parfois conglomératiques et bois silicifiés. Il repose sur la formation argileuse et gréseuse, affleure au sud-ouest à Té kro. Cette alternance varie d'une épaisseur environ 250m.

II.2.2.2. Paléogène

Le début du tertiaire, est caractérisé des dépôts continentaux. Une succession des couches des grès et sables jaunes parfois des argiles versicolores et cuirasses latériques présentant plus de cinq (5) d'épaisseur. Le paléogène marque la fin du bassin des Erdis (CI) et le début du continental terminal (CT). Cette formation est discontinue et variable latéralement.

II.2.2.3. Quaternaire

Les principaux traits du paysage des Erdis résultent d'une action fluviale ancienne à laquelle se superpose un façonnement éolien selon la direction (NE-SO), en barres, couloirs, yardangs et cuvettes hydroéoliennes (Mainguet, 1968). Un système de drainage, aussi entendu qu'actif coïncidait avec les périodes humides du pléistocène supérieur et de l'holocène. Selon une analyse des modèles numériques de terrain,

des cours d'eau empruntaient les couloirs de Marhdogoum et de l'Erg Idrisi, des paléovallées aujourd'hui ennoyées sous les dunes. Des paléolacs, reconnaissables à leurs dépôts des diatomites (environ 02m) sur toute la plaine (M.L. Vogt, 2016).

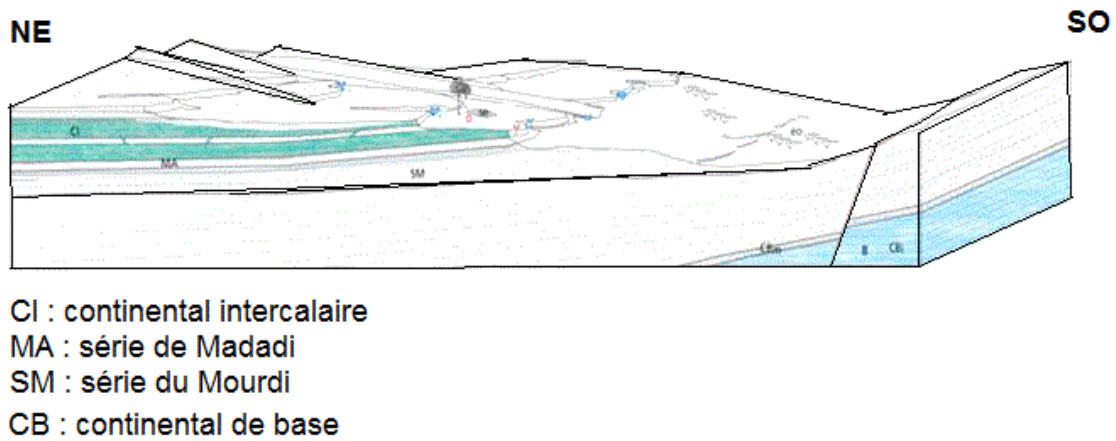
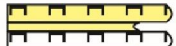


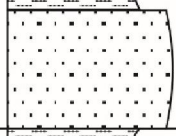

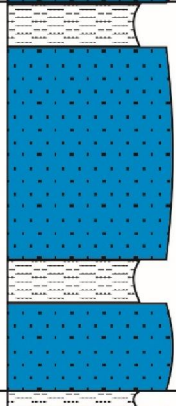
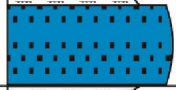

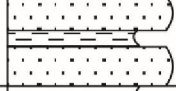
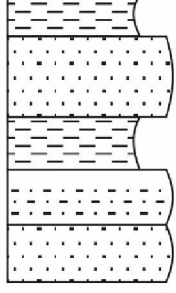


Figure 10 : Coupe NE-SE du bassin des Erdis (ResEau, 2016)

Ages	Formations	Localités	Descriptions
Quaternaire		Tékro	Diatomites + Sables
Paléogène			Grès + Sables
Crétacé moy-sup			Conglomérât Argiles + Bois silicifié
			Grès
Crétacé inférieur		Ounianga kébir et Gouro	Argiles + Grès
Jurassique			Alternance grès et argiles
Trias moy-sup		Lacs	Grès grossiers + Argiles
Trias inférieur		Soeka	
Carbonifère		Soeka	Argiles et grès sableux
Dévonien-carbonifère inférieur			Alternance de grès et de grès argileux

Figures et Symboles Utilisés












	Argiles		Grès à aquifère
	Grès		Grès grossiers à aquifère
	Conglomérat		Sables
	Grès argileux		Diatomite
	Bois silicifié		Diatomite sableux
	Manganèse	CI	Continental intercalaire

Figure 11 : Colonne lithostratigraphique de la région des Erdis

III. Conclusion

Cette première partie a fait l'objet d'une présentation de façon général sur le cadre géomorphologique et géologique. Situé au nord de la ville de l'Ennedi, les Erdis sont la continuité des plateaux de l'Ennedi. Géologiquement, le bassin des Erdis, comprend des terrains d'âge du fin primaire, secondaire, paléogène et quaternaire (Fig.11), mettant en évidence une structure de deux (02) ensembles :

- Un substratum anté-nappe (argiles parfois gréuso-argileux) ;
- Une couverture post-nappe du crétacé-paléogène-Quaternaire (argiles, grès carbonatés et bois sillicifiés).

Un schéma illustratif de la région étudiée a été établi à partir de l'étude lithostratigraphique. Sur le plan tectonique et structural, tout le bassin des Erdis n'a pas été affecté, mais présente une subhorizontalité avec des pendages très faibles convergeant vers le centre du bassin ; contrairement à sa limite sud (dépression de Mourdi) et ouest (Tibesti) qui ont subi une série des failles.

Chapitre III : Hydrogéologie

1. Cadre général

L'étude hydrogéologique permet de mettre en évidence les formations géologiques susceptibles de contenir de l'eau et de connaître les relations qui existent entre les différents types d'aquifères d'un secteur d'étude bien déterminé.

Ainsi, le système aquifère nubien se présente sous forme d'une épaisse série sédimentaire continentale dont l'extension est régionale (Libye, Égypte, Tchad et Soudan). Ces sédiments d'une épaisseur de plusieurs milliers de mètres, sont assez perméables pour constituer un système aquifère qui est subdivisé en deux niveaux qui sont :

- L'aquifère ancien qui est le plus étendu, formé par des sédiments détritiques continentaux déposés depuis la fin du paléozoïque jusqu'au cénomani. Il est connu sous le nom de l'aquifère des grès de Nubie (NSAS),
- L'aquifère récent qui englobe en Libye et en Égypte, des sédiments continentaux détritiques et tertiaires ainsi qu'en Égypte, des formations carbonatées du Tertiaire. Il est connu sous le nom de l'aquifère post-nubien (PNAS).

Ces deux niveaux aquifères sont séparés par des couches à faible perméabilité datées du Crétacé supérieur et du Tertiaire.

Les limites de ce système aquifère les affleurements du socle localisés dans le désert oriental en Égypte et dans le Nord du Soudan ainsi que ceux d'Ennedi (Erdis) et Tibesti (Tchad). La structure du système aquifère nubien est sous forme d'une cuvette monoclinale dont le substratum est constitué par les formations du socle tectonisé (Fig.12)

