

Promotion
2009

République algérienne démocratique et populaire

*Ministère de l'enseignement supérieur et de la
recherche scientifique*

Ecole Nationale Supérieure Polytechnique d'Alger

Département d'Hydraulique



*Mémoire de projet de fin d'études
d'ingénieur d'état*

Thème

**Etude de la vulnérabilité de
l'aquifère alluvionnaire de la
vallée du M'Zab**

Présenté par :

Mr. MELLAK Dris

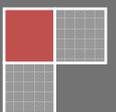
Dirigé par :

Mr LABADI MA C.A UMKB

Mr SIOUSSIOU Ingénieur

Dr S.BENMAMAR MC ENSP

Juin 2009



REMERCIEMENTS

Je tiens à remercier une personne d'une grandeur d'âme exceptionnelle qui a toujours été là ces deux dernières années quand il le fallait, pour ses encouragements, sa volonté communicative et son désir de toujours faire mieux, pour sa grande générosité humaine, Le Dr Saadia Benmamar, merci.

Merci à Rostom Sioussiou pour son hospitalité à Ghardaïa et tous les efforts auxquels il a consenti pour l'aboutissement de ce projet.

Merci à Labadi Abdallah de l'université de Biskra pour tout le temps qu'il m'a consacré, ses efforts et ses judicieux conseils.

Je tiens aussi à remercier l'ensemble des personnes qui, à Ghardaïa, ont permis par leurs efforts, le temps qu'ils m'ont consacré et les moyens matériels qu'ils ont mis à ma disposition la réalisation de ce travail et je pense particulièrement à M. Benkih Kacem pour ses précieux éclaircissements, aux Oumanas particulièrement à "Cheikh Enkhel" et "Moussa Ouaman" .

Je voudrais aussi remercier le laboratoire des sciences de l'eau de l'école nationale supérieure polytechnique d'Alger et M. Benziada en particulier qui a mis à ma disposition tous les moyens matériels dont il disposait pour que je puisse réaliser ce travail dans les meilleures conditions possibles.

Merci à l'ensemble des enseignants que j'ai eu la chance de connaître durant mes études.

Pour finir, je remercie mes camarades et amis de l'école polytechnique en général et du département d'hydraulique en particulier pour tous les bons moments que l'on a passés ensemble et qui resteront à jamais gravés dans ma mémoire, merci à Djazia, Amira, Walid, Djamel, Alex, Mimi, Imène, Fethi, Amirouche, Sofiane, Thanina, Lamia, Hakima, Amina, Yanis, Samir, Rochdi, Khaled...

Merci à tous

DEDICACES

Je dédie ce travail à mes parents, mes très chers et tendres parents qui représentent ce que j'ai de plus cher en ce monde, aucun remerciement ni sentiment de reconnaissance ne sied à la grandeur de vos âmes. Les mots ne me suffisent pas pour vous exprimer tous les sentiments qui me viennent, tout l'amour que j'ai pour vous et en toute simplicité toute la fierté que j'éprouve à être votre fils.

A mon petit frère Anis et ma grande sœur Ania.

A mon grand père Driss MELLAK qui nous a quittés il y a de cela presque six ans et qui je l'espère est fière de moi du lointain qu'habite à présent son âme.

A mes grands parents que j'ai encore la chance d'avoir près de moi, longue vie à tous.

A toute la famille Mellak et Serbouh.

A mon amie Yasmine.

Résumé

L'intérêt de cette étude est d'apporter un ensemble d'éléments, d'outils d'aide à la décision pour une meilleure gestion des ressources hydrique dans la vallée du M'zab. Pour ce faire, nous avons axé notre démarche sur la vulnérabilité de l'aquifère de surface de la vallée du M'zab qui est sujet à de multiples sources de contaminations. Par la suite, nous avons organisé des campagnes de mesure piézométriques d'une part et des paramètres physico-chimiques d'autre part afin de montrer cette vulnérabilité. Enfin nous avons terminé avec des recommandations pratiques qui, à plus ou moins court terme, conduiront à un retour d'une bonne qualité de l'eau dans cet aquifère.

Mots clés : Aquifère ; vallée du M'zab ; vulnérabilité de la nappe; Surfer ; Puits, Analyses physico-chimiques.

Resume

The interest of this study is to provide a set of features, tools for decision support for improved management of water resources in the valley of M'zab. To do this, we have focused our approach on the vulnerability of the aquifer surface M'zab Valley is subject to multiple sources of contamination. Thereafter, we organized piezometric measurement campaigns on the one hand and physicochemical parameters of the other part to show that vulnerability. Finally we conclude with practical recommendations which, more or less short term, lead to a return of good water quality in this aquifer.

Keywords: Aquifer; M'zab Valley; vulnerability of the aquifer; Surfer, Wells, Physico-chemical properties.

ملخص

- إن الهدف من هذه الدراسة هو حمل مجموعة من العناصر و الأدوات المساعدة على اتخاذ القرار من أجل تسيير أمثل للموارد المائية بسهل مزاب و من أجل هذا محورنا خطواتنا على ضعف طبقة المياه الجوفية السطحية لسهل مزاب و التي قابلة للتلوث من جراء عدة مصادر. بعد ذلك قمنا بتنظيم حملات قياس المياه من جهة و الوسائط الفيزيائية والكيميائية من جهة أخرى بهدف إبراز و توضيح هذا الضعف و أخيرا, اختتمنا دراستنا بتوصيات عملية بصورة أو بأخرى على المدى القصير من شأنها أن تؤدي إلى نوعية جيدة للمياه على مستوى طبقة المياه الجوفية.

الكلمات الرئيسية : طبقة المياه الجوفية, وادي مرب, ضعف طبقة المياه الجوفية, آبار, التحليل الفيزيائي والكيميائي.

TABLE DES MATIERES

LISTE DES FIGURES.....	<i>i</i>
LISTE DES TABLEAUX.....	<i>iii</i>
LISTE DES PHOTOS.....	<i>iv</i>
 INTRODUCTION GENERALE.....	 <i>1</i>

CHAPITRE I

ETUDE HYDROCLIMATIQUE

I.1 Introduction.....	<i>2</i>
I.2 Situation hydrologique.....	<i>2</i>
I.3 Les caractéristiques morphométriques du bassin versant.....	<i>4</i>
I.3.1 Indice de pente globale.....	<i>5</i>
I.3.2 Caractéristiques géologiques	<i>8</i>
I.4 Les données climatiques	<i>9</i>
I.4.1 Les précipitations moyennes annuelles.....	<i>9</i>
I.4.2 Les précipitations moyennes mensuelles.....	<i>11</i>
I.4.3 Les températures atmosphériques.....	<i>12</i>
I.5 Les crues	<i>14</i>
I.5.1 Organisation hydraulique de l'Oasis du M'zab	<i>14</i>
I.5.2 Historique des crues.....	<i>15</i>
I.5.3 Répartition saisonnière des crues.....	<i>16</i>
I.6 Conclusion.....	<i>17</i>

CHAPITRE II**IDENTIFICATIONS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES**

II.1 Introduction.....	20
II.2 Stratigraphie et lithologie.....	21
II.2.1 Le Barrémien	21
II.2.2 L'Aptien.....	21
II.2.3 L'Albien	21
II.2.4 Le Cénomaniens.....	21
II.2.4.1 Le Turonien.....	23
II.2.4.2 Le Quaternaire.....	23
II.3 Identification hydrogéologique.....	23
II.3.1 La nappe du CI.....	26
II.3.1.1 Exploitation de la nappe du CI.....	26
II.3.1.2 Débits d'exploitation.....	26
II.3.1.3 La piézométrie.....	27
II.3.2 L'aquifère du Turonien.....	29
II.3.3 L'aquifère alluvionnaire Quaternaire.....	30
II.4 Etat actuel des puits	31
II.5 Profondeur des puits	33
II.6 Relation aquifère alluviale et aquifère turonien	35
II.7 Puits de recharge de la nappe	36
II.8 Conclusion	38

CHAPITRE III

ASPECTS THEORIQUES DE L'HYDROCHIMIE

III.1	Introduction	40
III.2	L'analyse physico-chimique de l'eau	40
III.2.1	Les paramètres physiques.....	40
III.2.1.1	La température.....	40
III.2.1.2	Le PH	40
III.2.1.3	La Conductivité	42
III.2.1.4	Résidu sec	43
III.2.1.5	La turbidité	43
III.2.2	Les paramètres chimiques	44
III.2.2.1	La minéralisation des eaux	44
III.2.2.2	La dureté	44
III.2.2.3	Le calcium (Ca)	45
III.2.2.4	Le magnésium (Mg)	45
III.2.2.5	Le Sodium (Na)	46
III.2.2.6	Le potassium (K)	46
III.2.2.7	Les chlorures (Cl)	46
III.2.2.8	Les Sulfates (SO ₄)	47
III.2.2.9	Les Bicarbonates (HCO ₃)	47
III.2.2.10	Les Nitrates	47
III.3	La représentation de l'analyse de l'eau	48
III.3.1	L'échantillonnage	49
III.3.2	Mesures in situ	50
III.3.3	Eléments d'interprétation	50
III.3.3.1	Le diagramme de Schoeller-Berkaloff	50
III.3.3.2	Le diagramme de PIPER	53
III.3.3.3	Classification des eaux d'irrigation (Diagramme de l' U.S.D.A)	54
III.3.4	Les normes pour l'eau potables	55
III.4	Conclusion	58

CHAPITRE IV

ETUDE HYDROCHIMIQUE

IV.1	Délimitation de la zone d'étude	60
IV.2	But de l'étude	64
IV.3	L'échantillonnage	64
IV.4	Mesures in situ	67
IV.4.1	Description du matériel utilisé	68
IV.4.1.1	pH meter (hach)	68
IV.4.1.2	Conductimètre (hach)	69
IV.4.1.3	Colorimeter (hach)	70
IV.5	Hydrochimie des eaux des forages albiens	71
IV.5.1	Les paramètres physico-chimiques.....	71
IV.5.1.1	Le Ph	71
IV.5.1.2	La température	71
IV.5.2	Classification des eaux	71
IV.5.2.1	Le diagramme de schoeller-berkaloff	72
IV.5.2.2	Le diagramme de piper	73
IV.6	Hydrochimie des eaux de la nappe alluviale	75
IV.6.1	Les paramètres physiques	75
IV.6.1.1	Le pH et la température	75
IV.6.2	Les paramètres chimiques	77
IV.7	Comparaison des eaux Albiennes et alluvionnaires	78
IV.7.1	Le diagramme de Schoeller-Berkaloff	78
IV.7.2	Calcul du SAR de l'Albien.....	79
IV.7.3	Effet de la crue du 1er octobre 2008	80
IV.8	Variations spatiales de la conductivité	81
IV.8.1	Description des résultats	83
IV.8.2	Interprétations des résultats	84
IV.9	Variations spatiales des nitrates	84
IV.9.1	Descriptions des résultats	86
IV.9.2	Interprétations des résultats	86
IV.10	Conclusion et recommandations	87
CONCLUSION GENERALE.....		89
ANNEXES		93

LISTE DES FIGURES

Figure I.1 : Comparaison du nombre de jours de pluie supérieure ou égale à 0,1 mm.....	4
Figure I.2 : Les bassins versants de l'Oued M'zab jusqu'à El Atteuf.....	5
Figure I.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'zab.....	7
Figure I.4 : Les précipitations moyennes annuelles à Ghardaïa	10
Figure I.5 : Comparaison entre la moyenne annuelle des jours de pluie supérieure ou égale à 0,1mm et 5 mm en 24H.....	11
Figure I.6 : Les précipitations moyennes mensuelles à Ghardaïa (période 1971-1995)	12
Figure I.7 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des jours de pluie supérieure ou égale à 0,1 et 5mm.....	13
Figure I.8 : Température atmosphérique moyenne mensuelle à Ghardaïa.....	13
Figure I.9 : Variation de la température atmosphérique moyenne mensuelle à Ghardaïa.....	14
Figure II.1 : Carte géologique de la plate-forme Saharienne	20
Figure II.2 : Logs lithologiques du forage dans la région de Bouchene.....	22
Figure II.2 : Coupe Ouest-Est à travers la dorsale du M'zab.....	23
Figure II.3 : Aquifères du Sahara Algérien.....	25
Figure II.4 : Coupe des aquifères du Sahara Septentrional.....	26
Figure II.5 : Carte piézométrique du Continental Intercalaire (CI) en 2000.....	28
Figure II.6 : Coupe géologique dans la région de Daïa Ben Dahoua.....	29
Figure II.7 : Puits captant l'aquifère Turonien dans le Ksar de Ghardaïa.....	30
Figure II.9 : Cartographie de la zone de mesures piézométriques.....	33
Figure II.10 : Représentation de la surface de la zone de mesure.....	34
Figure II.11 : Représentation de la surface de l'aquifère alluvionnaire de la zone de mesure. (Contraste).....	34
Figure II.12 : Représentation de la surface de l'aquifère alluvionnaire de la zone de mesure (Mailles).....	35
Figure II.13 : Coupe des aquifères alluvionnaire et turonien.....	36
Figure III. 1 : Exemple de diagramme de Schoeller-Berkaloff.....	52

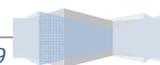
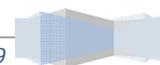
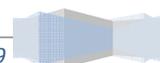


Figure III.2 : Exemple de résultats analytiques sur le diagramme de Piper.....	54
Figure IV.1 : Localisation géographique de la zone d'étude.....	60
Figure IV.2 : Positions géographiques des principaux affluents de l'Oued M'Zab	61
Figure IV.3 : Oued N'TISSA.....	62
Figure IV.4 : Oued TOUZOUZ.....	62
Figure IV.5 : Oued LABIOD.....	63
Figure IV.6 : Oued LAADIRA.....	63
Figure IV.7 : Positions des puits sur l'Oued N'tissa	65
Figure IV.8 : Positions des puits sur l'Oued Laadira.....	66
Figure IV.9 : Positions des puits sur l'Oued Labiod.....	66
Figure IV.10 : Positions des puits sur l'Oued Touzouz.....	67
Figure IV.11 : pH mètre HACH.....	68
Figure IV.12 : Conductimètre mètre HACH.....	69
Figure IV.13 : Colorimètre HACH série DR/800.....	70
Figure IV.14 : Représentation graphique des eaux de l'aquifère Albien sur le diagramme Schoeller-Berkaloff.....	72
Figure IV.15 : Représentation graphique des eaux de l'aquifère Albien sur le diagramme Piper.....	73
Figure IV.16 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de l'Albien et de l'aquifère alluvionnaire.....	78
Figure IV.17 : Variation de paramètres physico-chimiques de l'eau du puits Moussa ou Slimane de Beni-Izgene avant et après la crue d'octobre 2008.....	81
Figure IV.18 : Variation de la conductivité le long de l'oued N'tissa.....	81
Figure IV.19 : Variation de la conductivité le long de l'oued Laadira.....	82
Figure IV.20 : Variation de la conductivité le long de l'oued Labiod.....	82
Figure IV.21 : Variation de la conductivité le long de l'oued Touzouz.....	83
Figure IV.22 : Variation de la concentration des nitrates le long de l'oued Lahdira.....	84
Figure IV.23 : Variation de la concentration des nitrates le long de l'oued Labiod.....	85
Figure IV.24 : Variation de la concentration des nitrates le long de l'oued Touzouz.....	85



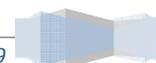
LISTE DES TABLEAUX

Tableau I-1 : Classification des bassins versants d'après l'O.R.S.T.O.M.....	9
Tableau I-2 : Classification géologique et hydrogéologique des bassins versants d'après l' O.R.S.T.O.M.....	10
Tableau II-1 : Exploitation de la nappe du CI à travers la wilaya de Ghardaïa (ANRH)	26
Tableau II-2 : Les puits des cinq villes de l'oued Mzab (Lieutenant Charlet, 1905).....	31
Tableau III-1 : Classification des eaux suivant leur pH	42
Tableau III-2 : normes physico-chimiques d'une eau potable d'après l'OMS.....	43
Tableau III-3 : Classes de turbidité usuelles.....	44
Tableau III-4 : Normes de potabilités de l'O.M.S	56
Tableau III-5 : Normes et recommandations pour l'eau potable aux Etats-Unis et dans l'Union européenne.....	57
Tableau IV-1 : Résultats de la mesure du pH et de la température sur Oued N'tissa.....	75
Tableau IV-2 : Résultats de la mesure du pH et de la température sur Oued Laadira.....	76
Tableau IV-3 : Résultats de la mesure du pH et de la température sur Oued Labiod.....	76
Tableau IV-4 : Résultats de la mesure du pH et de la température sur Oued Touzouz.....	77



LISTE DES PHOTOS

<i>Photo I.1 : Système de partage ancestral.....</i>	<i>15</i>
<i>Photo I.2 : Barrage traditionnel de Beni-Isgene.....</i>	<i>15</i>
<i>Photo I.3 : Chemin d'accès aux jardins de la palmeraie.....</i>	<i>16</i>
<i>Photo I.4 : Tissambad.....</i>	<i>16</i>
<i>Photo II.1 : Puits fonctionnels dans la palmeraie de Ghardaïa</i>	<i>32</i>
<i>Photo II.2 : Puits remblayé dans la palmeraie de Ghardaïa</i>	<i>32</i>
<i>Photo II.3 : Puits capteur d'eau servant à la recharge de la nappe en période de crue.....</i>	<i>37</i>

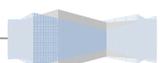


INTRODUCTION GENERALE

La maîtrise de l'eau a, de tout temps, constitué un puissant facteur d'épanouissement des civilisations. De la simple citerne enterrée, instrument vital de la survie familiale en zone aride, au grand barrage s'inscrivant dans une politique nationale de garantie d'approvisionnement au profit du plus grand nombre, le stockage de l'eau a toujours figuré au premier rang des préoccupations.

Une des questions-clefs du XXI^e siècle est bien celle des ressources en eau, de leur gestion rationnelle et du maintien d'une qualité suffisante. Résoudre ce problème est bien la condition du développement durable des pays en développement. Optimiser l'exploitation des systèmes naturels (eau, sols, végétation) sans mettre en cause leur durabilité, constitue une nécessité face à l'accroissement de la production agricole, base du développement économique et social du pays.

L'objectif premier de notre travail s'inscrit dans une problématique de gestion raisonnée des ressources en eau.



CHAPITRE I

ETUDE

HYDROCLIMATIQUE



"Nous ne connaissons
que quelques lettres de
chaque mot, quelque
mots de chaque phrase et
quelques phrases de
chaque page du livre de la
connaissance..."

Charles Darwin



I.1 INTRODUCTION

L'hydrologie des déserts est encore mal connue en raison du faible nombre de données recueillies et de la difficulté de la documentation. Elle souffre de l'aridité, qui est la cause principale, et de la discontinuité des phénomènes, qui en est le corollaire. Dans le désert, les effets de l'arrivée de l'eau sur le sol, qui inaugure le cycle hydrologique et géodynamique aride, dépendent moins de la quantité d'eau tombée que de la manière dont elle tombe et de la qualité lithologique du sol. Une partie importante de cette eau ruisselle : ruissellement diffus inorganisé, en filets ou en nappe, et ruissellement concentré dans un chenal.

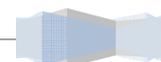
Dans la zone aride, c'est l'irrégularité qui est la règle : le cours d'eau aride est intermittent, l'oued se confond avec la crue, locale ou lointaine. Une autre partie s'évapore, et une autre s'infiltré et vient grossir les réserves d'eau souterraines : sous-écoulements et nappes profondes, présentes dans tous les grands déserts mais d'accès plus ou moins difficile. La présence d'eaux stagnantes est favorisée par les structures tectoniques et par certains effets spécifiques de la géodynamique aride. Il s'agit de plans d'eau élémentaires (flaques, mares), d'épandages inondables (*playas, sebkhas*) et de véritables lacs, salés ou non, à l'hydrologie complexe. Les réseaux hydrographiques anciens, hérités de périodes plus humides, et actuels, intermittents, ont laissé des traces diverses sur le terrain. Aréisme et endoréisme sont les marques directes du climat sur l'hydrographie désertique, et une dégradation générale des réseaux caractérise la plupart des déserts mondiaux : diminution de surface des « bassins ruisselants », réduction du nombre des drains actifs et dégradation des conditions hydrologiques.

I.2 SITUATION HYDROLOGIQUE

De manière assez globale, l'hydrologie peut se définir comme l'étude du cycle de l'eau et l'estimation de ses différents flux. L'hydrologie au sens large regroupe :

- La climatologie, pour la partie aérienne du cycle de l'eau (précipitations, retour à l'atmosphère, transferts...);
- L'hydrologie de surface au sens strict, pour les écoulements à la surface des continents ;
- L'hydrodynamique des milieux non saturés pour les échanges entre les eaux de surface et les eaux souterraines (infiltration, retour à l'atmosphère à partir des nappes...);
- Et l'hydrodynamique souterraine pour les écoulements en milieux saturés.

L'hydrologie de surface est la science qui traite essentiellement des problèmes qualitatifs et quantitatifs des écoulements à la surface des continents. Ces problèmes se ramènent généralement à des prévisions (associer à une date une certaine grandeur) ou des prédéterminations (associer à une grandeur une certaine probabilité) de débits ou de volume en un point ou sur une surface.



Le M'zab est un plateau rocheux dont l'altitude varie entre 300 et 800 mètres. Ce relief, qui date du crétacé supérieur, se présente sous la forme d'une vaste étendue pierreuse et de roches brunes et noirâtres.

Aussi, la pauvreté des données que nous avons sur l'ensemble de la vallée du M'zab conduit à présenter les caractéristiques hydrologiques de la région à titre de comparaison avec celles de stations pluviométriques voisines qui sont celles de Ouargla (160km sud-ouest), de Laghouat (170 km nord nord-ouest), d'El-Goléa (230km), de Touggourt (245 km est nord-est) et d'El Oued (330 km est nord-est).