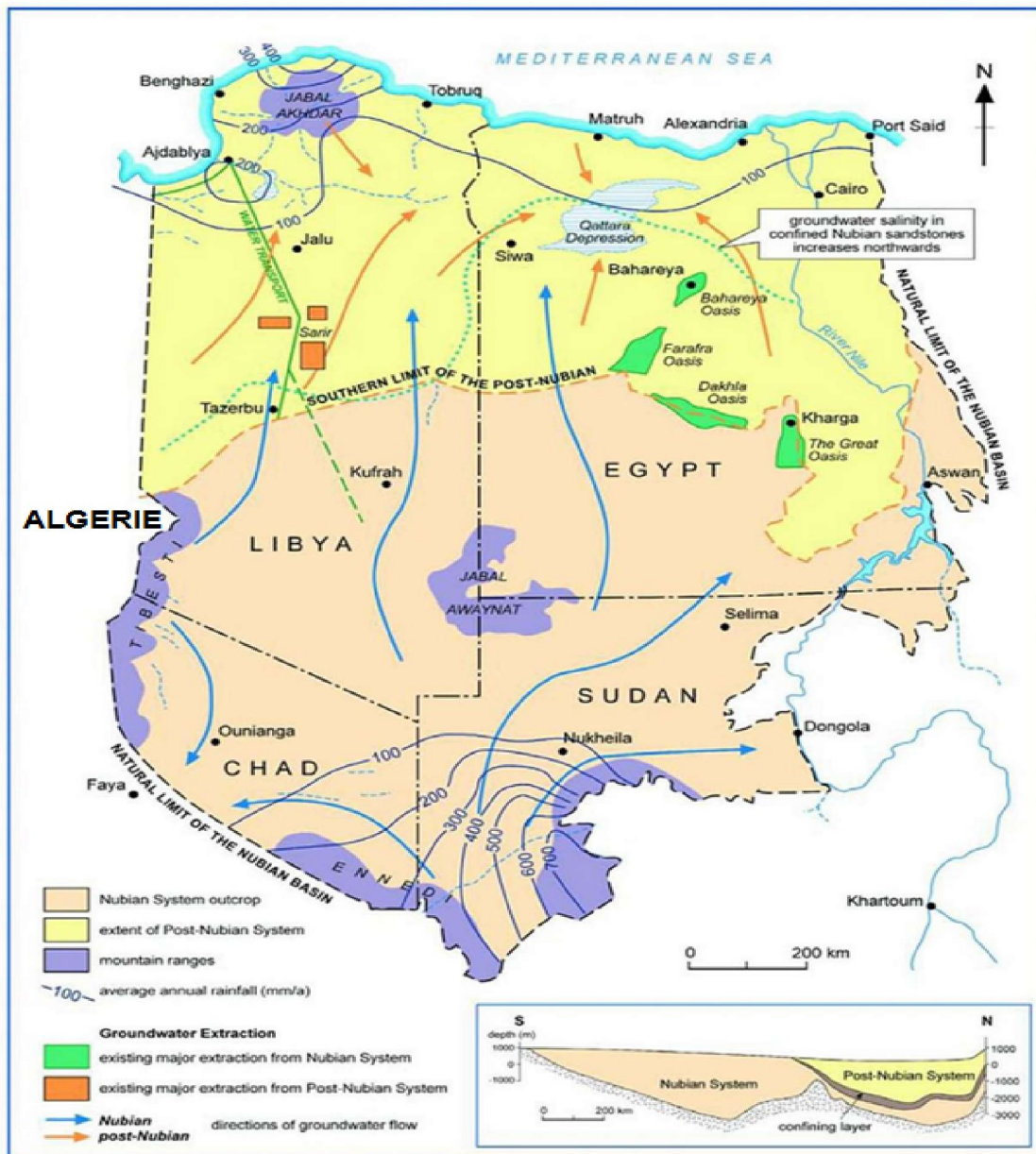


Figure 12 : Carte générale de l'aquifère transfrontalier (Rapport UNESCO - IHP-VI 2006)

2. Cadre local

Notre secteur d'étude est représenté par l'aquifère du grès de Nubie. Les études hydrogéologiques menées sur notre secteur d'étude ont permis de mettre en évidence l'existence d'un système d'aquifère multicouche représenté par une alternance des grès et des faibles épaisseurs d'argiles d'âge secondaire.

I. Identification des aquifères

Les investigations hydrogéologiques, ont déterminé la présence d'un aquifère multicouche d'âge secondaire. Il est présenté comme suit :

I.1. Aquifère du crétacé inférieur

Il composé essentiellement des grès carbonatés et d'argile à la base avec une épaisseur allant jusqu'à 30m, repose en discordance sur le continental intercalaire. C'est la nappe supérieure de la nappe (Ounianga kébir). C'est l'aquifère qui renferme une nappe importante très intéressante captée par la majorité des puits de la zone. Il présente une variabilité selon des endroits, tantôt libre et parfois semi-perméable.

I.2. Aquifère du jurassique

Constitué à la base par des argiles du trias et avec un toit étanche d'argile de Madadi, il présente une captivité sur plusieurs endroits et artésien sur certaines zones. Il est le plus grand départ son épaisseur environ 450m et qui est composé des grès roses et des grès argileux avec des niveaux subordonnés d'argiles. Les eaux de cet aquifère affleure au sud-ouest et donnant naissance aux eaux d'Ounainga kébir et celui de Gouro (Oasis).

I.3. Trias moyen et supérieur

Avec une lame d'eau de plus de 150m, cet aquifère est à l'origine de plusieurs sources dans la région de Borkou. Il est composé des grès bigarrés plutôt grossiers et d'argiles rouges (Soeka), d'âge trias moyen. Il repose sur les argiles du trias inférieur, formant le substratum de cet aquifère. Cet aquifère marque la fin des aquifères du continental intercalaire et le début du continental de base.

II. Piézométrie et interprétation de la carte

En août 2013 et janvier 2014, une campagne piézométrique a été menée dans notre secteur d'étude sur (21) points d'eaux à savoir des puits et des sources situés à l'intérieur de notre zone d'étude. Un prélèvement fut également effectué au niveau de chaque puits et sources pour une étude hydrochimique.

Tableau n°7 : Les données piézométriques des points d'eau

Points d'eau	Longitude	Latitude	Z (m)	H (m)	Localités
P1	20°55'42.21"	19°20'32.35"	459,2	458	Gouro est
P2	20°53'10.23"	19°23'32.33"	462,5	461,1	Gouro est
S3	20°29'28.46"	19°03'16.09"	383,5	383	Lac Bréver
P4	20°35'34.62"	19°15'00.10"	415,1	414	Fochi
P5	20°30'59.73"	19°10'36.33"	402	401,2	Tékro
P6	20°38'52.47"	19°07'33.22"	396,1	395	Tékro centre
P7	20°40'01.31"	19°17'23.34"	418,8	417	Fardialla
P8	20°43'08.39"	19°23'30.33"	429,2	427,5	Gaour nord
P9	20°45'42.09"	19°24'06.34"	434,5	433,3	Gaour nord
P10	20°49'29.22"	19°13'40.16"	428,8	427,1	Ouadi Doum ville
P11	20°49'46.11"	19°20'32.11"	442,1	440,2	Ouadi Doum nord
P12	20°47'29.25"	19°23'25.04"	438,3	437	Ouadi Doum
P13	20°53'11.01"	19°08'33.56"	429,3	428,2	Egbéchi
P14	20°35'46.36"	19°05'36.57"	393,4	392,1	Tékro sud
P15	20°52'53.21"	19°15'06.56"	436,7	435,5	Ouadi Doum ville
S16	20°29'59.05"	19°04'00.45"	386,4	386	Lac Oma
S17	20°29'48.03"	19°03'35.34"	384,5	384,3	Lac Bréver 2
S18	20°29'36.12"	19°03'19.54"	398,5	398,1	Lac Yoa
P19	20°57'39.67"	19°20'38.23"	461,5	460	Gaour ville
P20	20°29'34.11"	19°02'30.23"	385,4	385	Ounianga Kébir
P21	20°57'42.04"	19°26'39.09"	465,8	464,2	Gaour nord

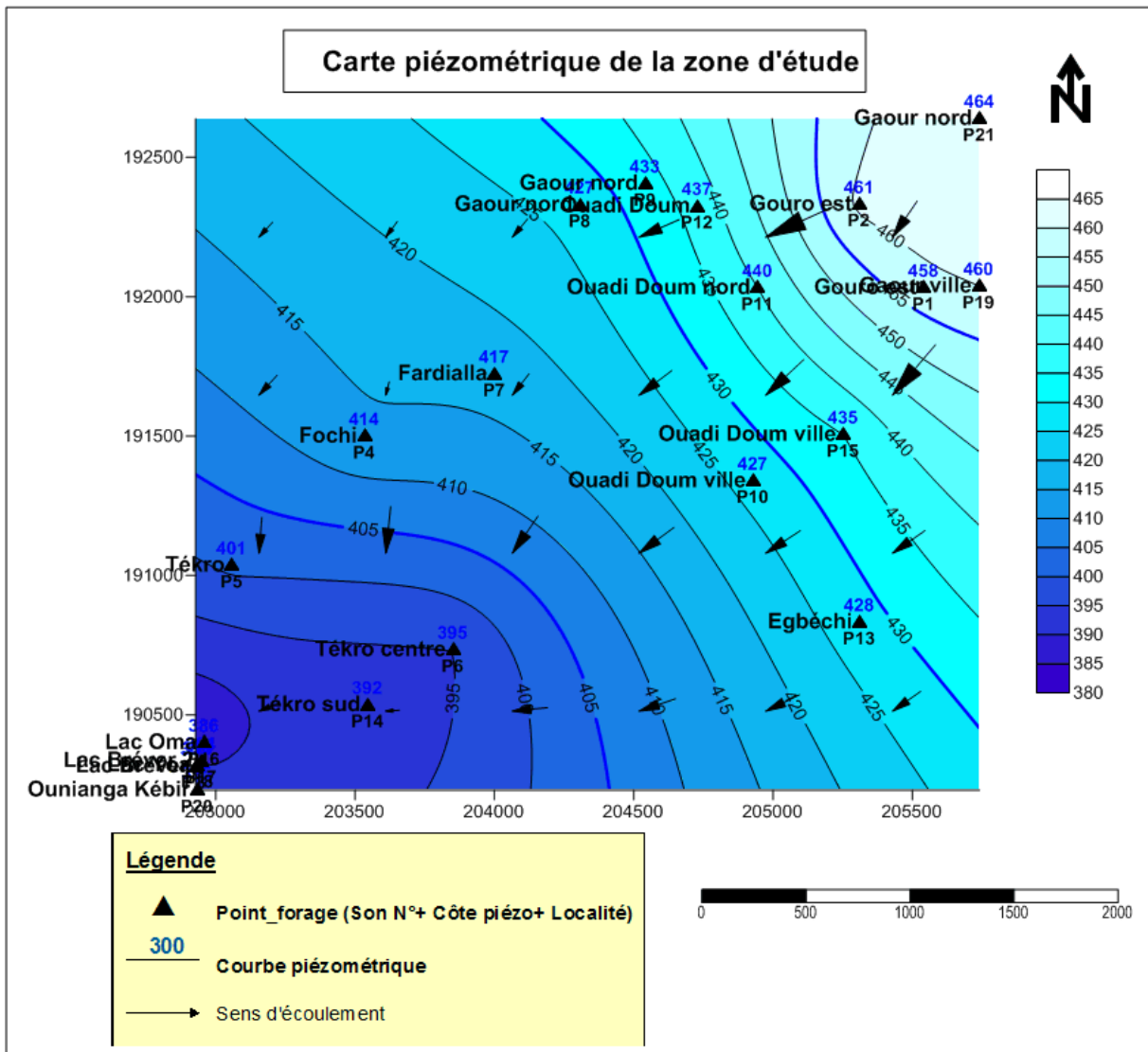


Figure 13 : Carte piézométrique de la zone d'étude (2013/2014)

Depuis les années 60, l'année 2012, fut l'année d'une importante mission scientifique (ResEau) qui a permis à la réactualisation des données piézométriques de la zone d'étude. La carte piézométrique correspondant aux altitudes de la nappe au moment de la mesure piézométrique, donne une indication sur la situation de la nappe, le sens des écoulements et la vitesse. Ainsi, les courbes hydroisohypses de notre carte schématise non seulement la fonction conduite du réservoir mais aussi le comportement hydrodynamique de l'aquifère à travers les informations suivantes obtenues suites à l'interprétation :

L'écoulement général se fait du Nord-est vers le Sud-ouest avec une surface piézométrique caractérisant une nappe radiale, un peu linéaire ; les courbes sont serrées en amont et espacées vers l'aval. La pente de cette nappe est assez régulière et le profil parabolique de l'écoulement général dénote une diminution de la perméabilité dans le sens contraire de l'écoulement.

Le gradient hydraulique moyen de la nappe au niveau de la zone de Fochi est faible, de l'ordre de 5×10^{-3} soit 0,5%. Les plateaux de l'Ennedi sont constitués par des grès, qui sont doués d'une excellente perméabilité d'interstices.

Dans cette région désertique, l'alimentation de l'aquifère par les eaux de pluie est négligeable, de l'ordre de 2,9 mm/an à Tazebo (Lybie) à 1,3 mm/an dans la région de Kufrah et aux Erdis. Dans cette hypothèse, la quantité d'eau reçue ne doit pas excéder quelques millions de m^3 annuellement. L'alimentation du système est donc dérisoire en regard des immenses réserves. Ces réserves ont été accumulées pendant les périodes humides du pléistocène (Quaternaire inférieur : 1,8 MA à environ 10.000 ans) et durant la période pluviale plus récente (8.000 ans), comme semblent l'indiquer les datations au ^{14}C . Ces nappes sont donc l'héritage liquide d'un climat disparu. Il y a plusieurs dizaines de milliers d'années, le désert du Sahara était une savane verdoyante, des forêts tropicales recouvraient les montagnes et des plaines (CEDARE, 2002).

Les exutoires naturels sont désormais les émergences au nord, dans les dépressions du bassin de Syrte (Lybie), au nord-est dans le désert occidental égyptien, au sud-ouest au niveau des lacs (Tchad) et à l'est jusqu'au Nil (Soudan).

III. Hydrodynamique

La fonction conduite d'un aquifère permet le transport des quantités d'eau et la transmission d'influence. Elle est imposée par la structure de l'aquifère : géométrie et hydrodynamique. L'écoulement de l'eau souterraine est déterminé par trois groupes de paramètres hydrodynamiques :

- Coefficient de perméabilité et transmissivité ;
- Gradient et charge hydraulique ;
- Débit d'une nappe et vitesse d'écoulement des eaux souterraines.

La circulation de l'eau souterraine est conditionnée par la perméabilité. Pour connaître les caractéristiques hydrauliques d'un aquifère, il est indispensable d'effectuer « des pompages d'essai » qui consistent à enregistrer les variations de charges hydraulique (rabattements) ou du débit au puits de pompage et dans des piézomètres proches de l'ouvrage de captage en fonction du temps. Ces variations sont interprétées selon différents modèles théoriques de comportements hydrodynamiques, basés sur les solutions de l'équation de diffusivité. La transmissivité et le coefficient d'emmagasinement déterminés par les pompages

d'essai permettent de déterminer la présence de conditions aux limites pouvant être ouvertes ou fermées.

Transmissivité et perméabilité

En raison de manque des données sur le secteur d'étude, une référence régionale sur notre système aquifère nous indique sur l'hydrodynamique de l'aquifère. L'écoulement qui s'effectue au sud (du Tchad vers le Soudan) indique un gradient hydraulique moyen de 0,3 %. Les valeurs calculées de la transmissivité sont de l'ordre de 2,9 à $3,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s et le coefficient d'emménagement estimé à $5 \cdot 10^{-4}$. Ces valeurs indiquent un intérêt du point de vue hydrogéologique. Les formations de l'aquifère du continental intercalaire sont par conséquent un important réservoir exploitable.

IV. Hydrochimie

IV.1. Introduction

Elle apporte à l'hydrogéologie une somme considérable de renseignements utiles à la compréhension des phénomènes se produisant dans les systèmes aquifères, c'est-à-dire dans les échanges possibles entre l'eau et la roche, sachant que la minéralisation des eaux peut provenir de l'acquisition des éléments chimiques par dissolution et altération des minéraux du réservoir.

L'étude de la chimie des eaux souterraines permet aussi de suivre l'évolution spatiale des différents éléments dissouts et d'estimer leur origine, la profondeur de circulation et d'apprécier leur qualité vis-à-vis de la potabilité et l'irrigation.

L'eau à l'état naturel possède la constitution suivante :

- Gaz ;
- Sels minéraux subdivisés en cations (Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^{2+} , K^{+}) et anions (Cl^{-} , SO_4^{2-} , HCO_3^{-} (CO_3^{-}), NO_3^{-}) ;
- Etres vivants (bactéries unicellulaires, virus, etc.) ;
- Matière organique (animale ou végétale).

Cependant, la qualité de l'eau peut être altérée par la présence d'éléments indésirables polluants d'origine urbaine, agricole ou industrielle.

Nous avons pu disposer d'un réseau d'échantillonnage qui nous semble représenter au mieux a été la variabilité spatiale de la qualité des eaux souterraines de notre secteur d'étude. Il s'agit d'une campagne piézométrique et d'échantillonnages

réalisés sur 21 points d'eau pendant la période du août 2013 et janvier 2014. L'analyse des échantillons prélevés sont effectuées *in situ* et au laboratoire de chimie (N'Djaména).