La figure I.1 montre la similitude des moyennes mensuelles des nombres de jours précipitations d'au moins 0,1 mm/24h obtenues sur les différentes stations citées :

Etant données les similitudes sur les résultats moyens des précipitations des stations de Ouargla et El Goléa, les nombre de jours de pluie sont quasiment identiques à ceux de Ghardaïa sur la période observée par Dubief de 1926 a 1950.

Par conséquent, l'étude de la variabilité du nombre de jours de pluie à Ghardaïa sera basée sur les résultats moyens de Ouargla et El Goléa.

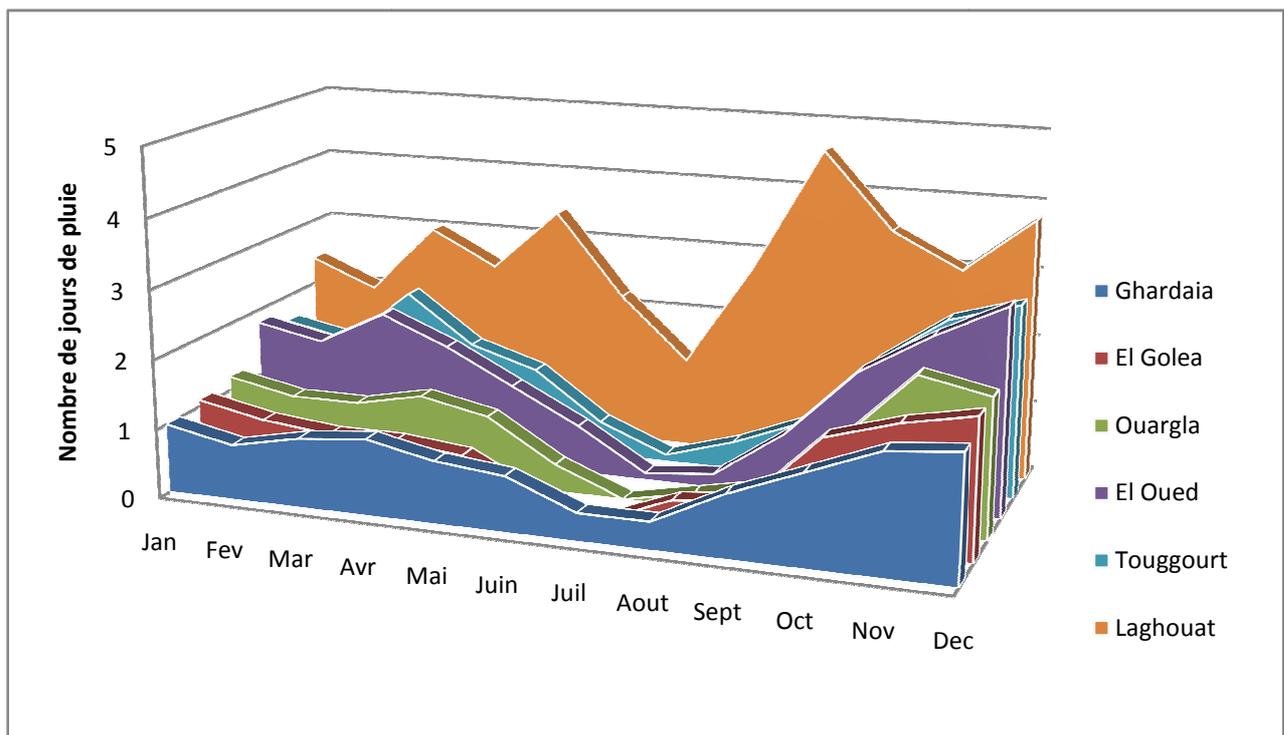


Figure I.1 : Comparaison du nombre de jours de pluie supérieure ou égale à 0,1 mm.

I.3 LES CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DU BASSIN VERSANT

Pour le bassin versant du M'Zab jusqu'à El Atteuf, d'une superficie de 1573 Km², il a été distingué 23 sous-bassins élémentaires pouvant être combinés en de nombreux ensembles dont les grands bassins suivants : L'oued El Abiodh à Dhayet Ben Dhahoua, l'oued Lahdhira à Dhayet Ben Dhahoua, regroupés à leur confluence en l'oued M'Zab à Dhayet Ben Dhahoua, les bassins aux alentours de Ghardaïa depuis Dhayet Ben Dhahoua jusqu'à El Atteuf, et l'ensemble de l'oued M'Zab à El Atteuf.

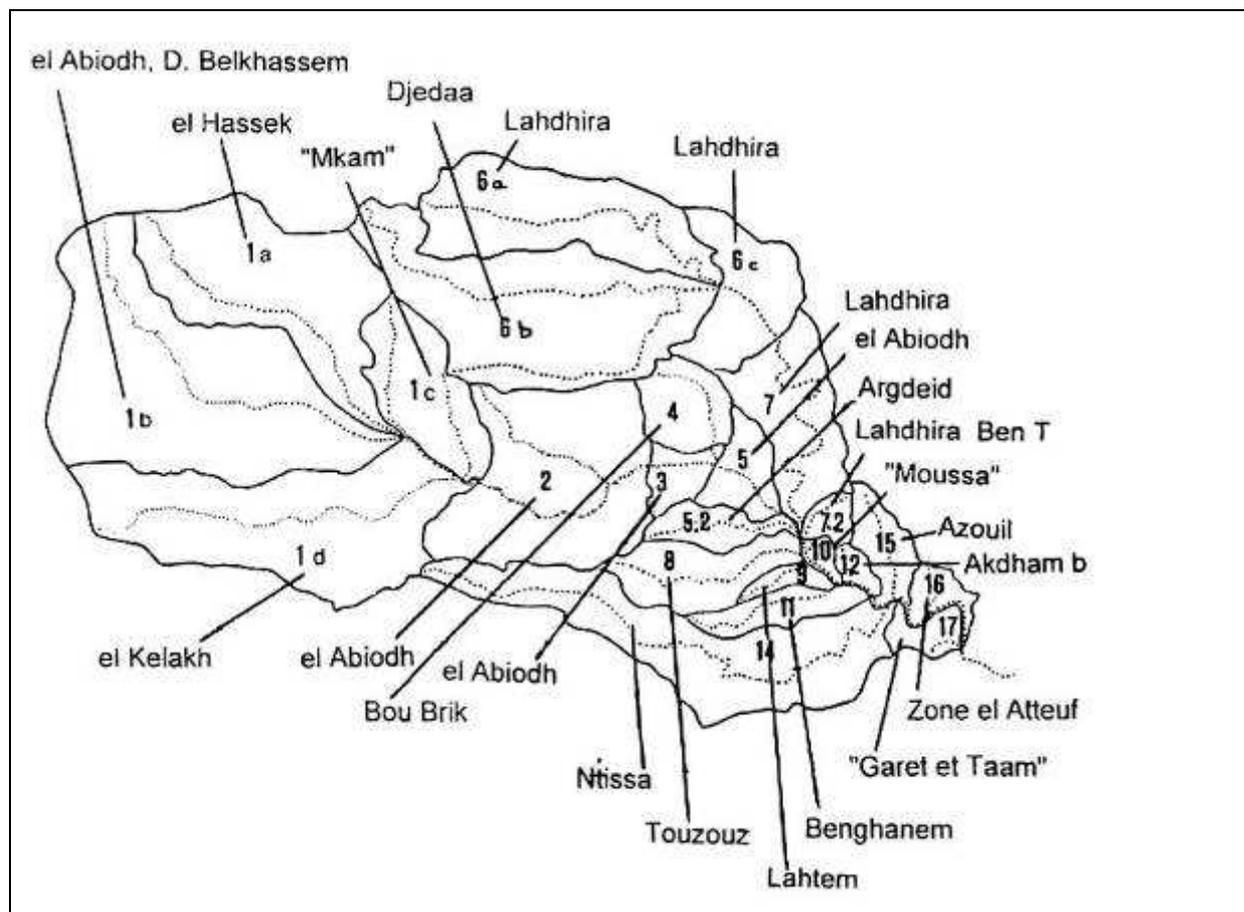


Figure I.2 : Les bassins versants de l'Oued M'zab jusqu'à El Atteuf.



1.3.1. Indice de pente globale I_g

L'indice global de pente est calculé après construction de la courbe hypsométrique du bassin qui donne le pourcentage de la superficie S du bassin versant situé au-dessus d'une altitude donnée H en fonction de cette même altitude. Puisque dans une région de géomorphologie homogène, la pente diminue de l'amont vers l'aval, l'indice I_g diminue lorsque S augmente. Néanmoins, la longueur du rectangle équivalent étant généralement proche de celle du plus long cours d'eau, I_g reste voisin de la pente longitudinale. Si les pentes transversales sont peu différentes de I_g (différence de moins de 20%), ce dernier représente assez bien la pente du bassin.

L'indice globale de pente est donné par :

$$I_g = \frac{D}{L}$$

D : étant la dénivelée $h_{5\%} - h_{95\%}$, définie sur la courbe hypsométrique ou même directement à l'œil sur la carte topographique

L : longueur du rectangle équivalent donnée par :

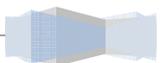
$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \text{ avec, } K_G \geq 1.12$$

A : Aire du bassin versant considéré

P : Périmètre du bassin versant considéré

et K_G : Indice de compacité de Gravelius exprimé par : $K_G = \frac{0.28P}{\sqrt{A}}$

La courbe hypsométrique suivante a été réalisée à l'aide de données morphométriques du bassin versant de l'oued M'zab et de ses principaux affluents.



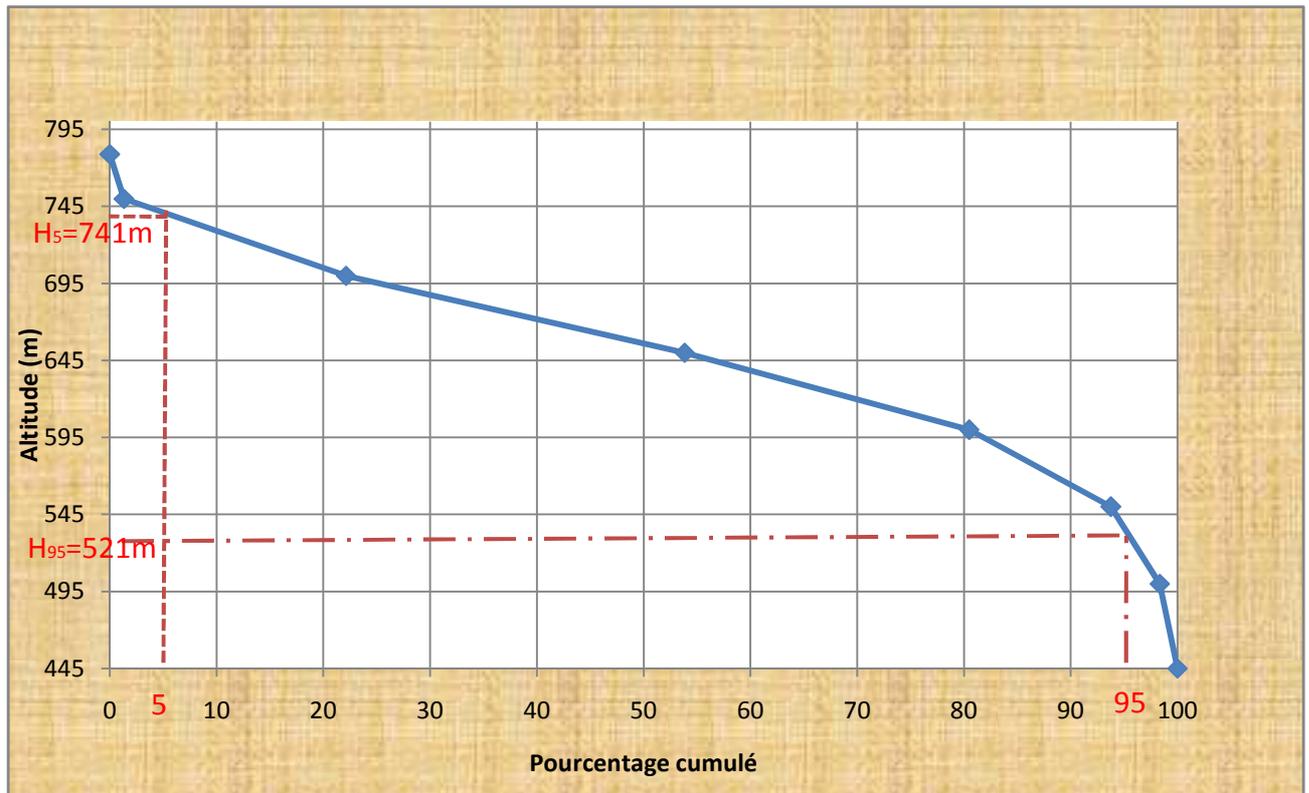


Figure 1.3 : Courbe hypsométrique du bassin versant de l'Oued M'zab

! Il est à noter que les données ayant servi aux calculs précédant proviennent du bureau d'études BG Engineering conseils.

De cette courbe, nous pouvons tirer les informations suivantes :

$$H_{5\%} = 741\text{m}$$

$$H_{95\%} = 521\text{m}$$

avec $H_{5\%}$: Hauteur en dessous de laquelle se trouve 5% de la surface du bassin versant.

et $H_{95\%}$: Hauteur en dessous de laquelle se trouve 95% de la surface du bassin versant.

- Calcul de la dénivelée

La dénivelée est donnée par la formule suivante : $D = H_{5\%} - H_{95\%}$

Application numérique :

$$D = 741 - 521 = 220\text{m}$$

Ce qui nous donne une dénivelée de 220m.



- Calcul de la longueur du rectangle équivalent

La longueur du rectangle équivalent est donnée par la formule suivante :

$$L = \frac{K_G \cdot \sqrt{A}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{K_G} \right)^2} \right] \text{ avec } K_G \geq 1.12$$

A : Aire du Bassin Versant. Pour l'Oued M'zab , A=1573 Km².

P : Périmètre du Bassin Versant. Pour l'Oued M'zab, P=181 Km.

Application numérique :

$$K_G = \frac{0,28.181}{\sqrt{1573}}$$

D'où $K_G = 1,278$

Ainsi,

$$L = \frac{1,278 \cdot \sqrt{1573}}{1.12} \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{1,278} \right)^2} \right]$$

L = 67,05 Km

Ce qui nous permet de déterminer l'indice global de pente I_g : $I_g = \frac{0,22}{60,71}$

Nous obtenons : $I_g = 0,00328$

Rodier et Auvray (1965) fixent la troncature des profils longitudinaux et transversaux à 20% des extrémités amont et aval. Ceci, dans le cas du M'Zab, change peu la valeur de l'indice et pour tenir compte de pentes transversales fortes, supérieures de 30m/km à I_g , un indice de pente corrigé (I_{gc}) est parfois utilisé.

$$I_{gc} = \frac{l \text{ transversale} + I_g}{2}$$

Cet indice, très facile à calculer, est des plus utilisés. Il sert de base à une des classifications O.R.S.T.O.M. (Actuel IRD) pour des bassins versants dont la surface est de l'ordre de 25km².

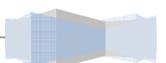


Tableau I-1 : Classification des bassins versants d'après l' O.R.S.T.O.M.

Classe	Description	Ig
R1	Relief très faible	$Ig < 0,002$
R2	Relief faible	$0,002 < Ig < 0,005$
R3	Relief assez faible	$0,005 < Ig < 0,01$
R4	Relief modéré	$0,010 < Ig < 0,02$
R6	Relief assez fort	$0,020 < Ig < 0,05$
R7	Relief fort	$0,050 < Ig < 0,1$

D'après les résultats précédents, le bassin versant de Ghardaïa appartient à la classe R2.

1.3.2 Caractéristiques géologiques

La géologie d'un bassin versant est un facteur très important du régime des cours d'eau qui drainent ce bassin. En période de crue, les volumes écoulés seront d'autant plus grands que le bassin sera plus imperméable. En période de basses eaux, les débits seront d'autant plus forts que les nappes sont plus nombreuses et importantes.

On se contente généralement de caractériser la géologie d'après le comportement hydrogéologique du bassin.

L'O.R.S.T.O.M. (Actuel IRD) a proposé une classification en cinq groupes ainsi définis :

Une étude du **BG Engineering conseils** a montré que le bassin versant de l'Oued M'zab appartient à la classe P2.



Tableau I-2 : Classification géologique et hydrogéologique des bassins versants d'après l'O.R.S.T.O.M.

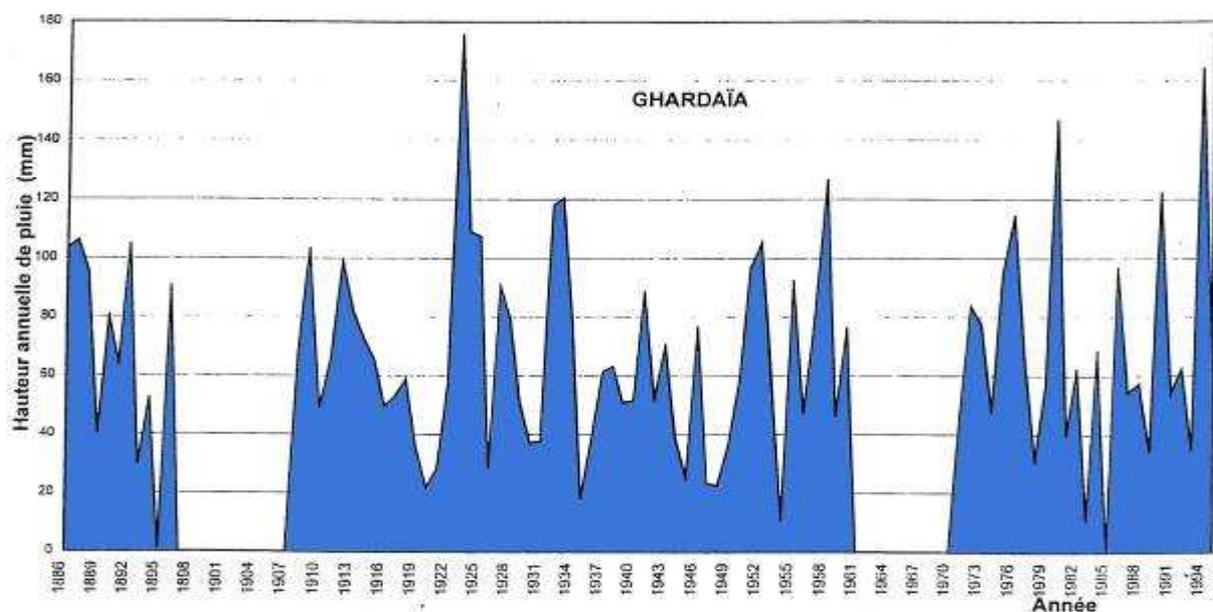
Classe	Intitulé	Exemple
P1	Perméable à aquifère drainant ou non drainé	Formation gréseuse dont les exutoires sont à l'extérieur du bassin
P2	Perméable à aquifère drainé	Formation gréseuse dont les sources alimentent le réseau
P3	Perméabilité moyenne ou faible	Alternance de marnes et de calcaires
P4	Karstique	Formation calcaire, perméabilité de fissures et développement d'un réseau souterrain
P5	Imperméable	Terrain marneux, cristallin, etc.

I.4 LES DONNEES CLIMATIQUES

I.4.1 Les précipitations moyennes annuelles

La variation saisonnière des précipitations, par sa forme en V, se classe dans le type « méditerranéen occidental perturbé » (Dubief, 1963), caractérisé par un maximum en hiver et un minimum en été centré sur juillet et août.

La hauteur moyenne des précipitations atmosphériques, mesurée à GHARDAÏA, est de 67mm seulement. Elles tombent essentiellement sous forme de pluies d'orage à l'automne et au printemps. Certaines années sont à peu près sèches (39 mm en 1944), d'autres exceptionnellement pluvieuses (109 mm en 1951).

**Figure I.4** : Les précipitations moyennes annuelles à Ghardaïa.

Bien que les précipitations sahariennes soient connues pour leur caractère aléatoire, elles n'apparaissent cependant pas de manière anarchique.

Ceci résulte du fait que les lois générales qui régissent la fréquence des pluies dans les régions tempérées s'appliquent aussi au Sahara, selon Dubief.

Aussi, suite aux données recueillies, nous pouvons voir à travers le graphe suivant sur un nombre de pluies données, la proportion de pluies dont la hauteur dépasse 5mm /24h parmi toutes les pluies mesurées.

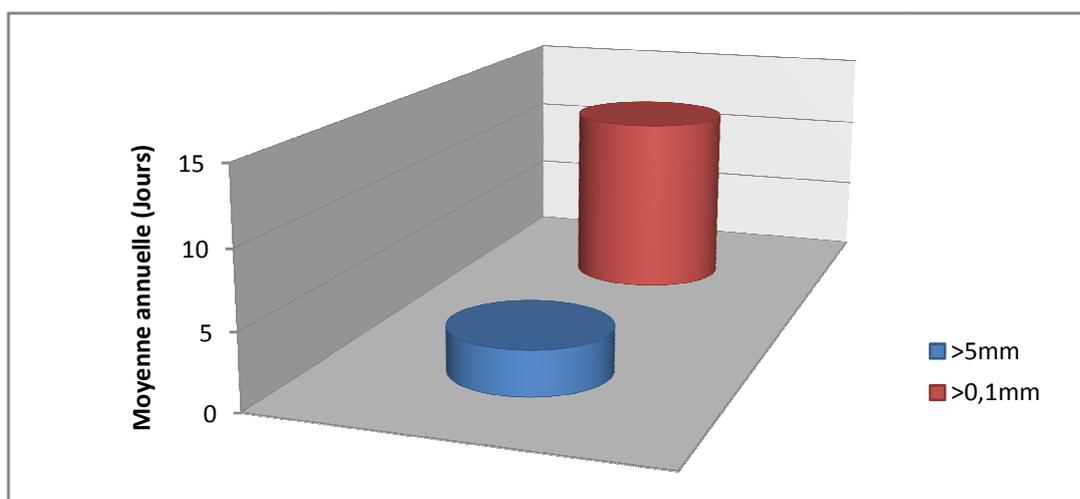


Figure I.5 : Comparaison entre la moyenne annuelle des jours de pluie de hauteur 0,1mm et 5 mm en 24h.

1.4.2 Les précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations moyennes annuelles sont faibles par contre les variations interannuelles sont très fortes. La distribution mensuelle des pluies fait apparaître deux maxima ; l'un correspondant aux pluies d'automne (septembre à novembre), l'autre correspondant au début du printemps (mars, avril). Le caractère orageux des précipitations est très marqué dans la région (en moyenne 12 j/an) et c'est à ce type de précipitation que nous devons les fortes valeurs de la pluviosité du mois de septembre et du printemps. Les mois de juillet et d'août ont une pluviométrie presque nulle.

Les pluies de faible intensité ne jouent pratiquement aucun rôle, et une forte proportion des eaux précipitées est évaporée.

Les précipitations moyennes mensuelles mesurées à Ghardaïa ne dépassent que très rarement la valeur de 10 mm, caractérisant les zones arides avec une longue période sèche et chaude en été et des mois très peu pluvieux en automne, en hiver et au printemps.



Il est à noter l'irrégularité des pluies d'un mois à un autre : les mois pluvieux d'une année ne le sont pas obligatoirement l'année suivante, il arrive même qu'ils soient complètement secs.

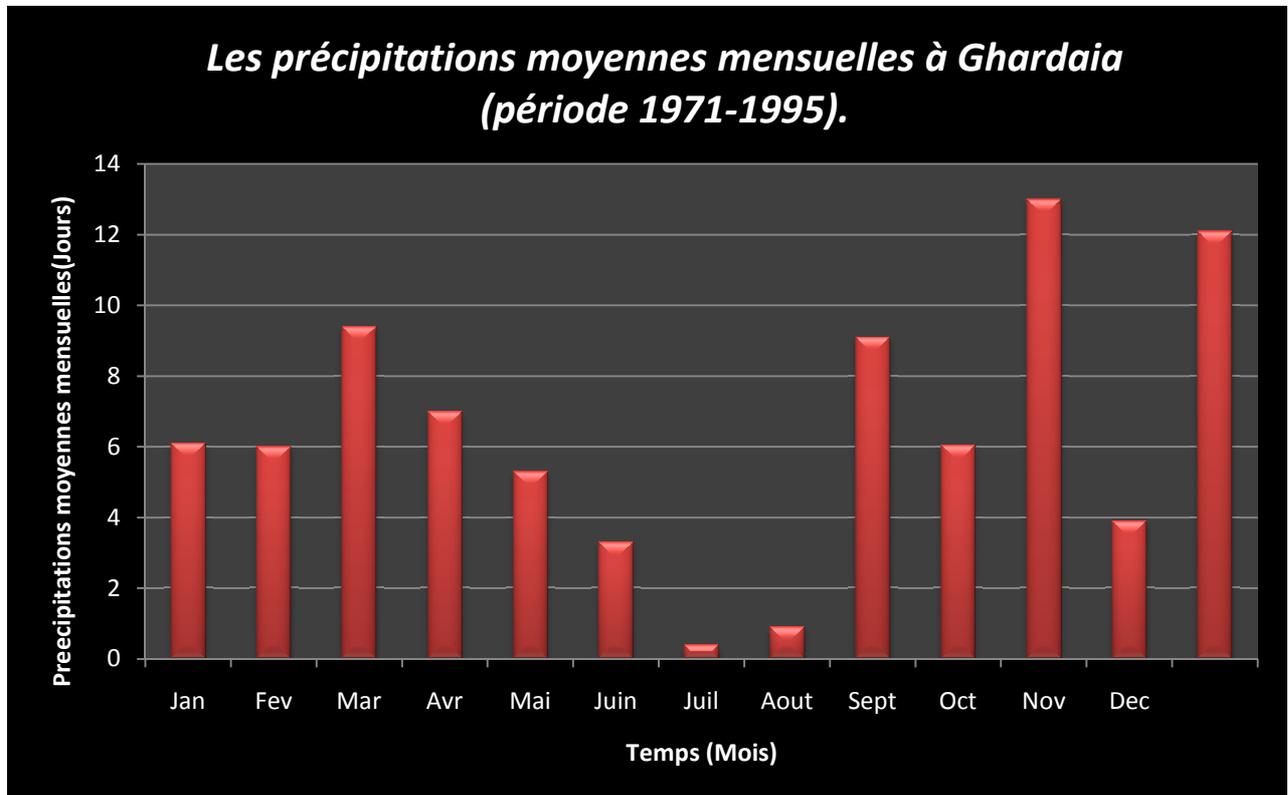
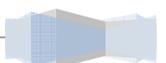


Figure I.6 : Les précipitations moyennes mensuelles à Ghardaïa (période 1971-1995).

La figure I.7 indique pour la période d'observation réalisée par Dubief de 1926 à 1950 les moyennes mensuelles du nombre de jours de pluie supérieure ou égale à 0,1 mm et 5 mm en 24heures.



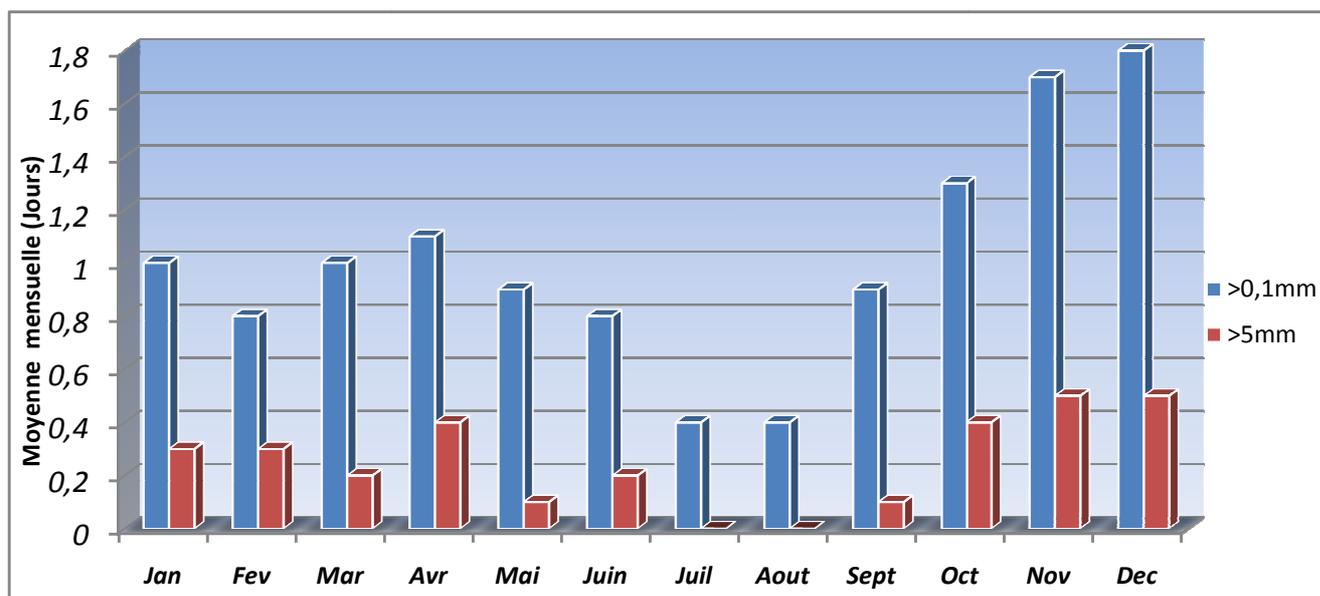


Figure I.7 : Comparaison entre la moyenne mensuelle des jours de pluie supérieure ou égale à 0,1 et 5 mm.

I.4.3 Les températures atmosphériques

Le climat du Sahara, chaud, ensoleillé et aride, est caractéristique de celui d'un désert chaud, situé de part et d'autre d'un tropique.

Les températures diurnes sont très élevées, pouvant dépasser 50°C, et l'amplitude thermique entre le jour et la nuit est souvent très importante.

Les températures mentionnées ci-après, exprimées en degrés Celsius, représentent les moyennes mensuelles observées de 1998 à 2007 (Figure I.8).

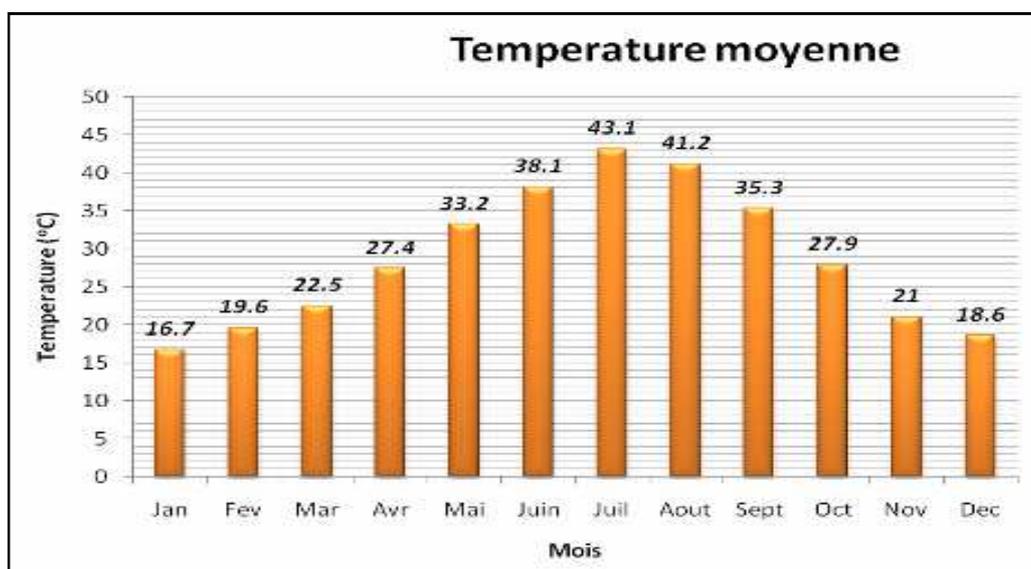
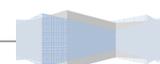


Figure I.8 : Température atmosphérique moyenne mensuelle a Ghardaïa.



Aussi, comme le montre le graphe suivant (Figure I.8), l'amplitude thermique entre le régime diurne et nocturne est relativement importante.

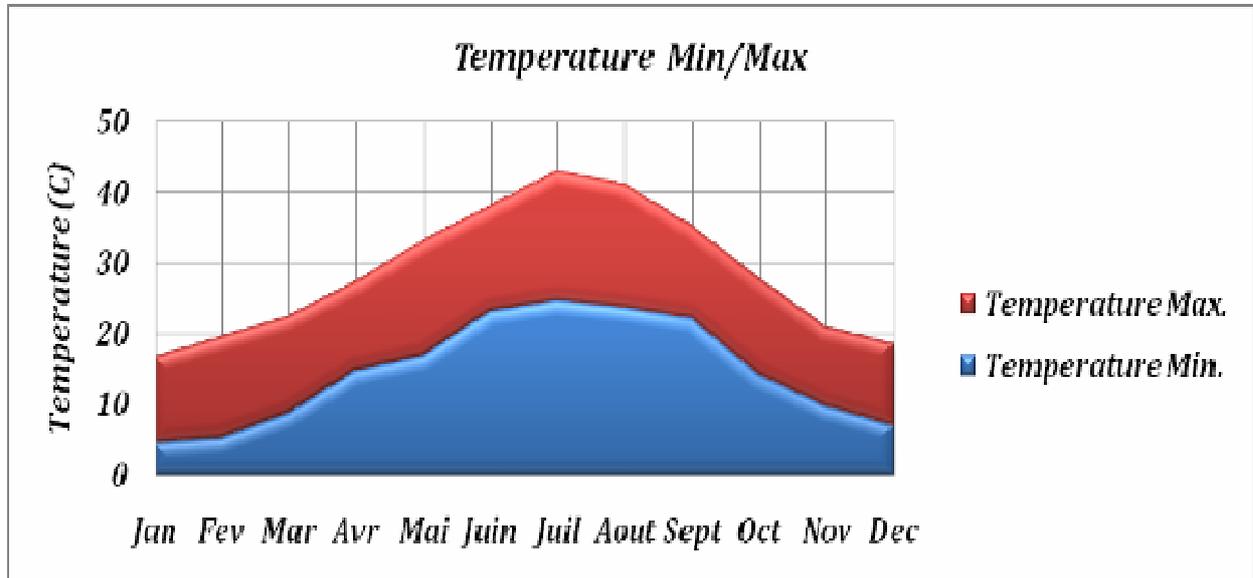


Figure I.9 : Variation de la température atmosphérique moyenne mensuelle à Ghardaïa.

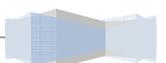
I.5 LES CRUES

Les crues des oueds du M'zab sont rares et espacées. Dans la vallée, les palmeraies les plus prospères sont celles de Ghardaïa, avantagée par sa position en amont des autres oasis, et de Béni-Isguen, qui utilise les eaux de l'oued N'Tissa. L'oasis la moins bien pourvue est incontestablement El-Ateuf, en raison de sa situation en aval. Il faut que la crue soit exceptionnellement puissante pour qu'elle parvienne à El-Ateuf.

I.5.1 Organisation hydraulique des oasis du M'ZAB

Tout est organisé, au M'zab, pour tirer le meilleur parti de l'eau des crues. La complexité des moyens matériels mis en œuvre en vue de l'utilisation de cette ressource aléatoire, la réglementation méticuleuse qui régit sa répartition, sont le meilleur témoignage de l'effort constant et de la savante prévoyance qui président à l'organisation hydraulique de ces oasis.

L'eau des crues est captée et dérivée par un système complexe de barrages et de séguias.



Les barrages sont de deux sortes. Les uns, situés en amont, sont des ouvrages de dérivation dont le rôle est de partager en plusieurs bras le flot de crue et de le diriger vers les séguias qui le conduisent aux jardins à irriguer (photo I.1). Les autres, construits en aval, sont des ouvrages de retenue qui barrent le lit de la rivière pour arrêter l'eau et ainsi, la forcer à s'étaler sur toute la surface des jardins contigus à l'oued, et à s'infiltrer dans le sous-sol pour alimenter les puits (photo I.2). L'eau qui n'est pas employée aux irrigations superficielles, imbibe le sol et enrichit la nappe souterraine qui alimente les puits. Elle est soustraite à l'évaporation et mise en réserve pour l'avenir.

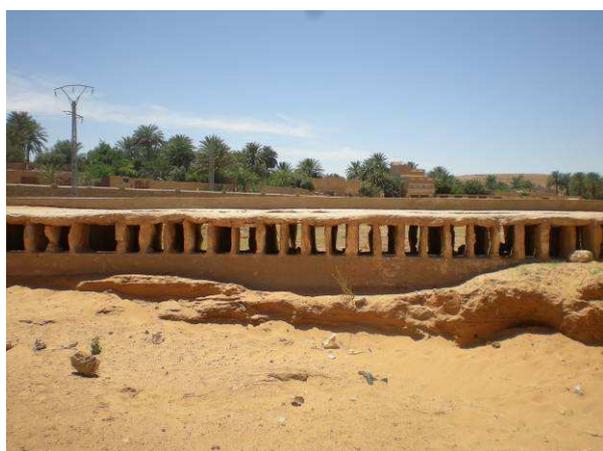


Photo I.1 : Système de partage ancestral.



Photo I.2 : Barrage traditionnel de Beni-Isgene.

Les eaux dérivées par les barrages d'amont sont canalisées dans un réseau spécial de séguias. Chaque barrage alimente une ou plusieurs séguias principales, qui se subdivisent ensuite en séguias secondaires qui se ramifient pour conduire l'eau à chaque jardin. Il convient de noter que ces canaux de distribution qui ne contiennent de l'eau qu'au moment des crues, servent, en temps normal, de chemins d'accès aux jardins (photo I.3). Plus exactement, c'est le chemin lui-même qui est aménagé pour servir de séguia lors des crues. Dans ce but, les murs de clôture des jardins sont construits en pierres dans leur partie inférieure. L'eau pénètre dans chaque jardin par une ouverture appelée "koua", "kana" ou encore « tissambad », soigneusement délimitée par des pierres à arêtes vives et dont les dimensions sont parfaitement déterminées (photo I.4). L'eau est le plus souvent dirigée vers cette ouverture par un petit endiguement qui barre obliquement le chemin.

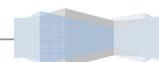




Photo 1.3 : Chemin d'accès aux jardins de la palmerai.

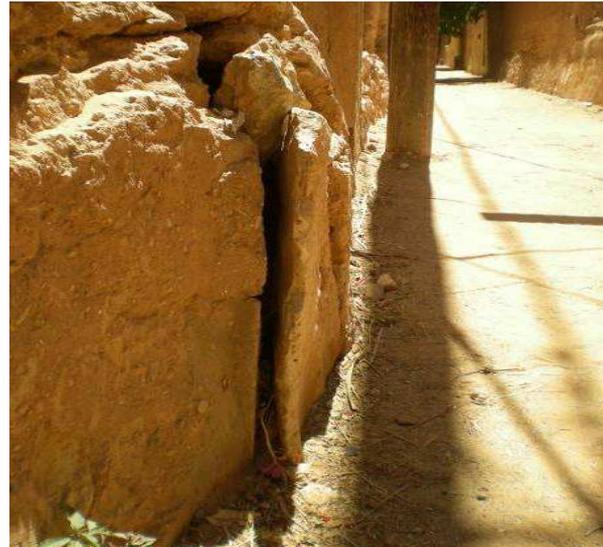


Photo.4 : Tissambad.

La détermination de la dimension des prises d'eau mérite de retenir l'attention. Elle est un exemple de la méticulosité qui préside à la répartition de l'eau chez les mozabites et du souci d'équité qui les inspire.

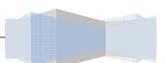
1.5.2 Historique des crues

D'après Matylinski (1885), il est rapporté qu'en 1848, à la suite d'une longue période de «sécheresse» qui aurait duré sept ans, une crue très importante a causé des dégâts importants dans toute la vallée de l'oued M'Zab. Les habitants d'El Atteuf se sont réfugiés dans les mosquées et à Beni-Isguen 300 maisons auraient été détruites.

Les plus anciennes crues notées dans les archives françaises sont celles d'octobre 1884 et du 15 janvier 1886. De 1887 à 1900 il n'y a aucun document. Les observations sont à nouveau notées pour la crue catastrophique du 30 septembre 1901. Les Mozabites l'appelèrent "la rivière qui balaie tout" en raison de sa violence exceptionnelle.

La hauteur d'eau atteignit 10m avant la rupture du barrage. L'inondation dépassa 2 m de hauteur dans la palmeraie. Tous les barrages furent détériorés. L'oued s'écoula à plein bord pendant deux jours et atteignit la Sebket Safioune.

En 1902 et 1903, Charlet (Dubief, 1953) à reporta a trois reprises l'oued en crue, notamment les 17 et 18 septembre 1903. Plus tard, les 18 et 19 février 1906, les oasis d'El Atteuf et de Beni Isguen furent inondées par une crue. D'autres crues furent observées en avril et octobre 1909. Des crues furent ensuite observées les 7 et 8 février 1914, ainsi que le 20 juillet 1915. De l'été 1915 au printemps 1920, on rapporte une longue période de sécheresse, une crue intervenant enfin à cette dernière date.



De 1921 à 1951, 35 crues se sont produites. Ce nombre passe à 25 crues pour la période 1938 à 1951. La fréquence moyenne pour ces deux périodes est ainsi respectivement de 1,1 crue par an et 1,8 crue par an.

De 1980 à ce jour, nous pouvons noter les crues suivantes:

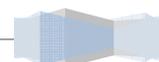
- La crue du 17 novembre 1980 qui fut accompagnée de quatre (04) jours de précipitations, une pluviosité de 98.8mm a été enregistrée.
- La crue du 3 juin 1991 a détruit partiellement la digue d'El Atteuf.
- La crue du 29 et 30 septembre 1994 pendant laquelle 151mm de pluie ont été enregistrés avec un débit de 873 m³/s
- Enfin, la dernière crue enregistrée a ce jour est celle du 1^{er} Octobre 2008 avec un débit estimé a 1100m³/s.

1.5.3 Répartition saisonnière des crues

Les mois de crue sont irrégulièrement espacés. Cette caractéristique est également observée dans les bassins voisins. Ainsi, il peut y avoir plusieurs crues en une année réparties sur différents mois. Par contre, les périodes de sécheresse peuvent s'étendre sur plusieurs années.

La variation de la période de crue au cours de l'année est caractérisée par deux maximums, l'un au printemps (avril), l'autre en automne (septembre). Deux minimums se situent en juillet-août et en janvier.

Les fortes crues connues qui ont atteint le barrage d'El Atteuf sont intervenues en septembre (deux fois), octobre, novembre, janvier, février, mars, mai, juin.

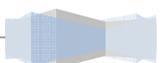


I.6 CONCLUSION

Nous venons de voir que Ghardaïa n'échappe pas au caractère spécifique des précipitations des régions arides. Du fait du caractère aléatoire des précipitations et du manque de données historiques de la région, toute approche hydrologique de la zone s'avère très délicate et doit être réalisée avec beaucoup de minutie.

Aussi, malgré le stress hydrique quasi-permanent qui caractérise le M'zab, des procédés ingénieux ont donné naissance à des réalisations lumineuses qui ont permis à la population locale de capter et de stocker la faible quantité d'eau disponible dans le temps afin de subvenir à leurs besoins.

Ceci étant dit, l'utilisation du sous-sol comme réservoir n'est possible qu'en vu du caractère spécifique de l'aspect géologique de la région que nous verrons plus en détails dans le chapitre suivant.