Notre analyse hydrochimique portera sur l'interprétation des résultats des analyses physico-chimiques portés sur le tableau suivant :

Tableau n°8 : Présentation des résultats de l'analyse physico-chimique des eaux (M.L. Vogt, 2016)

Nom	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺	Cl ⁻	SO4 ²⁻	HCO3 ⁻	T (°C)	pH	Cond (µs/cm)	RS (mg/l)
P1	28	4	39	8	7	48	163	24	6,8	480	315
P2	18	4	19	5	5	13	122	27,4	6,2	215	200
S3	31	4	25466	2431	21341	676	460	27,2	9,8	81990	50500
P4	31	7	37	11	28	41	154	27	6,5	400	350
P5	24	7	137	43	201	121	66	28,7	7,3	1080	615
P6	16	8	520	17	364	346	214	26	7,6	2120	1525
P7	17	4	16	8	15	2	48	28	6,3	230	125
P8	11	4	26	6	9	15	114	27,1	6,2	260	195
P9	6	0	97	1	33	102	69	26,3	7,9	455	310
P10	32	7	49	7	36	73	150	27	6,6	405	360
P11	23	38	516	74	200	268	459	24,4	7,9	2630	2415
P12	28	6	73	8	36	71	224	27	6,9	555	455
P13	12	5	25	8	10	14	126	26,4	6,4	290	210
P14	26	5	24	7	5	30	142	26,7	6,3	275	250
P15	7	10	25	24	8	8	183	27,2	6,1	250	265
S16	29	24	946668	8652	61558	35292	92086	27,3	11,6	147500	292400
S17	31	18	18873	1808	13793	7303	18444	28	8,7	57140	60320
S18	36	23	9983	1488	5022	8136	12464	27,6	8,2	36640	38070
P19	25	6	25	5	13	36	137	25,8	7,6	285	250
P20	37	18	56	21	18	12	337	27	7	640	505
P21	34	19	144	25	45	158	360	26,7	7,3	990	790

IV.2. Etude des paramètres physico-chimiques

IV.2.1. Paramètres physiques

- **Température**

La température de l'eau est un paramètre de confort pour les usages. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyse dont les valeurs sont liées à la température (conductivité notamment). De plus, en mettant en évidence des contrastes de température de l'eau sur un milieu, il est possible d'obtenir des indications sur l'origine et l'écoulement de l'eau. La température doit être mesurée *in situ*. Les appareils de mesure de la conductivité ou du pH possèdent généralement un thermomètre intégré.

C'est important de connaître la température de l'eau avec une bonne précision. En effet celle-ci joue un rôle dans la solubilité des gaz, dans la dissociation des sels dissous et dans la détermination du pH, pour la connaissance de l'origine de l'eau et les mélanges éventuels, etc. En outre, cette mesure est très utile pour les études limnologiques. Et d'une façon générale, la température des eaux est influencée par l'origine dont elles proviennent. Elle est aussi un facteur important dans la production biologique, Ceci vient du fait qu'elle affecte les propriétés physiques et chimiques de celle-ci ; en particulier sa densité, sa viscosité, la solubilité de ses gaz (notamment celle de l'oxygène) et la vitesse des réactions chimiques et biochimiques.

La température des eaux de notre secteur d'étude est assez homogène. Les valeurs varient de **24 (P1) et 28,7°C (P5)**. A titre de référence, la température moyenne respective de l'air du mois d'août (**16,86**) et janvier (**16,67**) : (Voir chapitre I).

- **pH**

Le pH appelé potentiel Hydrogène mesure la concentration des ions H⁺ dans une solution aqueuse. Le pH permet ainsi de connaître l'acidité de l'eau. Il ressort que le pH a un effet direct sur la survie et le transport des microorganismes pathogènes. L'effet du pH du sol sur le transport des microorganismes pathogènes se manifeste principalement au niveau du processus d'adsorption. Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14.7. La valeur 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre conditionne un grand nombre d'équilibre physico-chimique, et dépend de facteurs multiples. Les valeurs du potentiel d'Hydrogène se situent entre 6 et 8,5 dans les eaux naturelles.

Concernant notre zone d'étude, les valeurs de pH sont la plupart homogènes et proches de la neutralité, excepté ceux des lacs. Toutes les mesures recensées varient entre **6,1 (P15) et 11,6 (S16)**.

- **Conductivité et minéralisation**

La conductivité représente l'un des moyens de valider les analyses physicochimiques de l'eau, en effet des contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélange ou d'infiltration. La conductivité est également fonction de la température de l'eau, elle est plus importante lorsque la température augmente. Elle sert aussi à apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau et constitue une bonne appréciation de la minéralisation de l'eau. Une conductivité élevée traduit une quantité de sels dissous très importante et elle donne une idée de la minéralisation d'une eau et elle est à ce titre un bon marqueur de l'origine d'une eau. La conductivité mesure la capacité de l'eau à conduire le courant entre deux électrodes. La plupart des matières dissoutes dans l'eau se trouvent sous forme d'ions chargés électriquement. Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. La procédure est facile, et permet d'obtenir une information très utile pour caractériser l'eau (X à 25°C) Comme la température, des contrastes de conductivité mesurés sur un milieu permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélanges ou d'infiltration. La conductivité est également un des moyens de valider les analyses physico-chimique de l'eau : la valeur mesurée sur le terrain doit être comparable à celle mesurée au laboratoire. Quelques indications sur la relation existant entre la minéralisation et la conductivité :

Conductivité ($\mu\text{S/cm}$) / minéralisation

Conductivité < 100 minéralisation très faible

100 < conductivité < 200 minéralisation faible ;

200 < conductivité < 300 minéralisation moyenne ;

300 < conductivité < 600 minéralisation moyenne accentuée ;

600 < conductivité < 1000 minéralisation importante ;

Conductivité < 1000 minéralisation excessive.

Les valeurs de la conductivité des différents points d'eau de notre zone d'étude sont toutes supérieures à **200 $\mu\text{S/cm}$** . La minéralisation la plus élevée est centrée sur : **S16 (Min = 147500 mg/l)** et la plus faible en **P2 (Min = 215 mg/l)**.

- **Résidu sec**

Le résidu sec représente la minéralisation totale des eaux, c'est-à-dire la totalité des sels dissous et les matières organiques contenus dans l'eau exprimé en g/l ou mg/l. Les échantillons prélevés des points d'eau de notre secteur d'étude, présentent des résidus secs variables entre **125 mg/l (P7)** et **292400 mg/l (S16)**.

IV.2.2. Paramètres chimiques

IV.2.2.1. La balance ionique

On peut comparer quantitativement les cations et les anions, majeurs et mineurs, présents dans l'eau à l'aide de la balance ionique. Cette dernière est effectuée en utilisant une unité commune, milliéquivalent par litre (méq/l), permet de vérifier si l'analyse a été bien faite. Ainsi, pour vérifier la balance ionique des différents ions analysés sur l'ensemble des échantillons, nous avons calculé l'erreur sur chaque analyse à partir de la relation suivante :

$$E = \frac{\sum r_c + \sum r_a}{\sum r_c + \sum r_a} \times 100 \quad \text{Où :}$$

r_c : Somme des cations en méq/l ; r_a : Somme des anions en méq/l.

Trois classes d'analyses se distinguent selon la valeur de l'erreur obtenue en pourcentage (%) :

- **E% > 5%** : erreur dans l'analyse ;
- **5 > E > 2%** : erreur acceptable ;
- **E < 2%** : bonne analyse.

Les résultats de l'erreur de l'analyse de nos échantillons figurent sur le tableau suivant :

Tableau n°9 : Valeurs de l'erreur pour chaque analyse

Echantillons	E (%)	Etat d'analyse
P1	3	Acceptable
P2	6	Mauvaise
S3	30	Mauvaise
P4	2	Bonne
P5	3	Acceptable
P6	8	Mauvaise
P7	25	Mauvaise
P8	6	Acceptable
P9	4	Acceptable
P10	6	Acceptable
P11	21	Mauvaise
P12	8	Mauvaise
P13	7	Mauvaise
P14	2	Bonne
P15	9	Mauvaise
S16	82	Mauvaise
S17	2	Bonne
S18	4	Acceptable
P19	7	Mauvaise
P20	0,08	Bonne
P21	2	Bonne

IV.2.2.2. Les cations

- **Le calcium Ca²⁺**

Le calcium est un métal alcalino-terreux extrêmement répandu dans la nature et en particulier dans les roches calcaires sous forme de carbonates. C'est un composant majeur de la dureté de l'eau le calcium est généralement l'élément dominant des eaux potables. Sa teneur varie essentiellement suivant la nature de terrains traversés. Il existe surtout à l'état l'hydrogencarbonate et en quantité moindre, sous forme de sulfates, chlorures. Sa teneur dans les eaux carbonatées a une origine

interne au système pouvant provenir soit de la dissolution des roches calcaires, soit du Gypse. Sa valeur seuil acceptable dans les eaux potables est de 200mg/l. Pour ce qui est de nos échantillons, les valeurs varient de **06 mg/l au point d'eau P9 à 37 mg/l au point d'eau P20**.