CHAPITRE II

IDENTIFICATIONS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES

"La valeur d'une chose
réside parfois non
dans ce qu'on gagne en
l'obtenant, mais dans
ce qu'on paye pour
l'acquérir, dans
ce qu'elle coûte..."

*Friedrich Wilhelm
Nietzsche*

CHAPITRE II : IDENTIFICATIONS GEOLOGIQUES ET HYDROGEOLOGIQUES**II.1 INTRODUCTION**

L'Algérie comprend quatre grands domaines du Nord au Sud :

- L'Atlas Tellien (ou le Tell), constitué de reliefs escarpés et de plaines littorales.
- Les haut plateaux ;
- L'Atlas saharien, forme une longue suite de reliefs orientés NE-SO s'étendant de la frontière Marocaine à celle de la Tunisie ;
- La plate-forme saharienne (figure.II.1), qui est un désert formé de grandes étendues de dunes (Erg Oriental et Erg Occidental), de plaines caillouteuses (Regs) et parsemé d'oasis, qui sont autant de centres urbains comme les villes de Ghardaia, El Oued et Djanet.

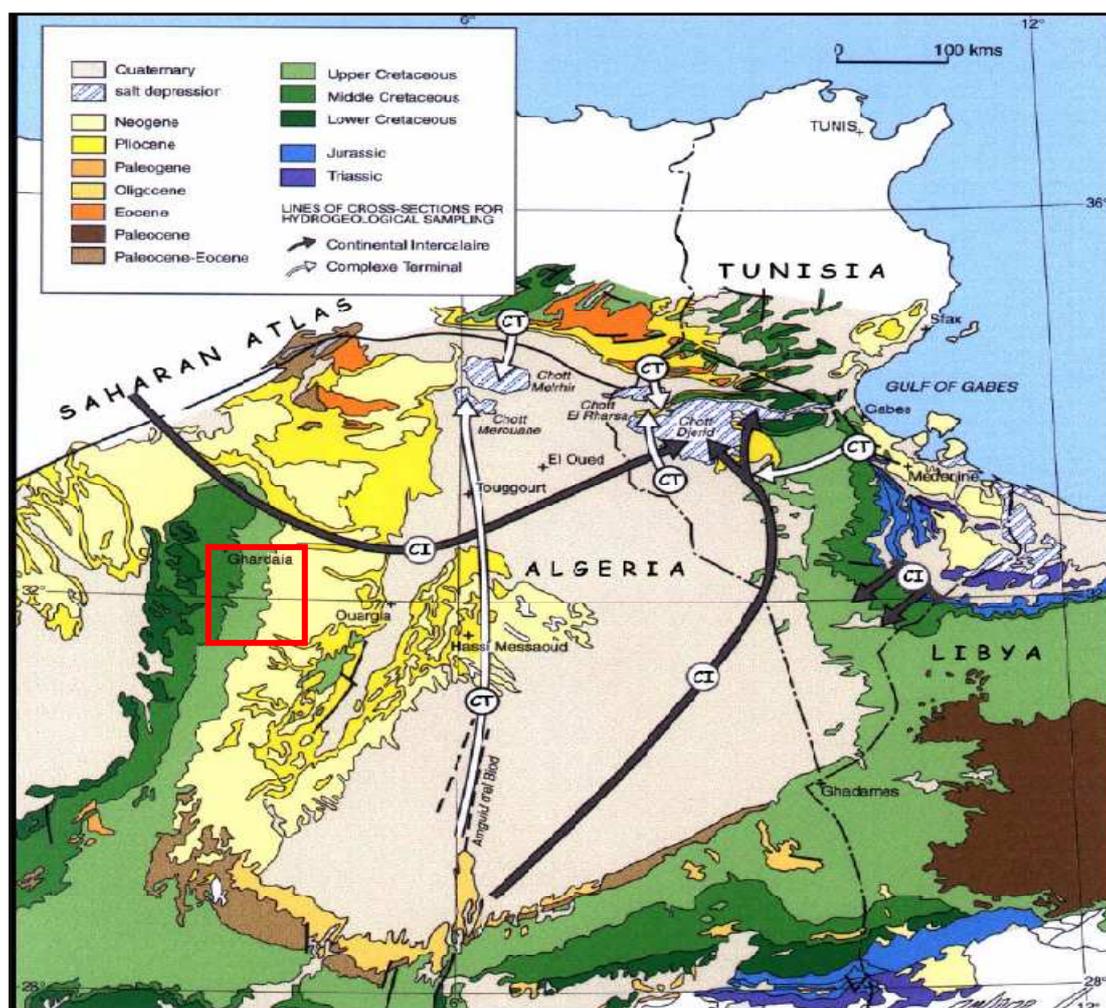


Figure II.1 : Carte géologique de la plate-forme Saharienne.

La dorsale du M'zab correspond à un plateau rocheux de direction Nord - Sud, séparant l'Erg Oriental et l'Erg Occidental. Ce plateau est caractérisé par une vaste étendue pierreuse où affleure une roche nue de couleur brune et noirâtre marqué par la forte érosion fluviale du début du Quaternaire qui a découpé dans sa partie sud des buttes à sommet plat et a façonné des vallées. A l'Est la dorsale plonge sous les immenses dépôts continentaux du Quaternaire.

II.2 STRATIGRAPHIE ET LITHOLOGIE

Devant le manque d'étude détaillée traitant de la géologie de la région, nous avons estimé qu'il serait préférable d'avancer une synthèse regroupant quelques rapports et descriptions des formations stratigraphiques. L'accent a été surtout mis sur les logs de forages dans lesquels on retrouve une description assez détaillée des couches traversées.

La succession stratigraphique peut être synthétisée ainsi :

II.2.1 Le Barrémien

Cet étage est caractérisé par un épandage généralisé des formations détritiques du Crétacé inférieur jusque dans le Bas-Sahara. Ces formations se présentent sous forme de grès fins ou grossiers et d'argiles. Les intercalations carbonatées sont peu nombreuses.

II.1.2 L'Aptien

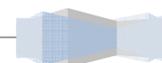
L'Aptien est un bon repère lithologique dans les sondages. Il est représenté dans la grande partie du Bas-Sahara, par 20 à 30 m en moyenne, de dolomies alternant avec des lits d'anhydrite et d'argiles.

II.2.3 L'Albien

Cet étage regroupe la masse des sables et argiles comprise entre la barre aptienne et l'horizon argileux sous-jacent attribué au Cénomaniens.

II.2.4 Le Cénomaniens

Le Cénomaniens est formé par une alternance de bancs d'argile de dolomie, de calcaire dolomitique, et d'évaporites (gypse) avec une nette dominance des argiles et des évaporites. L'épaisseur est de l'ordre de 200 mètres.



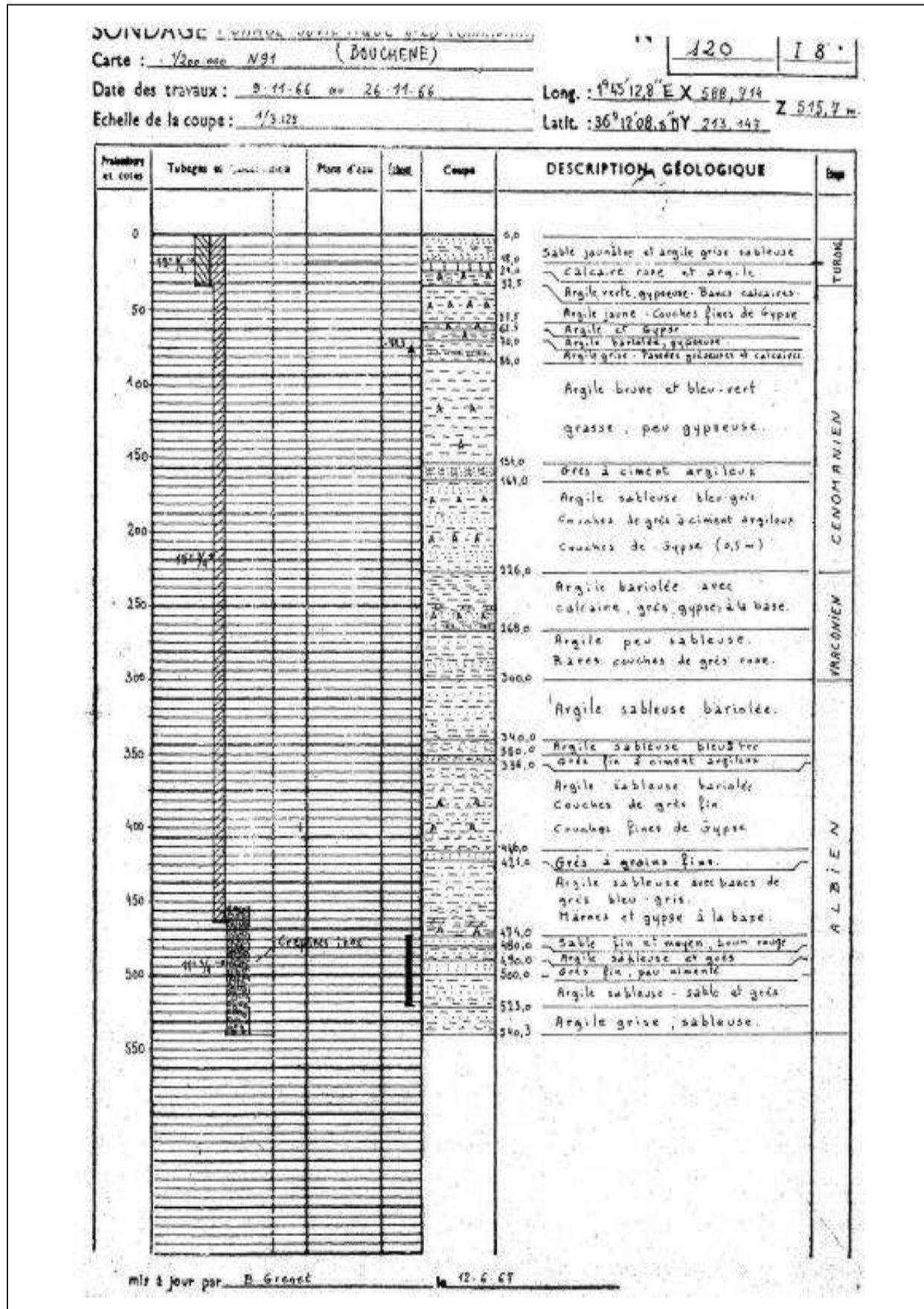


Figure II.2 : Logs lithologiques du forage dans la région de Bouchene.



II.2.4.1 Le Turonien

Les formations carbonatées du Turonien affleurent sur la dorsale du Mzab. Elles plongent vers l'Est sous les dunes de l'erg oriental où elles sont recouvertes par les formations du Mio-Pliocène. Le Turonien peut être calco-marneux, mais il est essentiellement calcaire sur le Mzab (Bel et Cuhe, 1969).

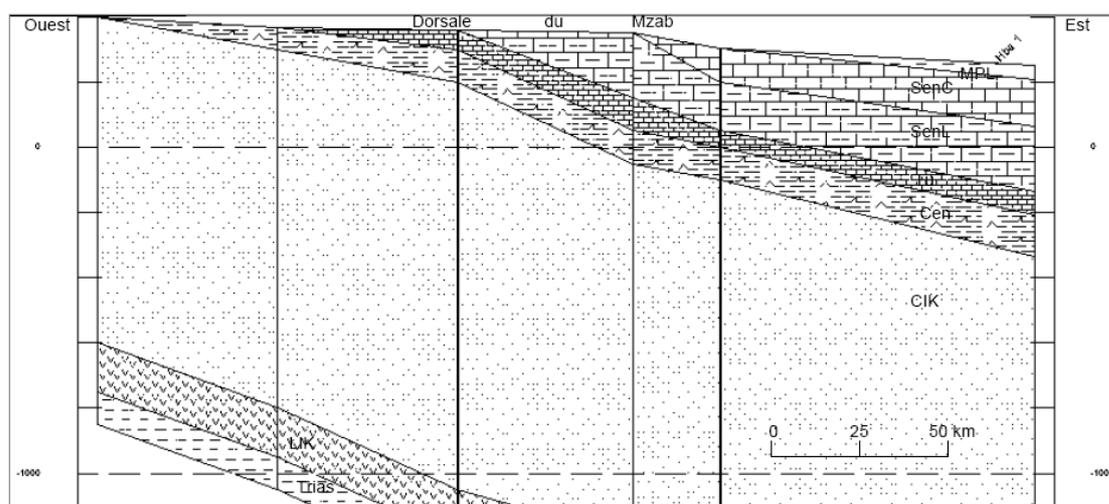


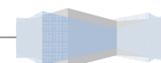
Figure II.2 : Coupe Ouest-Est à travers la dorsale du M'zab.

II.2.4.2 Le Quaternaire

Le quaternaire apparaît surtout sous forme de dépôts alluvionnaires au niveau des lits d'oued et dépressions fermées (Daïas).

II.3 IDENTIFICATION HYDROGEOLOGIQUE

Le Sahara, dans l'imaginaire collectif, ce mot évoque les étendues désertiques et arides. De fait, la région est peu arrosée et très chaude. Résultat, les faibles précipitations - 50 à 100 millimètres en moyenne annuelle - s'évaporent immédiatement. Si l'eau est rare en surface, elle est en revanche présente en profondeur et en quantité.



La région d'étude abrite deux principaux aquifères :

- Celui du Continental Intercalaire (C.I) logé dans les formations de l'Albien jusqu'à la base du Barrémien. L'aquifère est constitué de formations détritiques ; il s'agit de sables, grès, argiles avec un passage dolomitique attribué à l'Aptien, sa puissance dépasse 500m.
- Le Complexe Terminal est, quant à lui, un ensemble assez peu homogène incluant des formations carbonatées du Crétacé supérieur et des épisodes détritiques du Tertiaire, principalement du Miocène (Busson, 1970 ; Fabre, 1976). Il inclut la nappe libre logée dans les alluvions quaternaires des oueds.

L'aquifère albien du Sahara septentrional, qui s'étend sur plus de un million de kilomètres carrés sous l'Algérie, la Tunisie et la Libye, recèle environ 31 000 milliards de mètres cubes d'eau. À titre de comparaison, la nappe souterraine de l'Albien, qui occupe environ 100 000 kilomètres carrés sous le Bassin de Paris, n'en renferme «que» 425 milliards de mètres cubes.

«L'aquifère du Sahara septentrional est un réservoir fossile. Il s'est constitué il y a plus de 10000 ans, lorsque la région était soumise à un climat plus humide» selon Jean Margat. Pendant des dizaines de milliers d'années, les pluies se sont infiltrées dans le sous-sol et accumulées dans différentes couches géologiques. C'est ainsi que se sont formées les deux réserves principales de l'aquifère : le «continental intercalaire», la plus profonde et la plus vaste, et le «complexe terminal» (Figure II.4 et Figure II.5).

L'aquifère Albien

Dans la plate-forme saharienne, la nappe dite albiennaise s'étend sur 600 000 kilomètres carrés dans des grès et des argiles vieux de 100 à 150 millions d'années. Environ 20 000 milliards de mètres cubes d'eau y sont piégés.

Son toit est affleurant à l'Ouest d'El Goléa et s'enfonce progressivement vers l'Est ; 250m à Ghardaia, 600m à Zelfana et Guerrara et plus de 1000m de profondeur à l'Est de Zelfana. L'épaisseur utile peut atteindre 600m.



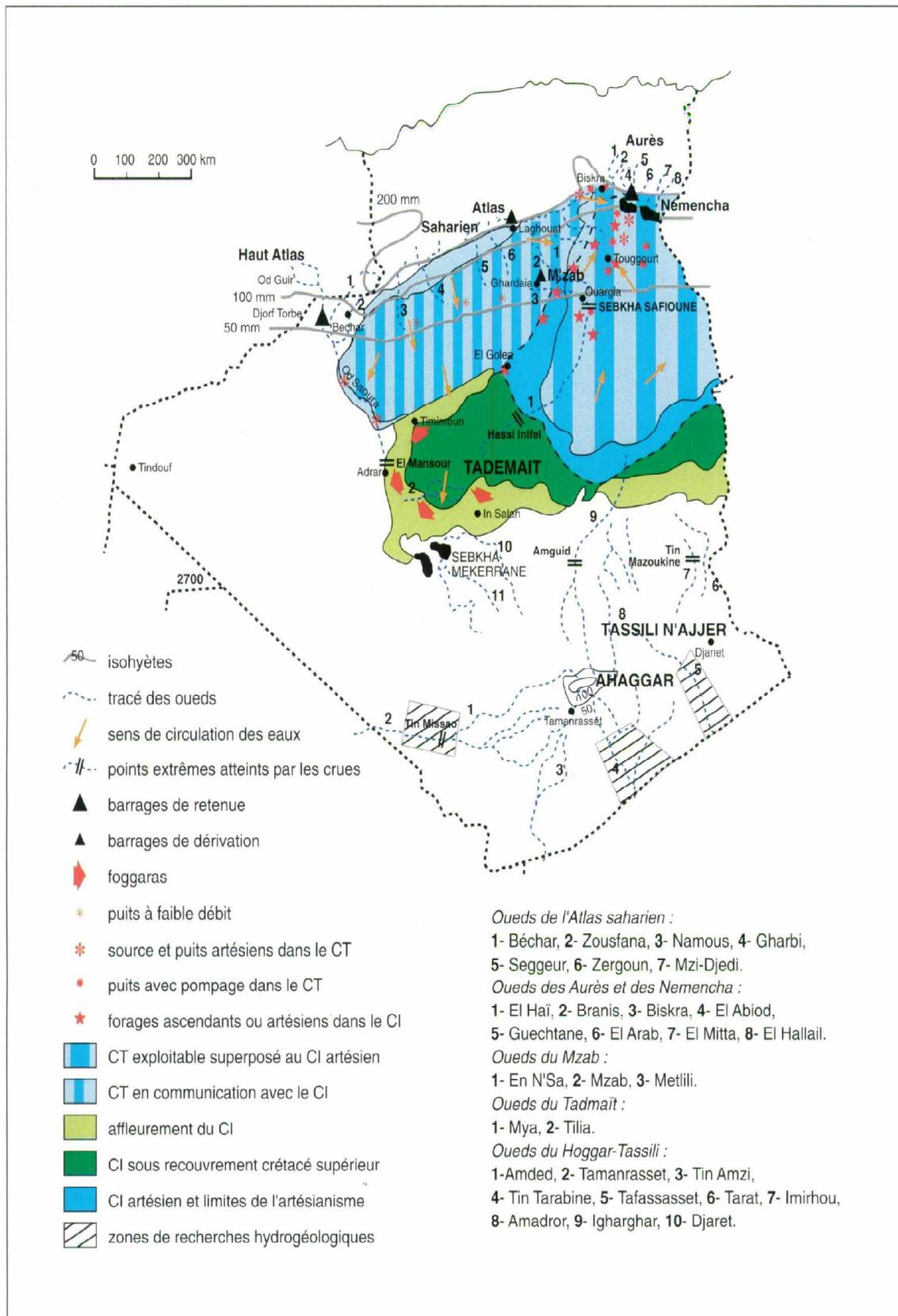
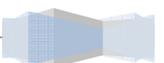


Figure II.3 : Aquifères du Sahara Algérien.



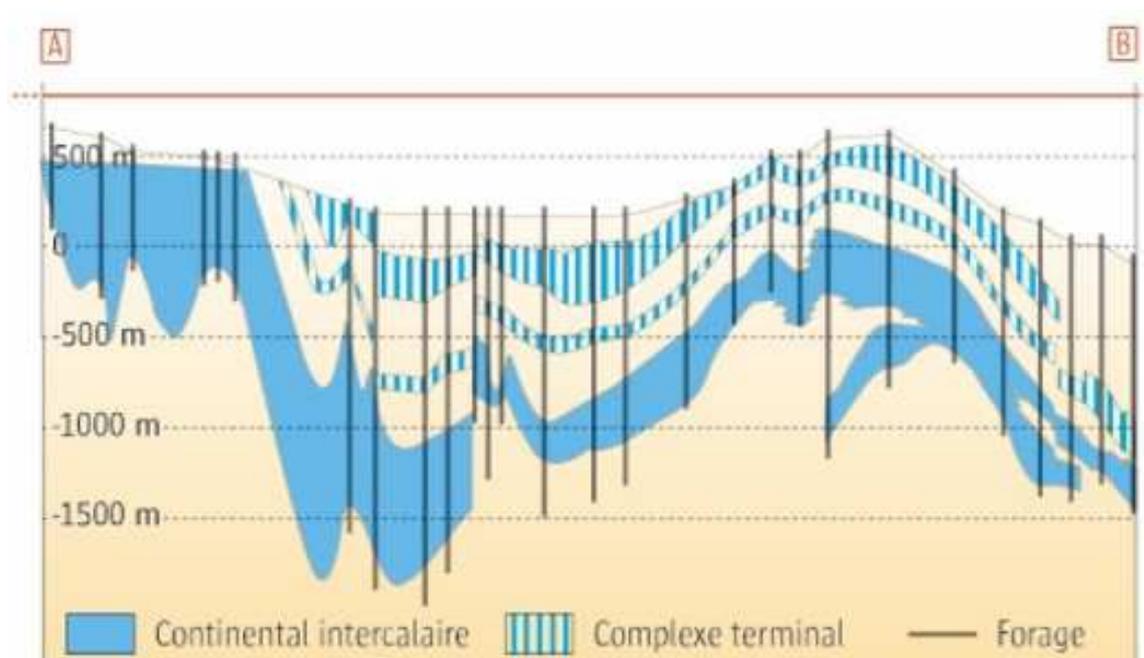


Figure II 4 : Coupe des aquifères du Sahara Septentrional.

II.3.1.1 Exploitation de la nappe du CI

Les premiers forages albiens exécutés au Mzab date de 1948 et 1950. Le jaillissement impressionnant des eaux souterraines révélait l'importance de la nappe contenue dans les grès du Continental intercalaire.

A partir de cette période, le nombre de forage n'a cessé d'augmenter. La wilaya compte actuellement plus de 288 forages, qui se présentent comme suit (ANRH) :

- 75 pour l'AEP,
- 108 pour l'irrigation,
- 5 pour l'AEI,
- 24 à caractère mixte AEP – IRR,
- et 76 forages non exploités pour des raisons diverses (équipement, non électrifiés...).

II.3.1.2 Débits d'exploitation

La nappe du continental intercalaire constitue actuellement la principale source d'approvisionnement en eau dans la wilaya de Ghardaia. Dans les régions de Guerrara, Zelfana, F'hel et El Goléa la nappe est jaillissante, par contre dans les régions situées sur l'axe Berriane - Ghardaia - Sebseb son exploitation se fait par pompage.

Le débit extrait dans la wilaya de Ghardaïa varie de 4 l/s à 80 l/s, le volume annuel est estimé à **179,3Hm³**

Tableau II-1 : Exploitation de la nappe du CI à travers la wilaya de Ghardaïa (ANRH).

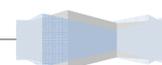
N°	Communes	Nombre de Forage	Forage exploité	Débit d'exploitation (l/s)	Débit moyen (l/s)
01	Daya	11	04	140.5	35.0
02	Ghardaïa	28	19	513.0	27.0
03	Bounoura	13	10	270.0	27.0
04	Atteuf	16	11	331.0	30.0
05	Berriane	15	13	277.0	21.0
06	Guerrara	22	17	940.0	55
07	Metlili	21	19	600.5	32.0
08	Zelfana	13	13	902.0	75.0
09	Mansourah	10	08	228.5	28.0
10	Hassi F'hel	19	19	1059.0	60.0
11	Sebseb	08	07	282.0	40.0
12	El Goléa	112	72	2265.0	31.0
Totaux		288	212	7808.5	/

II.3.1.3 La piézométrie

L'écoulement de la nappe du CI se produit (figure II.6) :

- i) du piedmont de l'Atlas vers les zones des Foggaras au sud ;
- ii) du Tinhert et du Djebel Hassaouna vers le golfe de Syrte ;
- iii) vers l'exutoire tunisien du golfe de Gabès.

La nappe du CI est libre sur les zones d'affleurement, captive sous le M'Zab, le Tademaït, et artésienne dans l'oued Rhir-Souf-Djerid-Fedjej. Les exutoires naturels du CI sont formés par les bordures occidentales et méridionales du Tademaït où se trouvent les foggaras du Gourara, du Touat et du Tidikelt ;



Dans la wilaya de Ghardaia, la piézométrie de la nappe du CI est variable selon les régions. Suivant l'axe Berriane - Ghardaia – Sebseb, le niveau statique se trouve entre 70m et 115m de profondeur. Vers l'Est de cet axe, le niveau statique est moins profond ; il varie entre 18m à Noumerat et 13m à Mansourah-bas.

Plus loin vers l'Ouest (régions Guerrara, Zelfana, F'hel, El Goléa) la nappe du CI est jaillissante.

Il a été constaté dans la région d'El Goléa qu'un certain nombre de forages jaillissants aux débuts de leur exploitation ne le sont plus actuellement. C'est le cas des forages de Foucault (1953), de Beneddine (1962), de Moulkandous (1954). Ceci est dû à l'augmentation des prélèvements par accroissement vertigineux du nombre de forage et au taux de renouvellement très faible de la nappe.

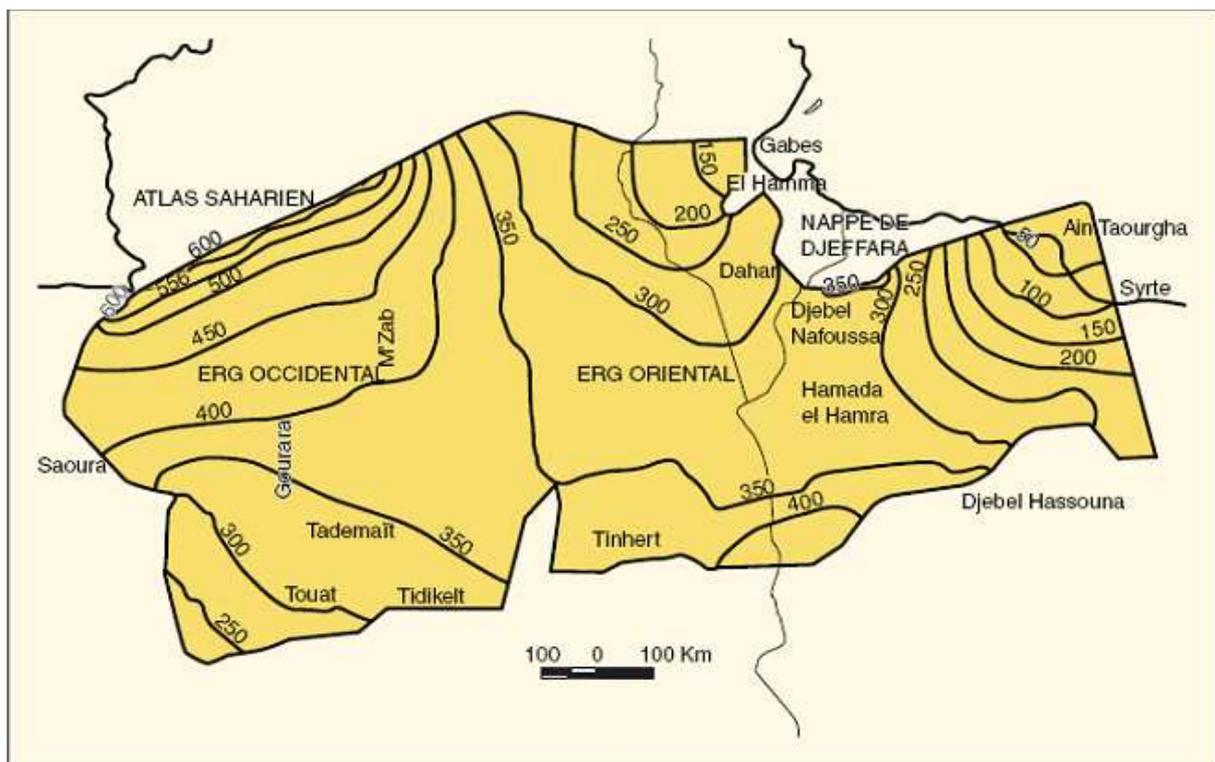


Figure II. 5 : Carte piézométrique du Continental Intercalaire (CI) en 2000.

II.3.2 L'aquifère du Turonien

Le réservoir carbonaté, en raison de la complexité de son organisation fissurale, est, sans conteste, l'aquifère qui présente les difficultés d'étude les plus grandes. L'organisation actuelle de la fracturation résulte d'états de contraintes successifs, de style différent qui ont affecté le milieu rocheux. Ces contraintes ont donné naissance au cours des phases orogéniques à une fragmentation qui intervient à des échelles très variées ; des ouvertures microscopiques jusqu'à l'accident plurikilométrique. Ce sont ces discontinuités qui attribuent essentiellement au milieu carbonaté sa perméabilité primaire, laquelle est modifiée ensuite lors des processus de karstification dus à des phénomènes de dissolution préférentielle. Le comportement hydraulique du massif rocheux est bien évidemment étroitement lié à la nature, la géométrie et la distribution des fractures.

L'existence d'eaux souterraines dans la région du Mzab s'explique par la présence d'assises marneuses imperméables de l'étage cénomanien sous les calcaires turoniens de la chebka. Les eaux souterraines tendent, d'une façon générale, à se rassembler à la partie inférieure des massifs calcaires et à la partie supérieure des massifs marneux sous jacents. Les eaux provenant des pluies ou celles apportées par les crues des oueds s'infiltrent dans les fissures des calcaires ; arrêtées par les marnes cénomaniennes, elles se rassemblent et forment une nappe qui alimente les puits du Mzab (figure II.7).

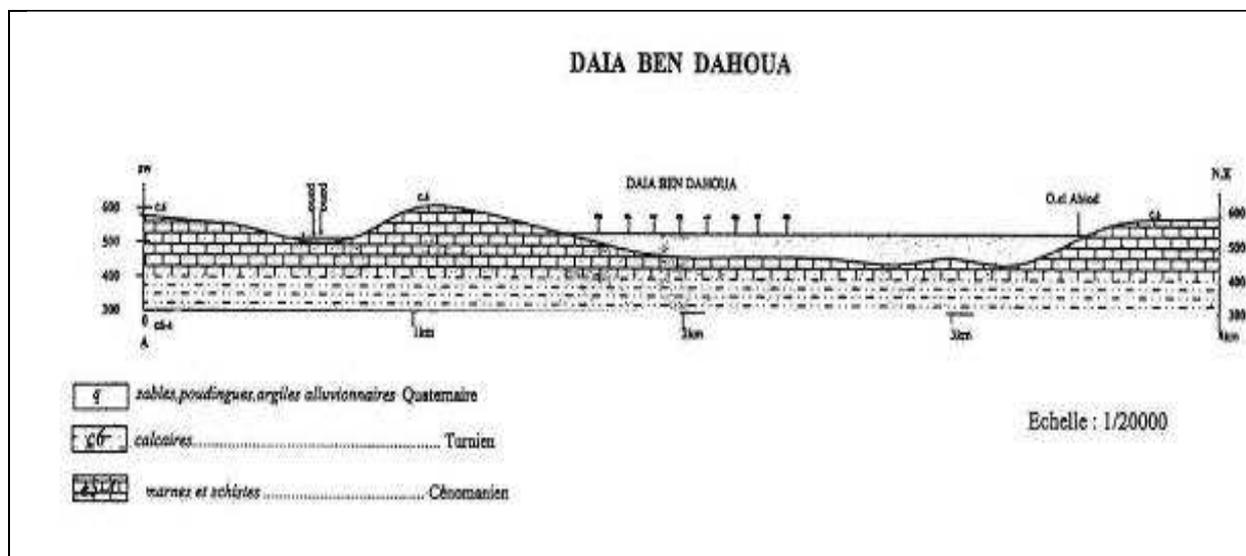


Figure II.6 : Coupe géologique dans la région de Daia Ben Dahoua.

Les puits captant le Turonien sont situés essentiellement à l'intérieur des Ksour et comme ces derniers sont construits sur les formations carbonatées, les puits sont taillés dans la roche. Plus le point est élevé plus le puits sera profond. On parle de puits de 85 mètres, de 60 mètres et de 25 mètres.

L'eau est souvent saumâtre ; elle sert pour les travaux ménagers, la lessive, les constructions. Aucune eau ne doit être perdue ; ce qui est en trop est versé au pied du palmier qui se trouve souvent à côté du puits.



Figure II.7 : Puits captant l'aquifère Turonien dans le Ksar de Ghardaïa.

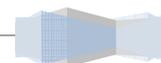
II.3.3 L'aquifère alluvionnaire Quaternaire

Dans le Sahara septentrional, s'étend, particulièrement désolée, la **chebka du Mzab**. Le mot chebka, " filet " en arabe, dit bien ce paysage monotone et fantastique, ce plateau pierreux, la hamada, où les vallées desséchées des oueds sahariens dessinent comme des mailles enserrant la masse des entablements rocheux. Ce désert est traversé par la vallée de l'oued Mzab où se dressent les cinq cités (Ghardaïa, Mélika, Benisguen, Bounoura et El Atteuf.

Au creux de cette vallée, des lits sablonneux, primitivement impropres à la culture, qu'il a fallu aménager au prix d'efforts extraordinaires et indéfiniment renouvelés. Ces alluvions renferment la nappe phréatique qui fut jusqu'à une époque récente la seule ressource hydraulique exploitée par des milliers de puits traditionnels.

Les crues des oueds jouent un rôle primordial dans le régime de ces puits. Lors de chaque crue, le niveau de l'eau s'élève dans les puits. Il s'abaisse ensuite plus ou moins lentement, pour arriver à son minimum. Parfois même, l'eau disparaît complètement.

Tous les puits du Mzab ne se comportent d'ailleurs pas de la même manière après la crue ; la nappe souterraine n'est pas absolument homogène.



D'une façon générale, les puits d'amont conservent l'eau plus longtemps que les puits d'aval. En aval comme en amont existent des puits qui donnent de l'eau en permanence, mais dont le débit diminue très sensiblement en période de sécheresse. Enfin, en quelques points privilégiés se trouvent un petit nombre de puits appelés "ouarouara" qui conservent un débit abondant, même pendant les périodes de sécheresse.

Tableau II-2 : Les puits des cinq villes de l'oued Mzab (Lieutenant Charlet, 1905).

	<i>Ghardaia</i>	<i>Melika</i>	<i>Bou Noura</i>	<i>El Atteuf</i>	<i>Beni Izguen</i>
<i>"Puits morts" n'ayant d'eau que pendant les cinq ou six mois qui suivent la crue</i>	302	32	142	217	24
<i>Puits qui tarissent après 18 mois ou deux ans de sécheresse.</i>	900	112	75	64	173
<i>Puits ne tarissant pas en temps de sécheresse mais dont le débit devient intermittent</i>	490	131	80	201	160
<i>Puits dits "Ouarouara" conservant pendant les plus longues périodes de la sécheresse un débit très abondant</i>	19	2	1	2	5
Total	1.741	284	298	484	362

II.4 Etat actuel des puits

Lors d'un recensement des puits et de leurs états au niveau de la palmeraie de Ghardaïa au mois d'août 2009, nous avons pu constater qu'une bonne partie des puits traditionnels ont été remblayés et sont donc inutilisables.

Lors de cette campagne de mesures, nous avons recensé 256 puits dont 137 seulement sont fonctionnels, les autres étant hors d'usage car remblayés partiellement ou totalement.

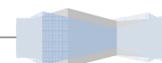
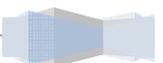




Photo II.1 : Puits fonctionnels dans la palmerai de Ghardaïa.



Photo II.2 : Puits remblayé dans la palmerai de Ghardaïa.



Ceci étant dit, ces puits participent activement à la recharge des nappes car certains d'entre eux sont des points d'accès direct entre la surface et le complexe Alluvio-Turonien et permettent la recharge directe de la nappe lors des crues.

II.5 Profondeur des puits

Les points d'eaux ou les mesures piézométriques ont été réalisées se trouvent dans la zone délimitée par le maillage sur la *Figure II.9* qui se trouve dans les quartiers de « chaaba », « Bouchemjane », « Takhdite » et « Baba Ouaiassa ».

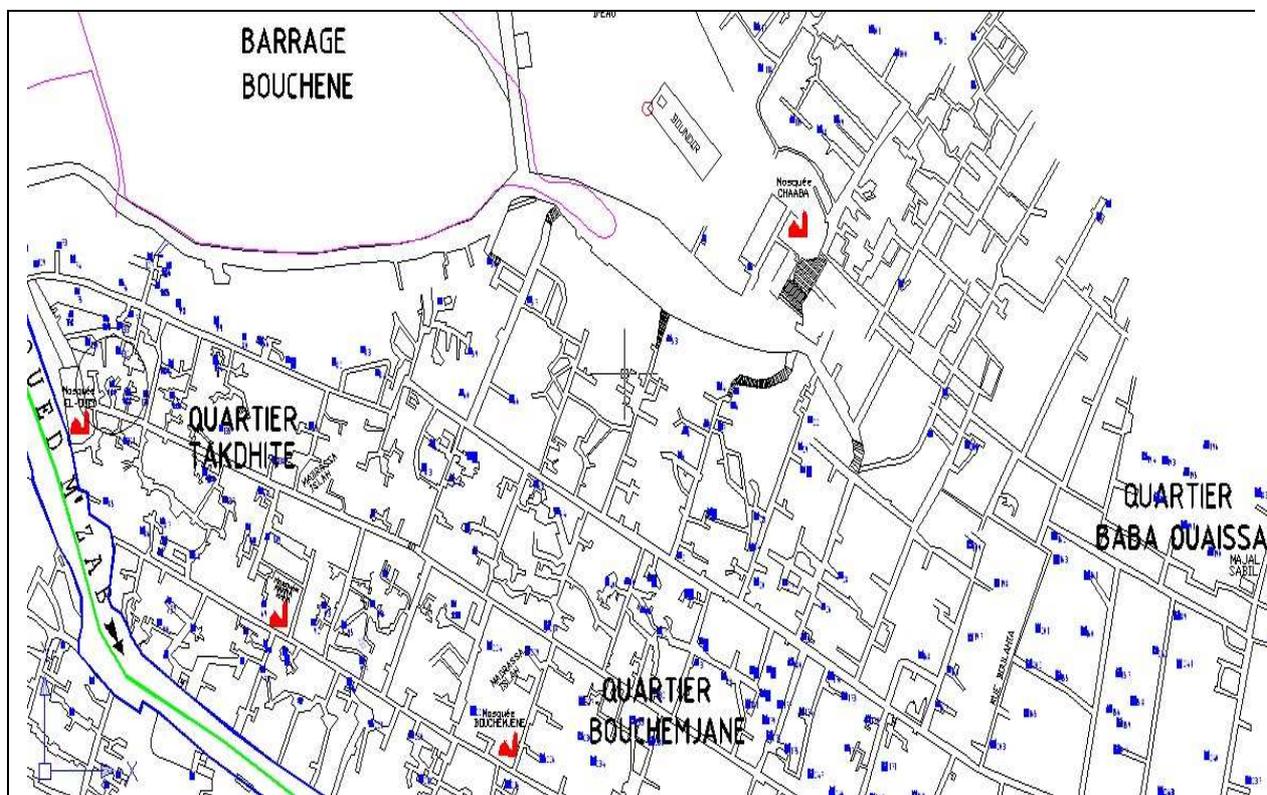


Figure II.9 : Cartographie de la zone de mesures piézométriques.

Cette zone de mesure est délimitée par le barrage de Bouchene au Nord, le barrage de Touzouz à l'Ouest, un relief montagneux à l'Est et le barrage d'Ahbes Ajdid au Sud, la surface de mesure est d'approximativement 2 Km², sur cette zone, nous avons recensé, cartographié, caractérisé, estimé l'état et avons photographié un total de 256 puits sur une période de 19 jours allant du 12 au 30 avril 2009 sur une fenêtre horaire démarrante de 5h00 A.M. GMT afin que le niveau hydraulique lors de la mesure corresponde le plus possible au niveau statique de l'aquifère et allant jusqu'à 8h00 P.M. GMT.

Les figures suivantes qui ont été réalisées à l'aide du logiciel Surfer représentent d'une part la surface de la zone de mesure et d'autre part, une représentation en 3D de la surface libre de la nappe.

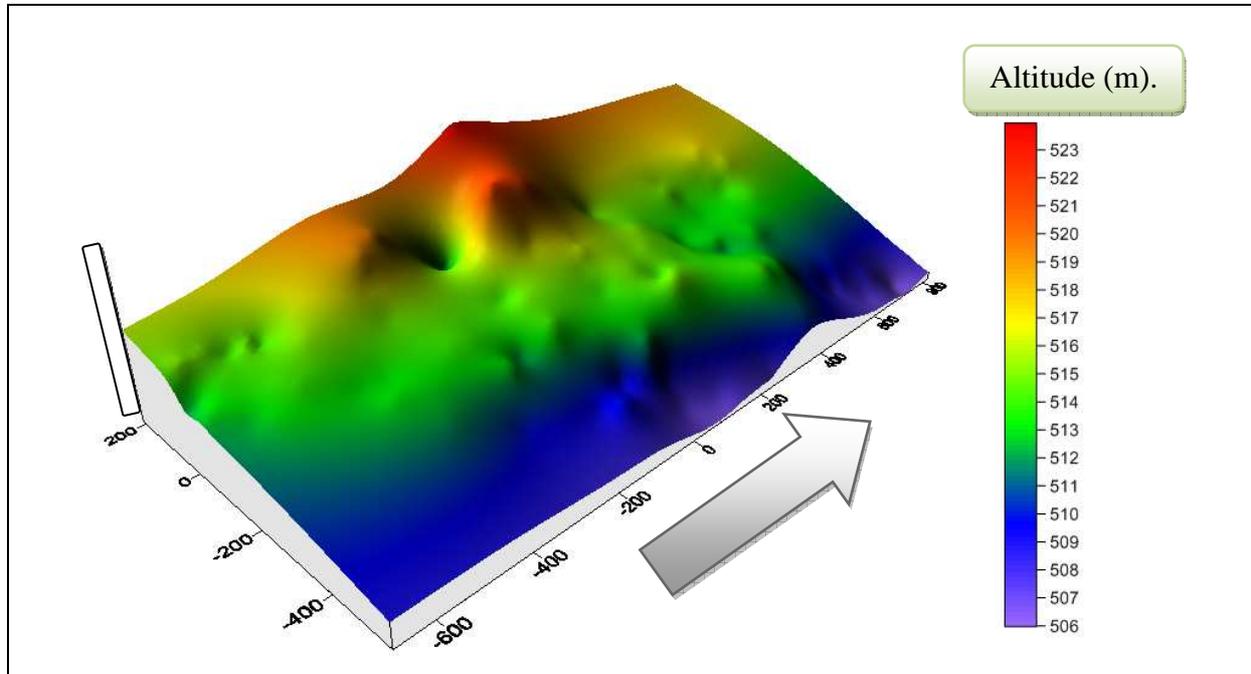


Figure II.10 : Représentation de la surface du terrain de la zone de mesure.