- **Le magnésium Mg^{2+}**

Le magnésium est un des éléments les plus répandus dans la nature ; il constitue environ 2.1% de l'écorce terrestre. L'apport du magnésium par la pluie est négligeable, comme le calcium il a une origine interne. L'acquisition de cet élément est lente et donc c'est un bon indicateur d'eaux à temps de séjour prolongé dans l'aquifère. Il est obtenu à la suite de l'attaque par le gaz carbonique des formations dolomitiques et la dissolution du $MgSO_4$ dans les terrains gypseux. Dans les eaux potables la concentration maximale admissible est de 150 mg/l. Pour notre cas, les valeurs obtenues de cet élément après analyse ne dépasse pas **38 mg/l (P11)**.

- **Le sodium Na^+ et le potassium K^+**

Ils sont présents à de faible teneurs (surtout le potassium), leur origine est principalement externe au système (apport atmosphérique), ils peuvent provenir soit de l'altération des minéraux silicatés soit d'échange de cations avec les minéraux argileux. Les concentrations maximales admissibles dans les eaux potables sont : 200mg/l pour le Sodium et 10mg/l pour le potassium. Les résultats de nos analyses donnent des teneurs en sodium allant de **16mg/l (P2) à 946668 mg/l (S16)** au niveau du Lac Oma. Pour ce qui est des teneurs en potassium, elles varient de **01mg/l (P9) à 8652mg/l (S16)**.

IV.2.2.3. Les anions

- **Les chlorures Cl^-**

La source principale de chlorure dans les eaux est due à la dissolution de roches sédimentaires qui se sont déposées en milieu marin et qui n'ont pas été complètement lessivées, et à la présence d'évaporites. L'invasion d'eau de mer, ainsi que les phénomènes d'évaporation dans les bassins endoréiques sont également des sources de chlorures possibles. Le rôle des roches cristallines dans la minéralisation en chlorures est faible. L'apport par les précipitations est d'autant plus important que la distance à la mer est faible. Les apports anthropiques sont mineurs dans les zones d'intervention humanitaire. La teneur en ion chlore des eaux naturelles est essentiellement associée à celle du sodium. Les eaux trop riches en chlorures sont laxatives et corrosives. La concentration maximale admissible pour les

eaux potables est de 500mg/l. Pour les points d'eau de notre secteur d'étude, seulement **S16** et (**P2, P14**) qui ont des valeurs dépassants la normale, respectivement (**61558** et **5**). Ces concentrations indiquent l'existence d'une très forte évaporation dans la région, mais aussi liées aux faciès argileux.

- **Les bicarbonates HCO_3^-**

D'origine interne au système, ces ions résultent de la dissolution des calcaires et son apport météorique étant négligeable. La variation temporelle des ions bicarbonates HCO_3^- comme celle des ions calcium Ca^{2+} sont corrélées à celle de la conductivité électrique. La plus faible teneur a été obtenue au niveau du point d'eau **P7 :48mg/l**.

- **Les sulfates SO_4^{2-}**

On retrouve toujours ces ions dans la constitution des eaux naturelles. Ils résultent de la mise en solution de roches sédimentaires évaporitiques, notamment le gypse (CaSO_4), mais également de la pyrite et plus rarement de roches magmatiques (galène, blende, pyrite). Les origines anthropiques sont la combustion de charbon et de pétrole qui entraîne une production importante de sulfures, et l'utilisation d'engrais chimique et lessive. Ils peuvent aussi provenir de l'oxydation dans l'atmosphère, de l'Anhydrite sulfureuse par combustion des hydrocarbures. La plus forte concentration de ces ions est observée au niveau de point d'eau **S16** avec une valeur de **35292mg/l** qui dépasse largement la concentration maximale admissibles pour les eaux potables qui est de **400mg/l**.

IV.2.2.4. Dureté des eaux

Le terme « dureté » de l'eau correspond à sa concentration en calcium et magnésium. Plus elle en contient, plus l'eau est considérée comme "dure. Elle est mesurée par le titre hydrotimétrique (TH) dont le taux s'exprime en degré français « °F » (1 degré français = 4 mg de calcium ou 2.4 mg de magnésium par litre d'eau). L'eau peut être plus ou moins "dure" selon les régions ; celle-ci dépend des sols que l'eau a traversés avant d'être prélevée dans la nature pour être rendue potable. Ainsi, en fonction de leur dureté, les eaux peuvent être classées suivant les indications du tableau suivant :

Tableau n°10 : Classification des eaux selon la dureté

TH (°F)	Spécificité de l'eau
0 à 6	Eau très douce
6 à 15	Eau douce
15 à 30	Eau moyennement dure
> 30	Eau très dure

Pour ce qui est notre secteur d'étude, les valeurs de TH calculées de l'ensemble des points d'eau échantillonnés montrent que les eaux très douce, douce et parfois moyennement dure. Les résultats sont reportés dans tableau ci-dessous.

Tableau n°11 : Valeurs de TH calculé et classification des eaux

Points d'eau	TH calculé (°F)	Classe d'eau	Points d'eau	TH calculé (°F)	Classe d'eau
P1	9	Eau douce	P12	10	Eau douce
P2	6	Eau très douce	P13	5	Eau très douce
S3	9	Eau douce	P14	9	Eau douce
P4	11	Eau douce	P15	6	Eau très douce
P5	9	Eau douce	S16	17	Eau dure
P6	7	Eau douce	S17	15	Eau douce
P7	6	Eau très douce	S18	19	Eau dure
P8	4	Eau très douce	P19	9	Eau douce
P9	2	Eau très douce	P20	17	Eau dure
P10	11	Eau douce	P21	16	Eau dure
P11	22	Eau dure			

IV.2.2.5. Faciès hydrochimiques

Le faciès hydrochimique d'une eau peut être déterminé à partir de sa composition chimique. A partir de leur teneur en milliequivalent par litre et de leurs formules caractéristiques, on a pu déterminer les faciès hydrochimiques des eaux échantillonnées de notre zone d'étude (Tab.13).

Tableau n°12 : Résultats des analyses chimiques des quantités en réaction r (méq/l)

N°	rCa	rMg	rNa	r K	rCl	rSO ₄	rHCO ₃
1	1,39	0,32	1,69	0,2	0,19	1	2,67
2	0,89	0,32	0,82	0,12	0,14	0,27	2
3	1,54	0,32	1107,21	62,17	601,15	14,08	7,54
4	1,54	0,57	1,6	0,28	0,78	0,85	2,52
5	1,19	0,57	5,95	1,09	5,66	2,52	1,08
6	0,79	0,65	22,6	0,43	10,25	7,2	3,5
7	0,84	0,32	0,69	0,2	0,42	0,04	0,78
8	0,54	0,32	1,13	0,15	0,25	0,31	1,86
9	0,29	0	4,21	0,025	0,92	2,12	1,13
10	1,59	0,57	2,13	0,17	1,01	1,52	2,45
11	1,14	3,12	22,43	1,89	5,63	5,58	7,52
12	1,39	0,49	3,17	0,2	1,01	1,47	3,67
13	0,59	0,41	1,08	0,2	0,28	0,29	2,06
14	1,29	0,41	1,04	0,17	0,14	0,62	2,32
15	0,34	0,82	1,08	0,61	0,22	0,16	3
16	1,44	1,97	41159,47	221,27	1734,02	735,25	1509,6
17	1,54	1,48	820,56	46,24	388,53	152,14	302,36
18	1,79	1,89	434,04	38,05	141,16	169,5	204,32
19	1,24	0,49	1,08	0,12	0,36	0,75	2,24
20	1,84	1,48	2,43	0,53	0,5	0,25	5,52
21	1,69	1,56	6,26	0,63	1,26	3,29	5,9

Tableau n°13 : Faciès caractéristiques des échantillons prélevés

Nom	Anions	Cations
P1	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P2	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$
S3	$\text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P4	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P5	$\text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P6	$\text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P7	$\text{HCO}_3^- > \text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$
P8	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P9	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P10	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P11	$\text{HCO}_3^- > \text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P12	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P13	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P14	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$
P15	$\text{HCO}_3^- > \text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
S16	$\text{rCl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
S17	$\text{rCl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
S18	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
P19	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$
P20	$\text{HCO}_3^- > \text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P21	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$

Nous pouvons déduire que l'ensemble des eaux présentent un **faciès chloruré sodique et bicarbonaté sodique** et parfois **calcique**, excepté celui du **sulfaté sodique** du (P9). D'autres part, cette classification fait également ressortir une prédominance variable entre les cations (Ca^{2+} et Na^{2+}) et les anions (Cl^- , HCO_3^- et SO_4^{2-}) déterminant l'existence de huit (08) sous-faciès :

- P1, P2, S3, P4, P5, P6, P8, P10, P12, P13 et P21 : Un sous-faciès sulfaté calcique ;
- P2, P14 et P19 : Un sous-faciès sulfaté sodique ;
- S18 : Un sous-faciès sulfaté magnésien ;
- P11 et P20 : Un sous-faciès chloruré calcique ;
- P7 : Un sous-faciès chloruré sodique ;

- P15 : Un sous-faciès chloruré magnésien ;
- S16 et S17 : Un sous-faciès bicarbonaté magnésien ;
- P9 : Un sous-faciès bicarbonaté calcique.

Nous allons également représentés les traits hydrochimiques des eaux analysées sur des graphiques (diagramme de Schöeller-Berkaloff) qui permet une meilleure étude comparative entre nos échantillons.

IV.2.2.6. Interprétation par diagramme de Schöeller-Berkaloff

Ce diagramme semi-logarithmique permet de représenter le faciès géochimique de plusieurs échantillons d'eau et de les comparer. La concentration de chaque élément chimique est figurée par une ligne verticale en échelle logarithmique.

Après le report des valeurs des analyses le diagramme, l'interprétation confirme les faciès et sous-faciès prédéterminés par la dominance des **chlorures** et du **sodium** observé d'où l'appartenance des eaux à la famille **chlorurée sodique (NaCl)**. Ce faciès chimique s'explique par une forte évaporation au niveau des différents lacs. Les eaux des lacs précipitent sels gemmes qui, sont déposés aux embouchures des lacs et donnent un goût salifère aux eaux de la région. Quant au deuxième type de faciès **bicarbonaté sodique (NaCO₃)**, il pourrait être engendré par la dominance des soudes (natron), qui est souvent présents dans la zone d'étude. La chimie des ces eaux est tributaire à la zonalité géologique.

Les points d'eau (**S3, S16, S17 et S18**), sont des petits lacs, représentant l'exutoire de la nappe. Ils sont pris comme échantillons. Après un temps de séjour, ces eaux sont chargées en sels minéraux, vu le contexte climatique de la zone avec une forte évaporation et précipitation de chlorure de sodium (**sels**) et des soudes (**natron**).

Dans le tableau ci-dessous, des échantillons représentatifs de notre zone d'étude sont reportés dans le diagramme :

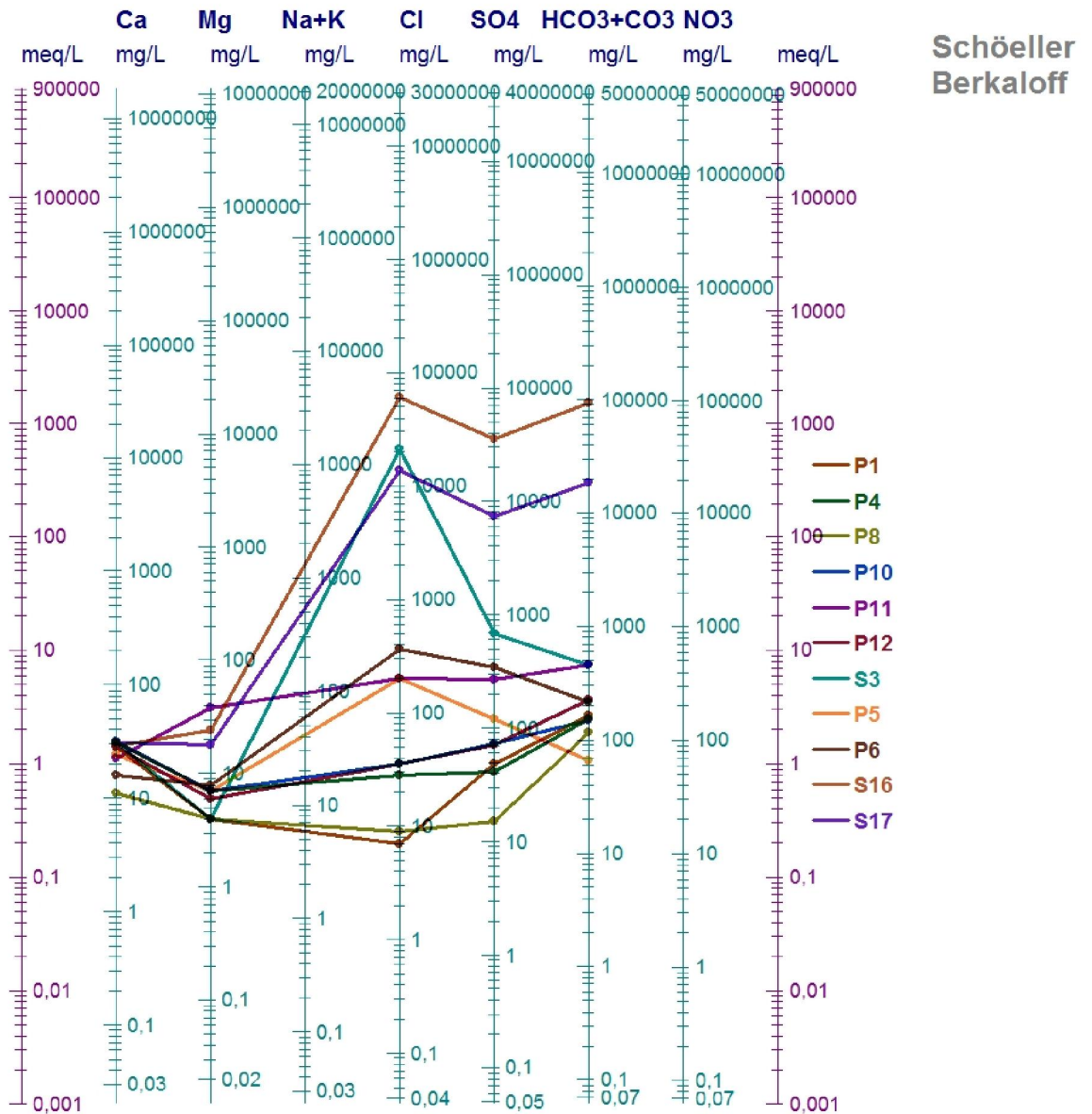


Figure 14 : Classification des eaux selon le diagramme de Schöeller-Berkaloff

IV.2.2.7. Carte de faciès chimique et interprétation

Elle permet de mettre en évidence la répartition d'un faciès chimique global d'une zone d'étude. Ainsi, pour notre secteur, on a :

- P2, P7, P8, P10, P13, P15 et P19 : faible minéralisation ;
- P1, P4, P5, P6, P9, P11, P12, P14, P20 et P21 : moyennement minéralisée ;
- S3, S16, S17 et S18 : hyper-minéralisée. (Fig.15)