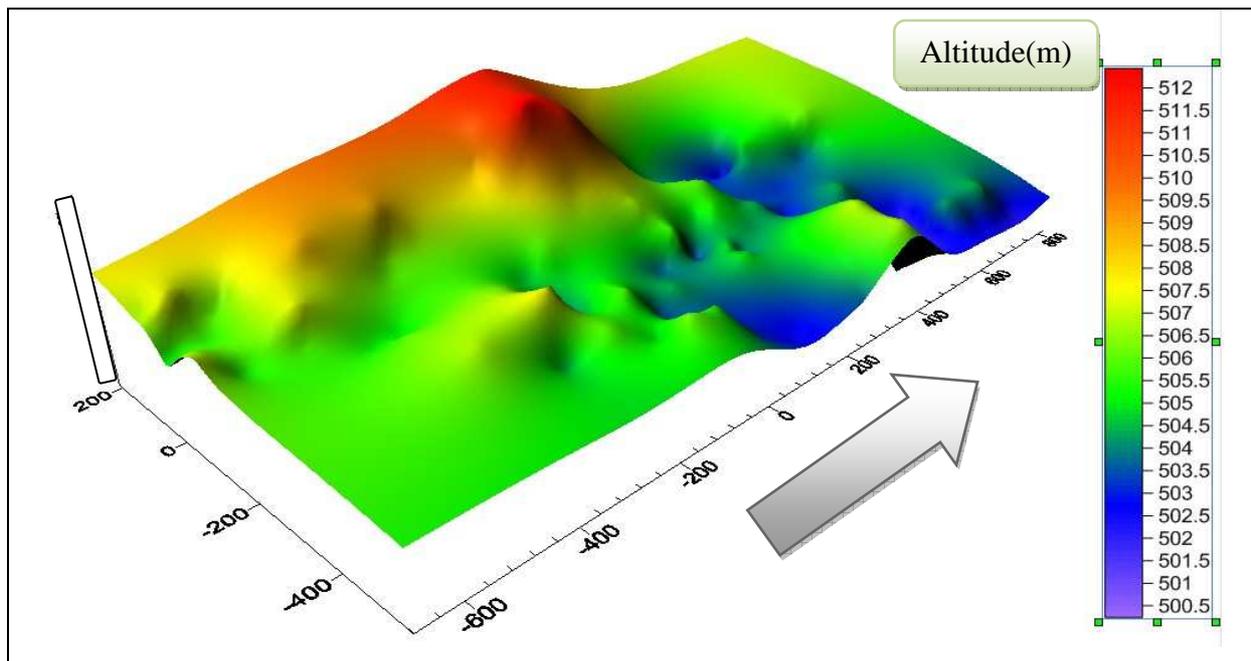
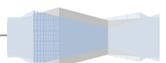


Figure II.11 : Représentation de la surface de l'aquifère alluvionnaire de la zone de mesure (Contraste).



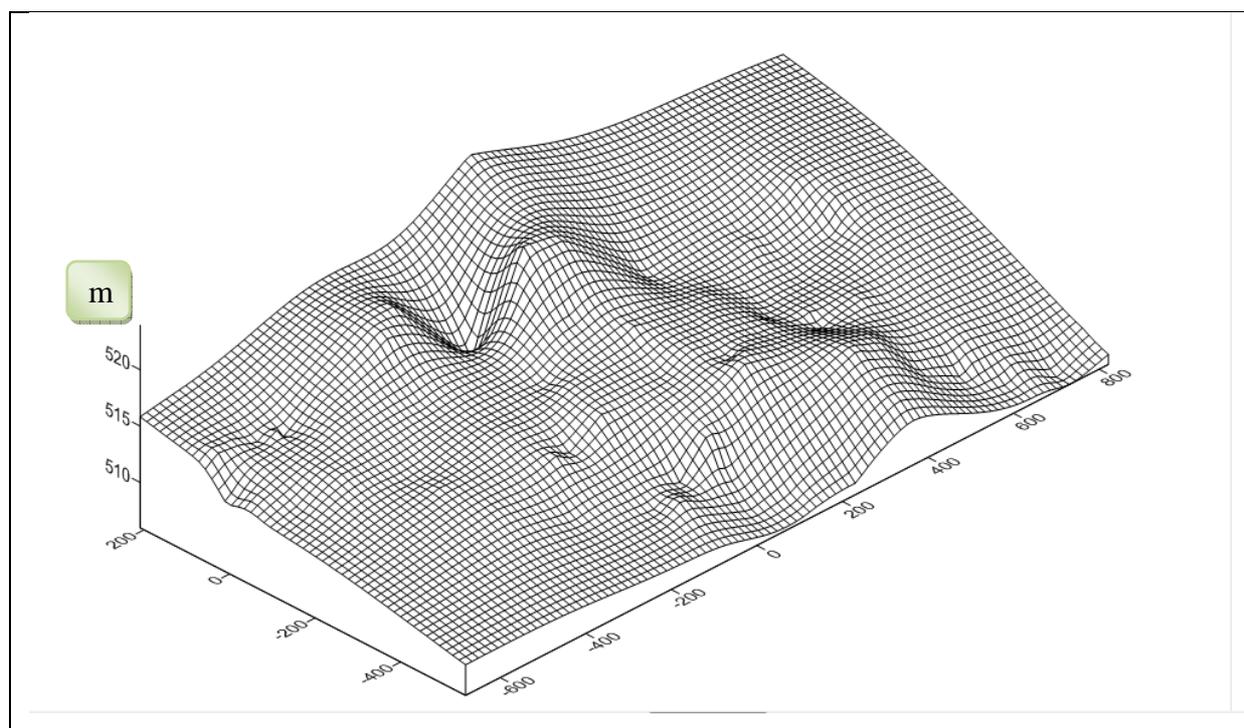


Figure II.12 : Représentation de la surface de l'aquifère alluvionnaire de la zone de mesure (Mailles).

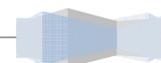
En comparant la figures II.10 et les figures II.11 et II.12, nous voyons clairement que la profondeur moyenne pour atteindre l'aquifère à partir de la surface alluvionnaire varie de 7m a 22m.

II.6 Relation aquifère alluviale et aquifère turonien

L'aquifère du Turonien est un aquifère à perméabilité de fissure qui résulte de la karstification de la roche calco-carbonatée constitutive du Turonien.

L'aquifère alluvionnaire quand à lui est caractérisé par une perméabilité d'interstices fait de sa constitution (Alluvions, sable...).

La formation de cet aquifère résulte des dépôts solides des différents éléments charriés lors des crues qui, après des centaines d'années, se sont déposés sur les lits des oueds et ont donné naissance à ce réservoir souterrain.



La configuration spatiale des deux aquifères cités précédemment est représentée sur le schéma suivant (Figure II.13) :

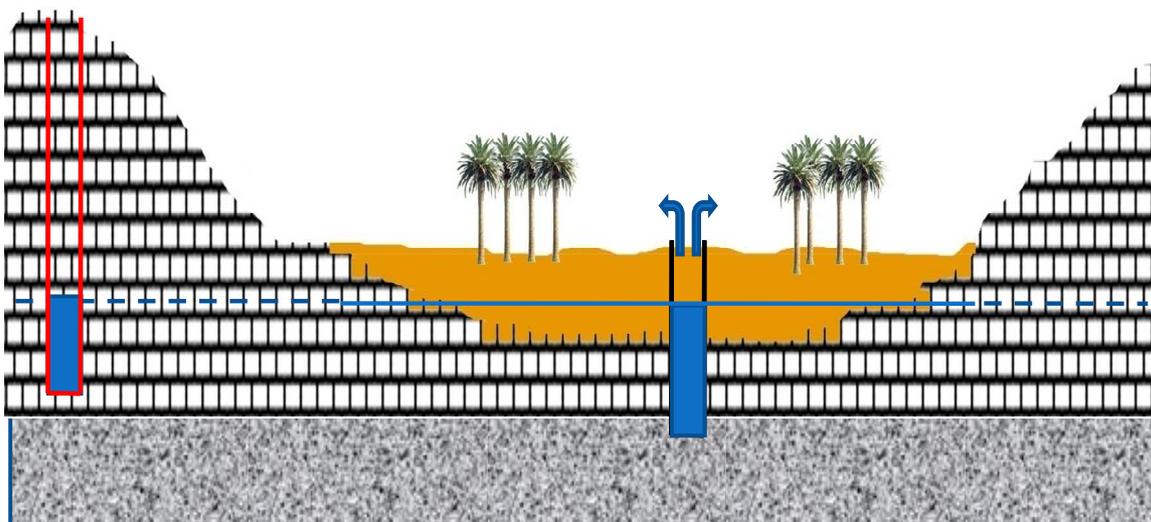


Figure II.13 : Coupe des aquifères alluvionnaire et turonien.

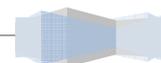
Le substratum commun des deux aquifères est constitué d'argile et de marne du Cénomanien et se trouve environ à 50m en dessous de la surface alluvionnaire.

N'existant pas de couche imperméable séparant les deux aquifères de surface, il est évident qu'il y a une interconnexion de charge et de décharge entre ces deux aquifères en fonction de la sollicitation et de la recharge de l'un ou de l'autre.

II.7 Puits de recharge de la nappe

Les nappes que nous avons vues précédemment peuvent être rechargées de deux manières différentes :

- La première étant par l'infiltration des précipitations à travers la surface alluvionnaire grâce à la perméabilité d'interstices qui la caractérise.
- La deuxième manière, assez atypique, est par écoulement de l'eau à travers des points d'entrés direct que sont les puits capteurs d'eau conçus à cet effet. Ils captent les eaux des crues à travers des orifices qui mènent à l'intérieur des puits et donc directement dans la nappe.



La photo II.3 montre un puits capteur d'eau servant à la recharge de la nappe en période de crue.



Photo II.3 : Puits capteur d'eau servant à la recharge de la nappe en période de crue.

L'orifice indiqué sur la photo est le point d'entrée des eaux de crues qui mène directement à l'intérieur du puits.



II.8 Conclusion

Le système hydraulique ancestral de la région de Ghardaïa est particulièrement ingénieux et ses instigateurs ont réussi à s'adapter de manière optimale aux conditions extrêmes de vie dans le désert.

L'eau étant très rare et très précieuse, elle est captée puis stockée à l'abri de l'évaporation dans les couches du sol puis utilisée au moment opportun.

Ce procédé n'a été réalisable que grâce aux propriétés géologiquement particulières de la région, c'est-à-dire grâce à la karstification des roches du turonien et les dépôts stratigraphiques alluvionnaires des Oueds.



CHAPITRE III

ASPECTS THEORIQUES DE L'HYDROCHIMIE



"La connaissance
s'acquiert par
l'expérience, tout le
reste n'est que de
l'information..."

Albert Einstein



CHAPITRE III : ASPECTS THEORIQUES DE L'HYDROCHIMIE

III.1 INTRODUCTION

Les caractéristiques chimiques de l'eau ont un impact déterminant non seulement au niveau de la santé publique et de la potabilité de l'eau mais aussi au niveau de certains secteurs, et en particulier l'agriculture qui est de loin celui qui consomme le plus d'eau au Sahara et dans le monde.

III.2 L'ANALYSE PHYSICO-CHIMIQUE DE L'EAU

Les paramètres à analyser au niveau des puits échantillonnés ont été choisis en fonction des objectifs recherchés.

III.2.1 Les paramètres physiques

III.2.1.1 La température

La température de l'eau varie essentiellement en fonction des variations diurnes et saisonnières de la température de l'air. Elle dépend aussi de la profondeur de la couche aquifère. La température active la mise en solution des sels minéraux, conditionne la solubilité des gaz et favorise la décomposition de la matière organique qui produit le CO₂ nécessaire à la mise en solution des carbonates.

La température de l'eau est aussi un paramètre de confort pour les usagers. Elle permet également de corriger les paramètres d'analyses 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 a été mesurée in situ lors d'une campagne de mesures.

III.2.1.2 Le PH

Le pH d'une solution est le logarithme ordinaire négatif de l'activité d'ions d'hydrogène :

$$\text{pH} = - \text{Log} [\text{H}^+]$$

Dans les solutions diluées, l'activité d'ions d'hydrogène est approximativement égale à la concentration d'ions d'hydrogène.



Le pH de l'eau est une mesure de l'équilibre d'acide-base et, dans la plupart des eaux naturelles, est commandé par le système d'équilibre de carbone : dioxyde-bicarbonate-carbonate. Une concentration accrue en anhydride carbonique entraîne une baisse du pH, tandis qu'une diminution le fera monter. La température affectera également les équilibres et le pH.

Dans l'eau pure, une diminution du pH d'environ 0.45 se produit pendant que la température est élevée de 25 °C.

Dans une eau ayant un pouvoir tampon donné par des ions de bicarbonate, de carbonate et d'hydroxyle, cet effet de température est modifié (Apha, 1989). Le pH de la plupart des eaux potables se trouve dans la fourchette 6.5-8.5. Les eaux naturelles peuvent être de pH inférieur en raison, par exemple, des pluies acides ou le pH est plus faible.

Bien que le pH n'ait habituellement aucun impact direct sur les consommateurs de ces eaux, il est l'un des paramètres opérationnels les plus importants de la qualité de l'eau. Une attention particulière au contrôle du pH est nécessaire à toutes les étapes du traitement de l'eau pour assurer la clarification et la désinfection satisfaisantes de l'eau. Pour une désinfection efficace avec du chlore, le pH devrait de préférence être inférieure à 8.0. Le pH de l'eau entrant dans le système de distribution doit être contrôlé pour réduire au maximum la corrosion des canalisations dans des circuits d'alimentation en eaux potables. Ne pas considérer ces recommandations peut conduire à la contamination de l'eau potable et par conséquent entraîner des effets nuisibles sur son goût, son odeur et son aspect.

Il traduit ainsi la balance entre acide et base sur une échelle de 0 à 14, 7 étant le pH de neutralité. Ce paramètre caractérise un grand nombre d'équilibre physico-chimique et dépend de facteurs multiples, dont celui de l'origine de l'eau.

Le pH doit être impérativement mesuré sur le terrain à l'aide d'un pH-mètre ou par colorimétrie.

Le tableau suivant nous permet d'avoir une approche sur la classification des eaux en fonction de leurs pH.



Tableau III-1 : Classification des eaux suivant leur pH.

<i>Valeur du pH</i>	<i>Interprétation</i>
$pH < 5$	<i>Acidité forte => présence d'acides minéraux ou organiques dans les eaux naturelles</i>
$pH = 7$	<i>pH neutre</i>
$7 < pH < 8$	<i>Neutralité approchée => majorité des eaux de surface</i>
$5,5 < pH < 8$	<i>Majorité des eaux souterraines</i>
$pH = 8$	<i>Alcalinité forte, évaporation intense</i>

III.2.1.3 La Conductivité

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. La mesure de la conductivité permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

La conductivité est également fonction de la température de l'eau : elle est plus importante lorsque la température augmente. Les résultats de mesure doivent donc être présentés en termes de conductivité équivalente à 20 ou 25°C ($\mu\text{S}/\text{cm}$).

Les appareils de mesure utilisés sur le terrain effectuent en général automatiquement cette conversion.

Ce paramètre doit impérativement être mesuré sur le terrain. La procédure est simple et permet d'obtenir une information très utile pour caractériser l'eau.

Comme la température, des contrastes de conductivité permettent de mettre en évidence des pollutions, des zones de mélanges ou d'infiltration... La conductivité est également l'un des moyens de valider les analyses physico-chimiques de l'eau : la valeur mesurée sur le terrain doit être comparable à celle mesurée au laboratoire.



Tableau III-2 : Normes physico-chimiques d'une eau potable d'après l'OMS.

<i>Paramètre physico-chimiques</i>	<i>Unité</i>	<i>Norme OMS</i>
<i>Température</i>	°C	≤25
<i>pH</i>	-	6,5-8,5
<i>Conductivité</i>	μS/cm	2800
<i>TAC</i>	°F	≥2,5
<i>TH</i>	°F	≤15
<i>Résidus secs</i>	<i>mg/l après séchage</i>	<i>max 2000</i>
<i>Sodium</i>	<i>mg/l</i>	<i>200</i>
<i>Potassium</i>	<i>mg/l</i>	<i>20</i>
<i>Sulfates</i>	<i>mg/l</i>	<i>200</i>
<i>Chlorures</i>	<i>mg/l</i>	<i>200</i>
<i>Oxydabilité au KMnO4</i>	<i>mg/l</i>	<i>500</i>
<i>Oxygène dissous</i>	<i>mg/l</i>	<i>5</i>
<i>COT</i>	<i>mg/l</i>	<i>5</i>

III.2.1.4 Résidu sec

Le résidu sec d'une eau filtrée au préalable correspond aux matières dissoutes qui englobent les substances minérales (mg/L) ainsi que les substances organiques.

D'après le résidu sec, les eaux peuvent être classées en tant que douces, contenant jusqu'à 1 g/l de sels, faiblement salées (1 à 5 g/l), saumâtres (5 à 10 g/l), salées (10 à 50 g/l) et saumurés à partir de 50 g/l et au-dessus.

III.2.1.5 La turbidité

La mesure de la turbidité permet de préciser les informations visuelles sur l'eau. La turbidité traduit la présence de particules en suspension dans l'eau (débris organiques, argiles, organismes microscopiques...). Les désagréments causés par une turbidité auprès des usagers sont relatifs car certaines populations sont habituées à consommer une eau plus ou moins trouble et n'apprécient pas les qualités d'une eau très claire. Cependant une turbidité forte peut permettre à des micro-organismes de se fixer sur des particules en suspension.

La turbidité se mesure sur le terrain à l'aide d'un turbidimètre.

Le tableau suivant nous permet d'avoir une approche sur la classification des eaux en fonction des classes de turbidité usuelles (NTU, nephelometric turbidity unit).

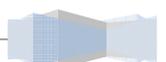


Tableau III-3 : Classes de turbidité usuelles.

<i>NTU</i>	<i>Interprétation</i>
<i>NTU < 5</i>	<i>Eau claire</i>
<i>5 < NTU < 30</i>	<i>Eau légèrement trouble</i>
<i>NTU > 50</i>	<i>Eau trouble</i>

III.2.2 Les paramètres chimiques

Un certain nombre de contaminants chimiques ont été cités comme cause d'effets défavorables sur la santé chez l'homme par suite à une consommation prolongée de certaines eaux potables. Cependant, c'est seulement une proportion très petite des produits chimiques qui peuvent atteindre l'eau potable de diverses sources.

Les substances considérées ici ont été évaluées pour leurs effets potentiels sur la santé et des valeurs de directive ont été proposées par l'OMS seulement sur la base des soucis de santé.

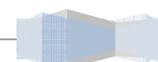
Quelques substances pouvant affecter la santé du consommateur ont évidemment une influence sur l'acceptabilité d'une eau potable, cela mènerait normalement au rejet de cette eau aux concentrations sensiblement supérieures à un seuil acceptable pour la santé. Pour de telles substances, des valeurs seuils de directive sont nécessaires pour l'usage d'une eau, ces valeurs découlent d'interprétations des données rassemblées en réponse aux plaintes du consommateur.

III.2.2.1 La minéralisation des eaux

Si on définit une eau naturelle pure comme ne contenant ni matières en suspension (MES) ou colloïdes ni matières organiques dissoutes (ce qui est le cas des eaux minérales et beaucoup d'eaux de forage), cette eau ne renferme que des sels minéraux dissous et dissociés en cations et anions. Les principaux ions présents peuvent être classés selon leur fréquence décroissante.

III.2.2.2 La dureté

La dureté de l'eau est la mesure traditionnelle de la capacité de l'eau de réagir avec du savon, l'eau calcaire exigeant considérablement plus de savon pour produire de la mousse. Elle n'est pas provoquée par une substance simple mais par une série d'ions métalliques polyvalents dissous, principalement cations de calcium et de magnésium, bien que d'autres cations, par exemple baryum, fer, manganèse, strontium et zinc, y contribuent également.



La dureté est le plus généralement exprimée en milligrammes de carbonate de calcium équivalents par litre, à plus ou moins 60 mg par litre de carbonate de calcium, une eau est généralement considérée comme douce. Bien que la dureté soit provoquée par des cations, elle peut également être discutée en termes de carbonate (provisoire) et dureté (permanente) non carbonatée.

Selon l'interaction d'autres facteurs tels que le pH et l'alcalinité, l'eau ayant une dureté inférieure à environ 200 mg/litre peut causer d'une part des dépôts solides dans le système de distribution et d'autre part, une consommation accrue de savon. En revanche, l'eau douce avec une dureté en dessous de 100 mg/litre a une plus grande tendance à causer la corrosion des conduites ayant pour résultat la présence de certains métaux lourds, tels que le cadmium, le cuivre et le zinc, dans l'eau potable. Le degré auquel ces corrosions et solubilisation des métaux se produisent dépend également du pH, de l'alcalinité, et de la concentration en oxygène dissous.

III.2.2.3 Le calcium (Ca)

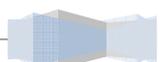
Le calcium provient de la dissolution de la calcite et du lessivage des calcaires et des dolomies ou dépôts gypsifères.

Le seuil de goût pour l'ion de calcium est dans la gamme 100-300 mg/litre, selon l'anion associé, mais des concentrations plus élevées semblent acceptables aux consommateurs. Des niveaux de dureté au-dessus de 500 mg/litre sont généralement considérés esthétiquement inacceptables.

Les concentrations allant jusqu'à 100 mg par litre de calcium sont assez communes dans des sources naturelles d'eau, cependant, les sources contenant plus de 200 mg par litre de calcium sont rares.

III.2.2.4 Le magnésium (Mg)

Le magnésium est principalement présent en ion Mg^{2+} . Il est contenu dans un large nombre de minéraux, par exemple la dolomite (carbonate de calcium magnésium; $CaMg(CO_3)_2$) et la magnésite (carbonate de magnésium; $MgCO_3$). Le sulfate de magnésium ajoute un goût amer à l'eau. Sa solubilité est de 309 g/L à 10°C dans l'eau.



III.2.2.5 Le Sodium (Na)

L'ion de sodium est omniprésent dans l'eau. La plupart des approvisionnements en eau contiennent plus moins 20 mg de sodium par litre, mais aux niveaux de quelques pays, il peut dépasser 250 mg/litre. L'intrusion saline, les dépôts de minerais, l'intrusion d'eau de mer, les effluents d'eaux d'égout, et le sel utilisé dans la route dégivrant peuvent tous contribuer à l'apparition de quantités significatives de sodium dans l'eau. En outre, les produits chimiques de traitement de l'eau tels que le fluorure de sodium, le bicarbonate de soude et l'hypochlorite de sodium peuvent tous avoir comme conséquence des niveaux de sodium plus élevés que 30 mg/litre. Les adoucissants d'eaux domestiques peuvent donner des niveaux de plus de 300 mg/litre.

Le seuil de goût pour le sodium dans l'eau dépend de l'anion associé et de la température de la solution. À la température ambiante, les valeurs-seuils sont environ 20 mg/litre pour le carbonate de sodium, 150 mg/litre pour le chlorure de sodium, 190 mg/litre pour l'azotate de soude, 220 mg/litre pour le sulfate de sodium et 420 mg/litre pour le bicarbonate de soude.

Les sels de sodium sont généralement fortement solubles dans l'eau et on les retrouve dans l'environnement terrestre généralement dans les eaux de surfaces et souterraines.

III.2.2.6 Le potassium (K)

Bien que les concentrations du potassium normalement trouvées en eau potable soient généralement basses et ne posent pas des soucis de santé, la solubilité élevée du chlorure de potassium et son utilisation dans des dispositifs de traitement tels que des adoucissants d'eau peuvent mener à une exposition sensiblement accrue.

III.2.2.7 Les chlorures (Cl)

Le goût et les seuils olfactifs pour le chlore en eau distillée sont respectivement de 5 et 2 mg/litre.

Dans l'eau, le chlore réagit à l'acide hypochloreux et aux hypochlorites de forme. Chacune des trois espèces existe dans l'équilibre les unes avec les autres, les affinités variant avec le pH. Dans les solutions diluées et aux niveaux de pH inférieur à 4.0, le chlore moléculaire très petit existe en solution. Les concentrations de l'acide hypochloreux et de l'ion d'hypochlorite sont approximativement égales pour un pH de 7.5 et une température de 25°C.

Les chlorures proviennent souvent des eaux de pluies, du lessivage des terrains salés ainsi que des rejets des eaux usées.



III.2.2.8 Les Sulfates (SO_4)

Les sulfates se produisent naturellement en nombreux minerais, y compris la barytine ($BaSO_4$), l'epsomite ($MgSO_4 \cdot 7H_2O$) et gypse ($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) (Greenwood et Earnshaw, 1984). Ces minerais dissous contribuent à la teneur en minéraux de beaucoup d'eaux potables.

Les concentrations rapportées pour le seuil de goût en eau potable sont 250-500 mg/litre (médiane 350 mg/litre) pour le sulfate de sodium, 250-1000 mg/litre (médiane 525 mg/litre) pour le sulfate de calcium et 400-600 mg/litre (médiane 525 mg/litre) pour le sulfate de magnésium (NAS, 1977). Pour un échantillon, les concentrations médianes qui pourraient être détectées par goût étaient respectivement de 237, 370 et 419 mg/litre pour les sels de sodium, de calcium et de magnésium, (Whipple, 1907).

Des sulfates sont déchargés dans l'eau des mines, des fonderies, des moulins à papier de pulpe de papier d'emballage, des moulins de textile et des tanneries. Les sulfates de sodium, de potassium et de magnésium sont tous fortement solubles dans l'eau, tandis que les sulfates de calcium et de baryum et beaucoup de sulfates de métaux lourds sont moins solubles. L'anhydride sulfureux atmosphérique, constitué par la combustion de ressources fossiles et rejeté par procédés métallurgiques, peut contribuer à la teneur en sulfate des eaux de surface (Delisle et Schmidt, 1977).

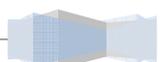
Les données existantes n'identifient pas un niveau de sulfate en eau potable qui est susceptible de causer des effets défavorables de santé des personnes. Les données de l'eau du robinet et les études avec les volontaires humains n'indiquent un effet laxatif qu'à partir de concentrations de 1000-1200 mg/litre, mais aucune augmentation de diarrhée, de déshydratation ou de poids n'est à signaler. La présence du sulfate dans l'eau potable peut également avoir comme conséquence un arrière goût.

III.2.2.9 Les Bicarbonates (HCO_3)

L'ion bicarbonate est le principal constituant alcalin des eaux, sa présence est due à l'action dissolvante des bactéries qui fournissent du CO_2 . Lorsque le CO_2 aqueux réagit avec l'eau, il y a formation d'un acide : l'acide carbonique (H_2CO_3) qui lui-même réagit pour former l'ion carbonate CO_3^{2-} et l'ion hydrogénocarbonate (bicarbonate) HCO_3^- .

III.2.2.10 Les Nitrates

Le nitrate et le nitrite sont des ions naturels qui font partie du cycle d'azote. L'ion de nitrate (NO_3^-) est la forme stable d'azote pour les systèmes oxygénés. Bien que chimiquement non réactif, il peut être réduit par action microbienne. L'ion de nitrite (NO_2^-) contient l'azote dans un état d'oxydation relativement instable. Les processus chimiques et biologiques



peuvent plus loin ramener le nitrite à de divers composés ou l'oxyder en nitrate (ICAIR Life Systems, Inc., 1987).

Le nitrate peut atteindre l'eau de surface et les eaux souterraines par suite d'une activité agricole (application excessive y compris des engrais azotés et des engrais inorganiques), du traitement des eaux résiduaires et de l'oxydation des déchets azotés provenant d'excrétions humaines et animales, y compris les fosses septiques.

Les nitrites peuvent également être formés chimiquement dans des conduites de distribution par les bactéries de Nitrosomonas pendant la stagnation de nitrates dans une eau potable pauvre en oxygène particulièrement dans les conduites en acier galvanisées.

Dans le sol, des engrais contenant l'azote inorganique et des déchets contenant l'azote organique sont d'abord décomposés pour donner l'ammoniaque, qui est alors oxydée en nitrite puis en nitrate. Le nitrate est consommé par les plantes pendant leurs croissances et employé dans la synthèse des composés azotés organiques. Le nitrate en surplus se déplace aisément avec les eaux souterraines (USEPA, 1987 ; van Duijvenboden et Matthijsen, 1989).

On a observé des concentrations du nitrate en eau de pluie allant jusqu'à 5 mg/l dans les zones industrielles (van Duijvenboden et Matthijsen, 1989). Dans des secteurs ruraux, les concentrations sont légèrement inférieures.

III.3 LA REPRESENTATION DE L'ANALYSE DE L'EAU

On représente en général l'analyse chimique de l'eau en ions. Il faut noter que dans une solution les molécules de sels se décomposent en cations chargés positivement et en anions chargés négativement. Les uns et les autres doivent être en quantité équivalente.

- Les éléments chimiques majeurs : Ca^{++} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- , CO_3^{2-} .
- Élément en trace : P^{2-} , NO_3^- , Br^- .
- Gaz : O_2 , CO_2 , H_2S , N .

$$1 \text{ méq/L} = \frac{(\text{mg/l}) * \text{nombre de valence}}{\text{masse atomique}}$$

Illustration:

$$460 \text{ mg/l de } \text{Na}^+ = 460 * 1/23 = 20 \text{ méq/L.}$$

$$240 \text{ mg/l de } \text{SO}_4^{2-} = 240 * 2/96 = 50 \text{ méq/L.}$$



Les résultats des analyses chimiques d'une eau doivent être impérativement soumis à un test de validité qui consiste au calcul de la déviation relative entre la somme des cations et la somme des anions.

Ce paramètre permet de vérifier la précision des méthodes analytiques utilisées et la validité des déterminations chimiques. S'il est inférieur à 5% les analyses sont considérées comme correctes, lorsque sa valeur est comprise entre 5% et 10%, les analyses peuvent être à la rigueur retenues. Par contre au delà de 10% les analyses doivent être rejetées.

Dans ce dernier cas, deux causes essentielles peuvent être évoquées : soit que les l'analyse est peu précises, soit qu'un ou plusieurs éléments en solutions n'ont pas été dosés.

La caractérisation d'une eau requiert donc l'obtention de données physico-chimiques diverses obtenues à partir des analyses d'échantillons prélevés à différentes époques pour une même émergence, ou en différents lieux pour plusieurs émergences situées dans une même nappe. L'étude de la qualité physico-chimique des eaux comporte trois étapes :

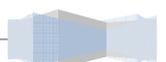
- l'échantillonnage.
- l'analyse.
- l'interprétation.

III.3.1 L'échantillonnage

L'échantillonnage est primordial car il conditionne la justesse de l'analyse. Il doit être de qualité mais également représentatif de ce que l'on veut analyser. Les échantillons d'eau doivent être prélevés dans des récipients propres, rincés plusieurs fois avec l'eau à analyser, puis fermés hermétiquement sans laisser de bulles d'air dans le flacon.

Le fait de prélever un échantillon d'eau et de le séparer de son milieu naturel entraîne des modifications plus ou moins importantes selon les paramètres. Certains peuvent être considérés comme stables à l'échelle de temps à laquelle on travaille, mais d'autres varient très rapidement : la température, la conductivité, le pH et les gaz dissous, enfin les nitrates et les sulfates.

Une variation de température entraîne une modification des constantes d'équilibres des éléments en suspension. Pour établir de nouveaux équilibres à la nouvelle température ambiante, diverses réactions chimiques se produisent qui peuvent entraîner la précipitation de sels, favoriser la mise en solution de gaz... Toutefois, une température basse (environ 4°C) bloque l'évolution des réactions.



La mise en contact avec l'air et la décompression sont également responsables de changements au sein de la solution.

Chaque espèce ionique participe à la conductivité totale d'une solution. Aussi, toute modification des équilibres chimiques, donc des proportions relatives des éléments dissous, entraîne un changement de conductivité. Le CO_2 en solution tend d'autant plus à s'échapper que la température de l'eau est plus élevée. Un départ de CO_2 peut provoquer la précipitation de carbonate, qui à son tour modifie le pH. Les nitrates et les sulfates peuvent être réduits par l'activité bactérienne.

Un prélèvement effectué sur une eau ayant longtemps stagnée n'est pas représentatif de la nappe. En effet, l'eau a subi l'influence du matériau de tubage et des éléments extérieurs (pollution, pluie...). Pour obtenir un échantillon moyen de l'horizon capté, il est nécessaire de pomper suffisamment longtemps pour renouveler l'eau contenue dans le tubage. Si l'ouvrage capte plusieurs horizons aquifères, l'échantillon sera un mélange des différentes eaux, dont les proportions sont directement liées aux transmissivités des différents niveaux. Pour obtenir des échantillons ponctuels à différentes profondeurs, il est possible d'utiliser des récipients lestés et munis d'un système de fermeture actionnable depuis la surface (hydrocapteurs).

III.3.2 Mesures in situ

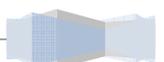
La température, le pH, la conductivité, l'alcalinité et l'oxygène dissous doivent être mesurés in situ. En effet, ces paramètres sont très sensibles aux conditions de milieu et susceptibles de varier dans des proportions importantes s'ils ne sont pas mesurés sur site.

III.3.3 Eléments d'interprétation

La nécessité de permettre une comparaison aisée et une classification des eaux minérales, selon la composition des divers échantillons analysés, a induit l'utilisation de représentations graphiques. Parmi les représentations graphiques les plus courantes notamment chez les hydrogéologues nous pouvons citer le diagramme de Schoeller-Berkaloff et le diagramme de Piper.

III.3.3.1 Le diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff est une représentation graphique semi-logarithmique. Sur l'axe des abscisses sont représentés les différents ions. Pour chacun de ces ions (ou des groupements Na^+/K^+ et $\text{CO}_3^{2-}/\text{HCO}_3^-$) la teneur réelle en mg/l est reportée sur l'axe des ordonnées. Les points obtenus sont reliés par des droites. L'allure du graphique obtenu permet de visualiser le faciès de l'eau minérale concernée.

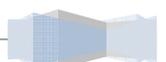


Le diagramme permet une lecture directe des concentrations en mg/l des différents ions majeurs, sans conversion en % relatif (cf diagramme de Piper). En outre, les 2 axes des ordonnées, situés à droite et à gauche du graphique, permettent une conversion directe en milliéquivalent (Le milliéquivalent est défini comme le rapport de la concentration en mg/l d'un ion donné à son équivalent chimique A/N avec A = masse atomique et N = valence de l'ion. Ces deux modes de représentation facilitent à la fois la construction des graphiques et la lecture des données.

Le diagramme de Schoeller-Berkaloff permet la représentation de plusieurs analyses sur le même graphique. Il y a superposition des droites obtenues si les concentrations sont identiques et décalage relatif des droites les unes au dessus des autres dans le cas contraire.

Toute droite réunissant deux éléments A et B d'une même eau et parallèle à une autre droite réunissant les mêmes éléments A' et B' d'une autre eau, indique un même rapport des éléments : $A/B = A'/B'$. Ces graphiques permettent également, d'après l'inclinaison des traits, de voir les rapports des éléments entre eux et en particulier des rapports souvent considérés comme caractéristiques ou d'importance marquée : Na^+/Ca^+ , SO_4^{2-}/Cl^- ...

Un inconvénient du diagramme de Schoeller-Berkaloff réside dans le fait que la comparaison de deux eaux peut amener à considérer que les faciès physico-chimiques sont similaires alors que les écarts de concentrations relatives en un ou plusieurs éléments sont significatifs.



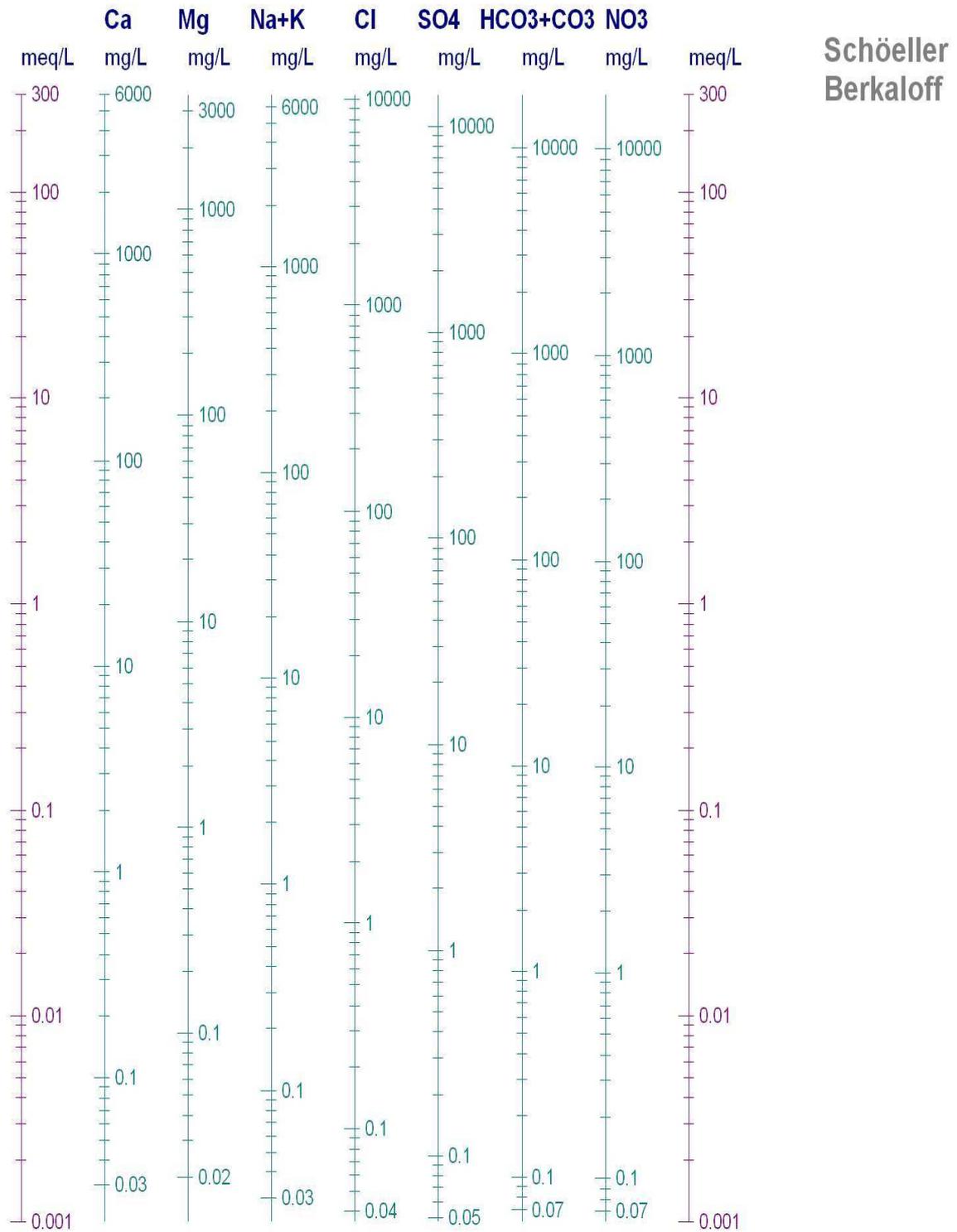
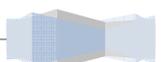


Figure III. 1 : Exemple de diagramme de Schoeller-Berkaloff.



III.3.3.2 Le diagramme de PIPER

Le diagramme de Piper permet une représentation des anions et des cations sur deux triangles spécifiques dont les côtés témoignent des teneurs relatives en chacun des ions majeurs par rapport au total de ces ions (cations pour le triangle de gauche, anions pour le triangle de droite).

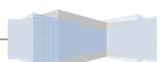
La position relative d'un résultat analytique sur chacun de ces deux triangles permet de préciser en premier lieu la dominance anionique et cationique.

A ces deux triangles, est associé un losange sur lequel est reportée l'intersection des deux lignes issues des points identifiés sur chaque triangle. Ce point d'intersection représente l'analyse globale de l'échantillon, sa position relative permet de préciser le faciès de l'eau minérale concernée :

- sommet du losange = faciès sulfaté/chloruré, calcique/magnésien,
- base du losange = faciès bicarbonaté, sodique,
- pointe droite du losange = faciès sulfaté/chloruré, sodique,
- pointe gauche du losange = faciès bicarbonaté, calcique/magnésien.

L'avantage du diagramme de Piper est qu'il permet de représenter sur un même graphique de nombreuses analyses autorisant des regroupements par famille présentant des faciès similaires. Ce point peut s'avérer particulièrement intéressant dans le cadre du suivi de la qualité d'une eau dans le temps, pour lequel on dispose de plusieurs analyses physico-chimiques, ou dans le cadre d'études régionales de comparaison de divers points.

Le diagramme de Piper est également intéressant pour juger de l'importance relative des précipitations ou dissolution d'éléments majeurs entre deux analyses (voire un nombre supérieur). Le simple déplacement de position d'un ion parallèlement au coté d'un triangle, traduit un enrichissement ou un appauvrissement relatif de l'eau pour l'ion concerné.



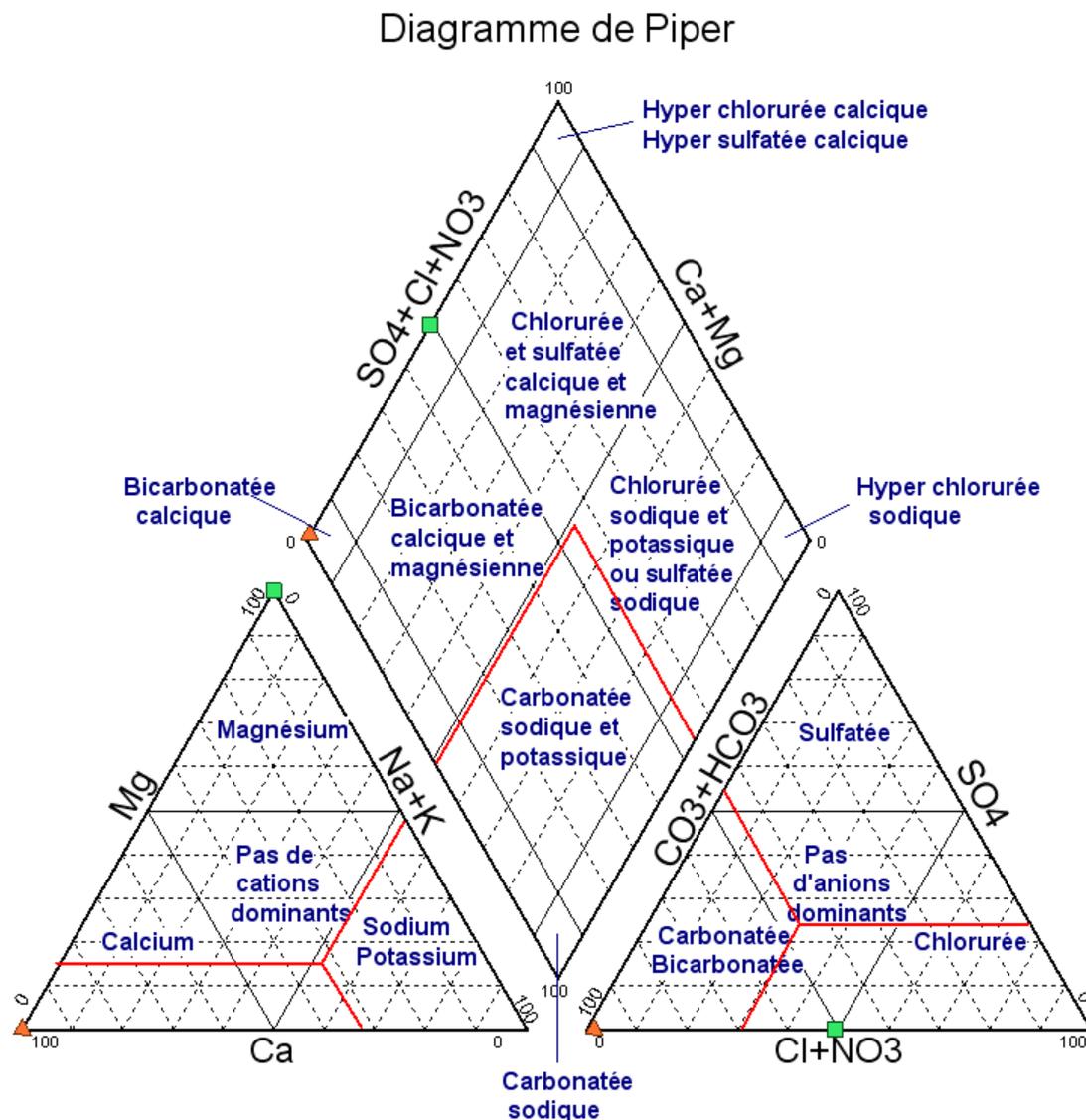
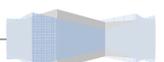


Figure III.2 : Exemple de résultats analytiques sur le diagramme de Piper.