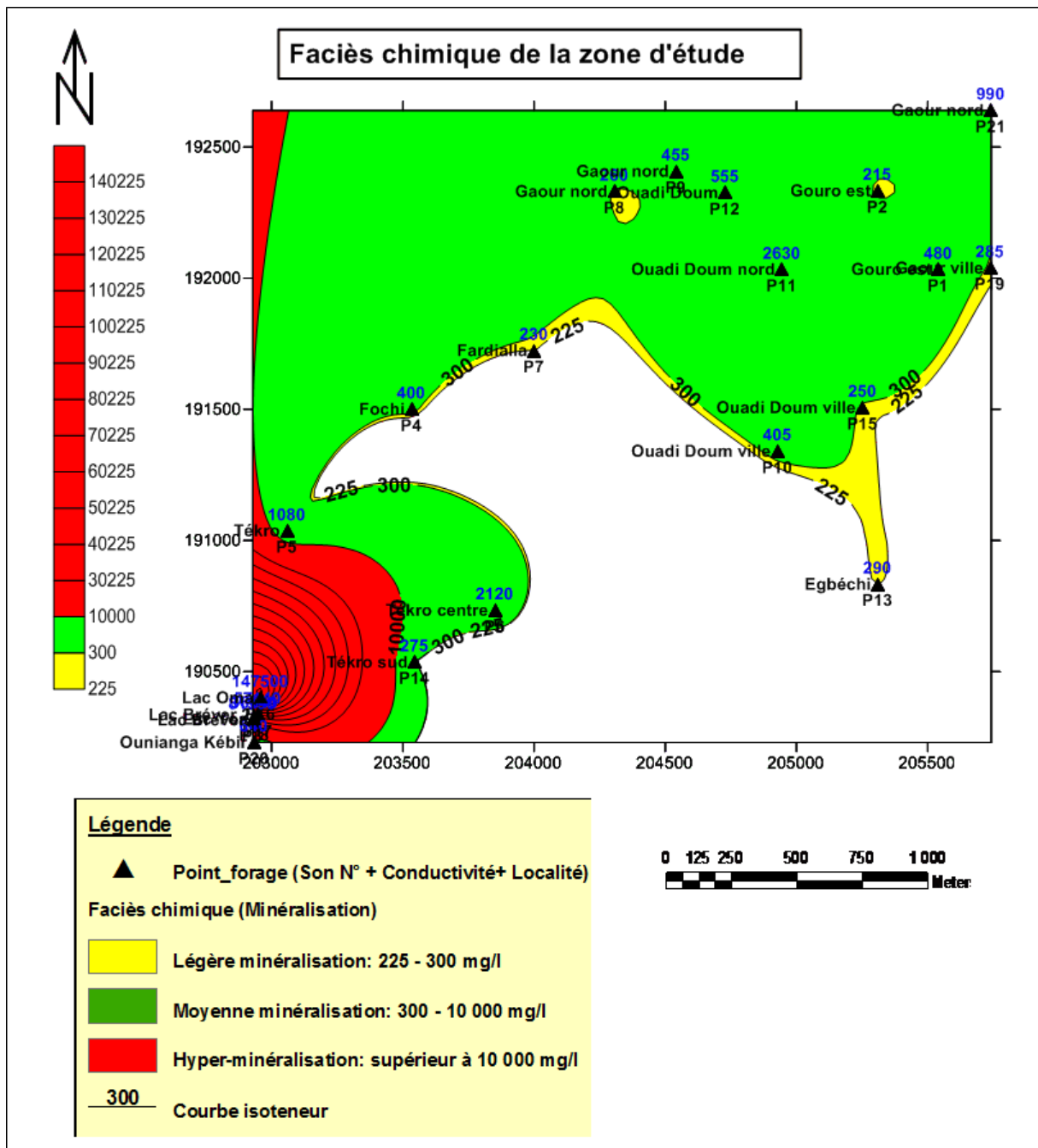


Figure 15 : Carte de faciès chimique

IV.2.3. Etude des rapports caractéristiques

L'étude des rapports caractéristiques permet de préciser le milieu de provenance des eaux et souterraines et comparer leur concentration en éléments chimiques. L'étude concerne les rapports suivants : $r(\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+})$, $r(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$, $r(\text{Na}^+/\text{Cl}^-)$.

Les résultats obtenus sont résumés au tableau ci-après :

Tableau n°14 : Valeurs des rapports caractéristiques

Points d'eau	r (Mg ²⁺ /Ca ²⁺)	r (SO ₄ ²⁻ /Cl ⁻)	r (Na ⁺ /Cl ⁻)
P1	0,23	5,26	8,89
P2	0,36	1,93	5,86
S3	0,21	0,02	1,84
P4	0,37	1,09	2,05
P5	0,48	0,45	1,05
P6	0,82	0,70	2,20
P7	0,38	0,10	1,64
P8	0,59	1,24	4,52
P9	0,00	2,30	4,58
P10	0,36	1,50	2,11
P11	2,74	0,99	3,98
P12	0,35	1,46	3,14
P13	0,69	1,04	3,86
P14	0,32	4,43	7,43
P15	2,41	0,73	4,91
S16	1,37	0,42	23,74
S17	0,96	0,39	2,11
S18	1,06	1,20	3,07
P19	0,40	2,08	3,00
P20	0,80	0,50	4,86
P21	0,92	2,61	4,97

- **Le rapport r (Mg²⁺/Ca²⁺)**

La majorité des points d'eau présentent des valeurs positives, ce qui démontre la prédominance des ions calcium par rapport aux ions magnésium. C'est la précipitation des bicarbonatées au niveau des lacs qui explique cette prédominance du calcium et aussi la zonalité géologique.

- **Le rapport r (Cl⁻ /SO₄²⁻)**

Pour l'ensemble des points d'eau, nous avons des rapports positifs, d'où la domination des chlorures sur les sulfates. Les chlorures évoluent rapidement avec la nature des terrains traversés par les eaux souterraines, l'évaporation et la stagnation des eaux dans le secteur de faible pente.

- **Le rapport r (Na^+/Cl^-)**

Les valeurs du rapport des points d'eau sont tous positifs, c'est qui explique la dominance des ions sodium sur les chlorures. Ceci peut être expliqué par la présence d'évaporites dans la région.

V. Conclusion

L'étude hydrogéologique entrepris dans la région d'étude a permis de mettre en évidence l'existence trois (3) importants aquifères, il s'agit de :

- L'aquifère du crétacé inférieur : constitué par des grès carbonatés, ce dernier est capté par plusieurs ouvrages (puits) ;
- Celui du jurassique, un réservoir très important et qui est resté inexploitable. Il composé essentiellement par des grès roses, situé à de profondeur très variée allant de un (01) mètre jusqu'à 300m au Tchad.
- En fin, celui du trias, qui affleure à Soeka, constitué par des grès grossiers.

La carte piézométrique établie ci-haute, indique que le sens d'écoulement majeur des eaux des aquifères de la région qui va du nord-est au sud-ouest. En fin, une petite note pour l'hydrodynamique du système aquifère à été noté.

Du point de vue hydrochimique, cette étude a permis d'aboutir aux déductions suivantes :

Les valeurs des PH sont les pluparts homogènes et proche de la neutralité, excepté les eaux très basiques des lacs.

Les conductivités mesurées au niveau des différents points d'eau de notre zone d'études sont toutes supérieures à **200 $\mu\text{S}/\text{cm}$** . La minéralisation des eaux du secteur est caractérisée par le calcium, le sodium, les bicarbonates et les chlorures. Les minéralisations les plus faibles ont été relevées à l'amont du secteur d'étude.

Les valeurs de TH calculées de l'ensemble des points d'eau échantillonnés, montrent ainsi que l'ensemble des eaux sont douce. L'interprétation confirme les faciès et sous-faciès (sous-faciès sulfaté sodique, sous-faciès sulfaté magnésien, sous-faciès chloruré calcique, sous-faciès chloruré sodique, sous-faciès chloruré magnésien, sous-faciès bicarbonaté magnésien, sous-faciès bicarbonaté calcique) prédéterminés par la dominance des chlorures et du sodium observé d'où l'appartenance des eaux à la famille **chlorurée sodique**. Quant au deuxième type de faciès **bicarbonaté sodique** et parfois **calcique**.

Du point de vue potabilité, les résultats issus de cette étude confèrent à ces eaux un caractère potable et non-potable, car certaines eaux, possèdent une qualité mauvaise à médiocre pour pouvoir être consommées à l'état brute. Par conséquent, elles doivent subir un traitement physico-chimique afin d'être consommables.

Conclusion générale et recommandations

Conclusion générale et recommandations

Notre travail consacré à l'étude hydrogéologique de la zone des Erdis, nous a permis d'aboutir aux déductions suivantes :

Dans une première étape, nous avons consacré notre étude à une synthèse des travaux antérieurs climatiques et géologiques. Par la suite, nous avons complété le travail par une contribution axée sur l'étude hydrogéologique de la zone des Erdis.

Climatiquement, il faut noter que notre zone d'étude jouit d'un climat continental hyperaride. Le secteur présente une précipitation moyenne annuelle de **52mm** avec une valeur de température moyenne mensuelle de **18°C**. La région est caractérisée par un bref épisode pluvieux (août) et une longue saison sèche (septembre au juillet).

Sur le plan géologique, les grès de Nubie sont d'âge mésozoïque, composés d'alternances de grès et d'argiles, avec niveaux ferrugineux (Mn). Le plateau des Erdis est formé par un terrain récent qui est constitué par des sables éoliens et diatomitiques. Cette zone comprend des terrains d'âge secondaires, paléogène et quaternaire mettant en évidence une structure de deux ensembles : Un substratum (argiles) et une couverture post-nappe du paléogène-quaternaire (argiles, diatomites et sels).

L'étude structurale et tectonique, déduit nettement l'absence d'un accident géologique.

Sur le plan hydrogéologique, trois réservoirs principaux sont identifiés :

- L'aquifère du crétacé inférieur : constitué par des grès carbonatés, ce dernier est capté par plusieurs ouvrages (puits) ;
- Celui du jurassique, un réservoir très important et qui est resté inexploitable. Il composé essentiellement par des grès roses, situé à de profondeur très variée allant de un (01) mètre jusqu'à 300m au Tchad.
- En fin, celui du trias, constitué par des grès grossiers.

L'écoulement général se fait du nord-est vers le sud-ouest avec une surface piézométrique caractérisant une nappe plate, un peu linéaire.

Les valeurs calculées de la transmissivité sont de l'ordre de $2,9$ à $3,5 \cdot 10^{-3}$ m²/s et le coefficient d'emmagasinement estimé à $5 \cdot 10^{-4}$ avec un gradient hydraulique local de 0,3%.

Pour la recharge, l'alimentation de cet aquifère par les eaux de pluie est négligeable, de l'ordre de 2,9 mm/an à Tazebo (Lybie) à 1,3 mm/an dans la région de Kufrah et aux Erdis ; ces nappes sont donc l'héritage liquide d'un climat disparu (pléistocène).

L'ensemble des eaux échantillonnées suite à l'étude hydrochimique ont un pH compris entre **6,1 et 11,6**. Les valeurs de pH sont la plupart homogènes et proches de la neutralité, excepté ceux des lacs, qui sont basiques. Les conductivités mesurées au niveau des différents points d'eau de notre zone varient à la fourchette de **215 à 147500mg/l**. Les conductivités élevées témoignent la forte minéralisation de certaines eaux caractérisées par le calcium, le sodium, les bicarbonates et les chlorures.

Après le report des valeurs des analyses le diagramme, l'interprétation confirme les faciès et sous-faciès prédéterminés par la dominance des **chlorures** et du **sodium** observé d'où l'appartenance des eaux à la famille **chlorurée sodique (NaCl)**. Ce faciès chimique s'explique par une forte évaporation au niveau des différents lacs. Les eaux des lacs précipitent sels gemmes qui, sont déposés aux embouchures des lacs et donnent un goût salifère aux eaux de la région. Quant au deuxième type de faciès **bicarbonaté sodique (NaCO₃)**, il pourrait être engendré par la dominance des sodes (natron), qui est souvent présents dans la zone d'étude. La chimie de ces eaux est tributaire à la **zonalité géologique**.

A cet effet, quelques solutions peuvent être recommandées afin de respecter l'exploitation durablement et la protection, portant atteinte à cette ressource immense. Parmi ces recommandations, on peut citer :

Les aquifères continus représentent presque trois quarts de la superficie totale du Tchad, ils sont répartis dans les trois zones géoclimatiques, mais sont principalement rencontrés au nord (bassin des Erdis), à l'ouest et au sud du Tchad.

- Renforcement des études, projets scientifiques pour la reconnaissance de l'aquifère nubien et une bonne volonté de la part de l'Etat tchadien ;
- Un suivi régulier des niveaux piézométriques de la nappe, permettant ainsi le niveau de la nappe dans le temps et dans l'espace ;
- Multiplication des forages et des piézomètres de reconnaissance au niveau de la dite nappe ;
- En fin, avoir un comité interétatique pour une gestion durable et équitable entre les Etats membres.

Annexes

N°	rCa	rMg	rNa	r K	rCl	rSO ₄	rHCO ₃
1	1,39	0,32	1,69	0,2	0,19	1	2,67
2	0,89	0,32	0,82	0,12	0,14	0,27	2
3	1,54	0,32	1107,21	62,17	601,15	14,08	7,54
4	1,54	0,57	1,6	0,28	0,78	0,85	2,52
5	1,19	0,57	5,95	1,09	5,66	2,52	1,08
6	0,79	0,65	22,6	0,43	10,25	7,2	3,5
7	0,84	0,32	0,69	0,2	0,42	0,04	0,78
8	0,54	0,32	1,13	0,15	0,25	0,31	1,86
9	0,29	0	4,21	0,025	0,92	2,12	1,13
10	1,59	0,57	2,13	0,17	1,01	1,52	2,45
11	1,14	3,12	22,43	1,89	5,63	5,58	7,52
12	1,39	0,49	3,17	0,2	1,01	1,47	3,67
13	0,59	0,41	1,08	0,2	0,28	0,29	2,06
14	1,29	0,41	1,04	0,17	0,14	0,62	2,32
15	0,34	0,82	1,08	0,61	0,22	0,16	3
16	1,44	1,97	41159,47	221,27	1734,02	735,25	1509,6
17	1,54	1,48	820,56	46,24	388,53	152,14	302,36
18	1,79	1,89	434,04	38,05	141,16	169,5	204,32
19	1,24	0,49	1,08	0,12	0,36	0,75	2,24
20	1,84	1,48	2,43	0,53	0,5	0,25	5,52
21	1,69	1,56	6,26	0,63	1,26	3,29	5,9

Tableau n°12 : Résultats des analyses chimiques des quantités en réaction r (még/l)

Nom	Anions	Cations	P11	$\text{HCO}_3^- > \text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P1	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	P12	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P2	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$	P13	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
S3	$\text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	P14	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$
P4	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	P15	$\text{HCO}_3^- > \text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
P5	$\text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	S16	$\text{rCl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
P6	$\text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	S17	$\text{rCl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
P7	$\text{HCO}_3^- > \text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$	S18	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+} > \text{Ca}^{2+}$
P8	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	P19	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$\text{Ca}^{2+} > (\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Mg}^{2+}$
P9	$\text{SO}_4^{2-} > \text{HCO}_3^- > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	P20	$\text{HCO}_3^- > \text{rCl}^- > \text{SO}_4^{2-}$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$
P10	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$	P21	$\text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-} > \text{rCl}^-$	$(\text{Na}^{2+} + \text{K}^+) > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+}$

Tableau n°13 : Faciès caractéristiques des échantillons prélevés

Points d'eau	r ($\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$)	r ($\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$)	r (Na^+/Cl^-)
P1	0,23	5,26	8,89
P2	0,36	1,93	5,86
S3	0,21	0,02	1,84
P4	0,37	1,09	2,05
P5	0,48	0,45	1,05
P6	0,82	0,70	2,20
P7	0,38	0,10	1,64
P8	0,59	1,24	4,52
P9	0,00	2,30	4,58
P10	0,36	1,50	2,11
P11	2,74	0,99	3,98
P12	0,35	1,46	3,14
P13	0,69	1,04	3,86
P14	0,32	4,43	7,43
P15	2,41	0,73	4,91
S16	1,37	0,42	23,74
S17	0,96	0,39	2,11
S18	1,06	1,20	3,07
P19	0,40	2,08	3,00
P20	0,80	0,50	4,86
P21	0,92	2,61	4,97

Tableau n°14 : Valeurs des rapports caractéristiques

Références bibliographiques

AKOINA M., (2016) : Etude hydrochimique et isotopique des eaux souterraines nubiennes, estimation de la recharge. Mém. Ing. Université de N'Djaména.

EI TAYEB S.M., : Les systèmes aquifères de la région de géneina-adré (confins soudano-tchadiens). Thèse, Doct. Université d'Avignon et des pays de vaucluse.

MAHAMANE M.A., (2020) : Contribution à l'étude hydrogéologique et environnementale de la zone des Hassi (aquifère plio-quadernaire), Oran-est. Mém. Ing. Université d'Oran 2.

Marie L.V., (2016) : ResEau 1, Document Technique N°4 – Echantillonnage et chimie des eaux souterraines. ML. Vogt et al. UNITAR-UNOSAT, Genève, Juin 2016. 41-46p

Marie L.V., (2016) : ResEau 1 - Document Technique N°1 - Conception et méthodes appliquée à l'élaboration des cartes hydrogéologiques au 1:500 000 et 1:200 000 des régions nord et est du Tchad. Yves Haerberlin et al. UNITARUNOSAT, Genève, Avril 2016. 26p

J.L.Schneider et J.P.Wolff (1992) : Carte géologique (1 /1500000) de la république du Tchad, mémoire explicatif.

J.L.Schneider., (édition 2001) : Géologie, archéologie et hydrogéologie du Tchad. 234p

Atlas du Tchad (2013) : Programme de système d'information pour le développement rural et l'aménagement du territoire. 14p

P. Matieu., (1978) : Lexique stratigraphique du post-paléozoïque du Tchad. 10p

J. Marget., (2006) : Ressources en eau et gestion des aquifères transfrontaliers de l'Afrique du nord et du sahel. 29-30p

A. Taithe et F. Galland., (2013) : Les aquifères transfrontaliers : caractérisation des tensions et coopérations.

Sources des données : Agence Météorologique du Tchad, Direction des Ressources en Eau, Centre de Documentation et d'Information Géographique et Centre National pour la Recherche Archéologique.