III.3.3.3 Classification des eaux d'irrigation (Diagramme de l' U.S.D.A)

Le sodium issu des sels de chlorure de sodium exerce une action néfaste sur la végétation, car il peut être fixé sur le complexe absorbant et comme son pouvoir flocculant est faible il présente un danger pour les plantes. L'irrigation du sol par une eau sodique favorise la dispersion des argiles et la structure est dégradée, le milieu devient imperméable et asphyxiant.



Ce risque est déterminé à partir du rapport du sodium adsorbable (sodium adsorption ratio, S.A.R).

Le S.A.R est donnée par la relation suivante :

$$S.A.R = \frac{Na}{\sqrt{\frac{Ca-Mg}{2}}}$$

Où: Na, Ca, Mg sont exprimés en méq/l.

Les valeurs du S.A.R sont reportées en combinaison avec la conductivité électrique de l'eau sur le diagramme de Riverside de l'U.S Département of Agriculture. Ce diagramme est constitué par des classes qui permettent la détermination de la qualité des eaux pour l'irrigation.

De l'eau avec un SAR de plus de 9, ne devrait pas être utilisée même si le contenu total en sel est relativement bas. Un usage continu d'eau avec un RAS élevé provoque une déstructuration du sol.

L'eau avec un SAR se situant entre 0 et 6 peut généralement être utilisée sur tout type de sol avec peu de problème d'accumulation de sodium. Quand le SAR se situe entre 6 et 9, les risques de problème reliés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol.

Lorsque l'eau d'irrigation est saline, une valeur du SAR encore plus basse devrait être utilisée. Les problèmes dus au sodium sont aussi reliés à la concentration totale en sel de l'eau d'irrigation. Par conséquent, des eaux d'irrigation avec des salinités entre 1,5 et 3,00 mS/cm avec un SAR au-dessus de 4 doivent être utilisées avec prudence. Des échantillons de sols doivent être prélevés annuellement afin d'éviter d'éventuels problèmes de salinité des sols.

III.3.4 Les normes pour l'eau potables

Les concentrations limites en éléments chimiques pour qu'une eau soit considérée comme potable sont fixées par l'organisation mondiale de la santé (O.M.S) et figurent sur le *tableau III-5*. On peut aussi trouver sur ce tableau la nature des effets possibles dans le cas d'un éventuel dépassement de la concentration.

Le tableau suivant contient quelques normes et recommandations pour l'eau potable en vigueur dans l'union européenne et les Etats-Unis :

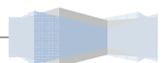


Tableau III-4 : Normes de potabilités de l'O.M.S

<i>Substance</i>	<i>Nature des effets possibles</i>	<i>Concentration</i>
Sulfate SO_4^{2-}	<i>Irritation gastro-intestinal s'il y a dissociation avec le Mg ou Na en particulier chez l'enfant</i>	250 mg/l
Hydrogène	<i>Goût et couleur désagréable</i>	0.05 mg/l
Magnésium (Mg)	<i>Dureté, goût désagréable</i>	<i>pas plus de 30 mg/l si l'eau contient 250 mg/l de sulfate, la tolérance pour Mg peut atteindre 125 mg/l.</i>
Nitrate (NO_3)	<i>Danger de méthémoglobinémie infantile si l'eau est consommée par des nourrissons</i>	<i>recommandée : moins de 50 mg/l est acceptable de 50 à 100 mg/l déconseille plus de 125 mg/l.</i>
Oxygène dissous		<i>Elle préconise que les niveaux d'oxygène soient maintenus près que possibles</i>
PH	<i>PH < 7 peut conduire à la corrosion des ciments ou des métaux des canalisations PH élevé peut conduire à des dépôts incrustants dans les réseaux de distribution.</i>	6,5 à 8,5
Résidu sec	<i>Au dessus de 1200 mg/l, l'eau devient désagréable</i>	<i>Recommandé par 1000 mg/l</i>
Sodium (Na)	<i>L'absorption d'une quantité relativement importante de Na peut être dangereuse chez certains malades.</i>	<i>Recommandé par 200 mg/l.</i>
Température	<i>T > 15° C favorise le développement des micro-organismes dans les canalisations ; odeur et saveur</i>	
Minéralisation globale	<i>Pose des problèmes endocriniens très complexe surtout pour l'enfant</i>	<i>Limité par 1000 mg/l</i>

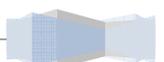
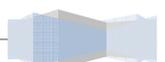


Tableau III-5 : Normes et recommandations pour l'eau potable aux Etats-Unis et dans l'Union européenne.

<i>Paramètres</i>	<i>Union Européenne</i>	<i>Etats-Unis</i>
<i>Paramètres physico-chimiques</i>		
<i>PH</i>	de 6.5 à 9	de 6.5 à 8.5
<i>Chlorures (Cl⁻) en mg/L</i>	max 200	max 250
<i>Sulfates (SO₄²⁻) en mg/L</i>	max 250	max 250
<i>Magnésium (Mg²⁺) en mg/L</i>	max 50	-
<i>Sodium (Na⁺) en mg/L</i>	max 150	-
<i>Potassium (K⁺) en mg/L</i>	max 12	-
<i>Aluminium (Al₃⁺) en mg/L</i>	max 0.2	max 0.2
<i>Substances indésirables</i>		
<i>Argent (Ag⁺) en µgr/L</i>	max 10	max 100
<i>Cuivre soluble (Cu) en mg/L</i>	max 1	max 1.3
<i>Fer soluble (Fe) en mg/L</i>	max 0.2	max 0,3
<i>Fluorures (F⁻) en mg/L</i>	max 1.5	max 4
<i>Manganèse (Mn) en mg/L</i>	max 0.05	max 0.05
<i>Nitrates (NO₃⁻) en mg/L</i>	max 50	max 45
<i>Nitrites (NO₂⁻) en mg/L</i>	max 0.1	max 3
<i>Zinc (Zn²⁺) en mg/L</i>	max 5	max 5
<i>Ammonium (NH₄⁺) en mg/L</i>	Max 0,5	-
<i>Substances toxiques</i>		
<i>Chrome soluble (Cr) en µgr/L</i>	max 50	max 100
<i>Cyanures (Cn⁻) en mg/L</i>	max 0.05	max 0.2
<i>Plomb (Pb) en µgr/L</i>	max 50	max 15
<i>Arsenic (As) en µgr/L</i>	max 50	max 50
<i>Nickel (Ni) en µgr/L</i>	max 50	-
<i>Mercuré (Hg) en µgr/L</i>	max 1	max 2
<i>Cadmium (Cd²⁺) en µgr/L</i>	max 5	max 5
<i>Phosphore (P) en mg/L</i>	max 5	-

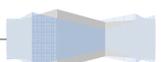


III.4 CONCLUSION

L'eau contient beaucoup d'ions dissous dont les principaux sont le calcium (Ca^{++}), le magnésium (Mg^{2+}), le sodium (Na^+), le potassium (K^+), les carbonates (CO_3^-), les bicarbonates (HCO_3^-), les sulfates (SO_4^-), les chlorures (Cl^-) et les nitrates (NO_3^-).

Ils proviennent pour l'essentiel du lessivage des sols par les eaux de pluie et de la dissolution des minéraux constituant les roches de l'aquifère. Aussi, leur teneur dépend-elle directement de la nature des roches. Elle peut varier du milligramme par litre au gramme par litre pour les eaux les plus salées.

En moins grande concentration (du microgramme au milligramme par litre), l'eau contient aussi des éléments nutritifs, ou nutriments, que sont l'azote (contenu dans l'ammoniac, les nitrites et les nitrates), le phosphore (contenu dans les phosphates) et la silice, mais aussi le fer et le manganèse.



CHAPITRE IV

ETUDE HYDROCLIMATIQUE



"Science sans
conscience n'est
que ruine de
l'âme..."

Rabelais



CHAPITRE IV : ETUDE HYDROCHIMIQUE**IV.1 DELIMITATION DE LA ZONE D'ETUDE**

Ghardaïa est située au centre de la partie du nord de Sahara à 600 Km au sud d'Alger, occupant une position centrale reliant les Hauts Plateaux et le Sahara. Ses coordonnées géographiques sont 3° 40' de longitude Est et 32° 29' de latitude Nord et son altitude est d'approximativement 530 m.

Elle est limitée du côté Nord par la région de Laghouat(200 Km), du Nord Est par la région de Djelfa (300 Km), de l'Est par la région de Ouargla (200 Km), du Sud par la région de Tamanrasset (1470 Km), du Sud-Ouest par la région d'Adrar (400 Km), et de l'Ouest par la région d'El-Bayadh (350 Km) (figure IV.1).



Figure IV.1 : Localisation géographique de la zone d'étude.

La Wilaya de Ghardaïa couvre une superficie de 86 105 Km². Les escarpements rocheux et les oasis déterminent le paysage dans lequel sont localisées les villes de la pentapole du M'Zab et autour duquel gravitent d'autres oasis : Berriane, El Guerrara, Zelfana, Metlili et beaucoup plus éloignées au Sud les oasis de Hassi El Fhel et d'El Goléa.

Notre zone d'étude se situe au niveau des principaux affluents de l'Oued M'Zab qui traverse la ville (Figure IV.2) qui sont au nombre de quatre :

- Oued Ntissa (Figure IV.3)
- Oued Touzouz (Figure IV.4)
- Oued Labiod (Figure IV.5)
- Oued Laadira (Figure IV.6)

Les positions géographiques des ces oueds par rapport à la ville de Ghardaïa et de l'Oued M'zab qui la traverse sont données sur la figure suivante :

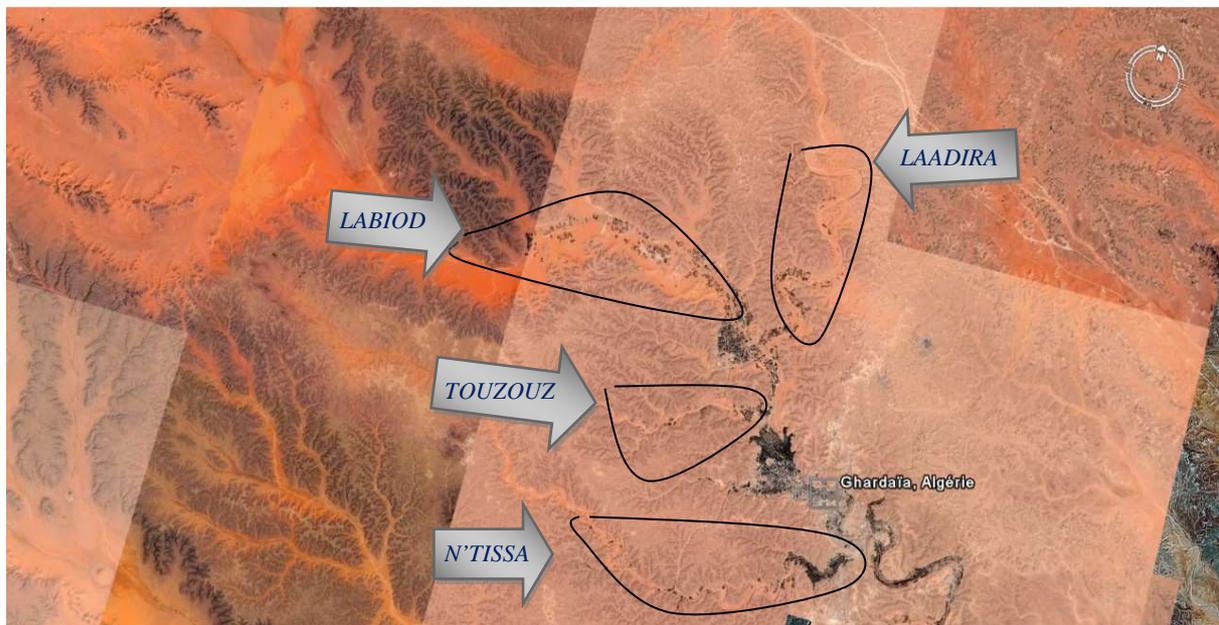


Figure IV.2 : Positions géographiques des principaux affluents de l'Oued M'Zab.

De manière plus concise, les figures suivantes sont des images satellites des affluents cites précédemment :

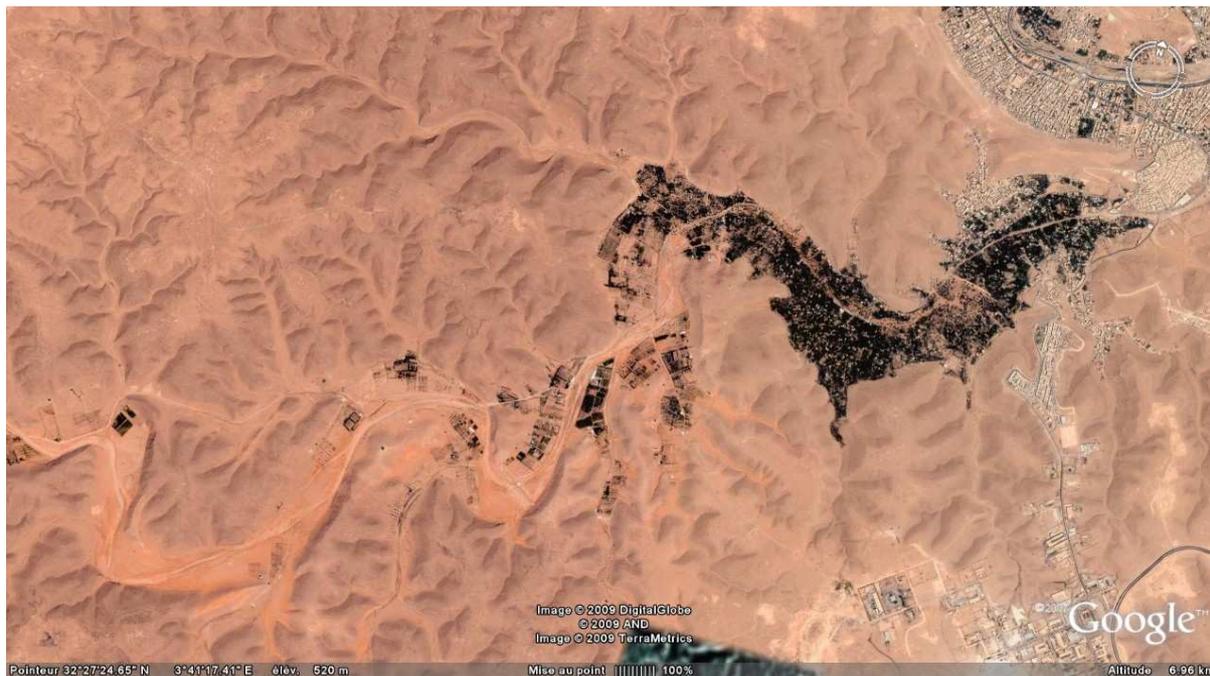


Figure IV.3 : Oued N'TISSA

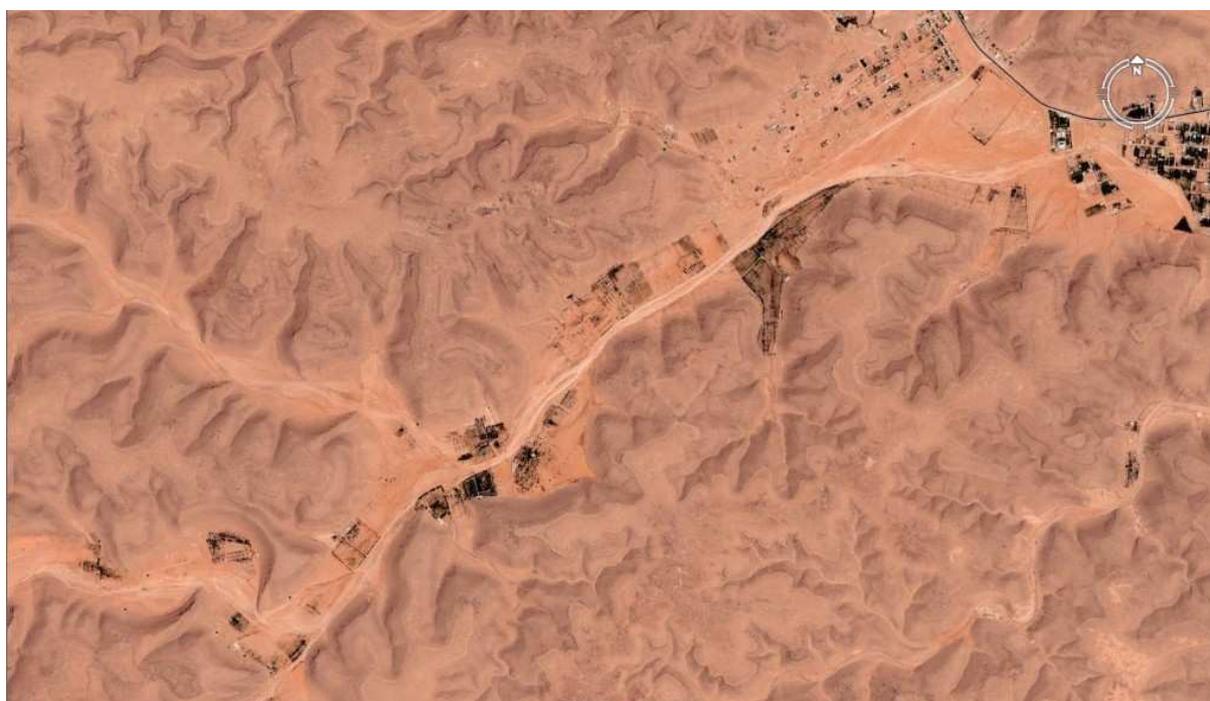
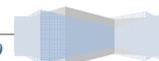


Figure IV.4 : Oued TOUZOUZ



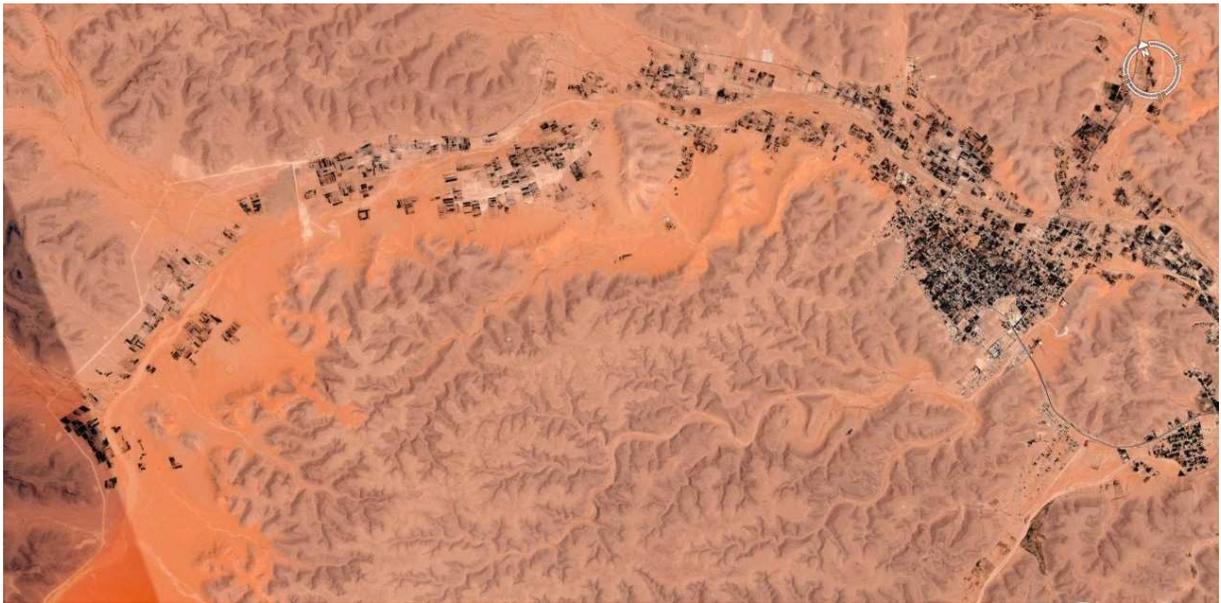
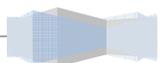


Figure IV.5 : Oued LABIOD



Figure IV.6 : Oued LAADIRA



IV.2 BUT DE L'ETUDE

Le but de notre démarche est de tenter de démontrer, à travers les différents moyens de mesures et d'analyses dont nous disposons, la vulnérabilité de l'aquifère alluvionnaire de la vallée du M'Zab.

Pour ce faire, nous allons émettre certaines hypothèses que nous essayerons de confirmer à l'aide de nos résultats.

Le développement effréné ces dernières années pour accéder à l'immense réserve d'eau que représente le réservoir fossile de l'Albien a conduit, à Ghardaïa, à la réalisation de nombre de forages profonds.

Ces forages sont, pour beaucoup, réalisés à l'amont de la ville, souvent à l'amont des principaux affluents de l'Oued M'zab qui traverse la ville et qui traditionnellement, acheminent par infero-flux l'eau nécessaire à la vie dans la palmerai de Ghardaïa et à la ville elle-même.

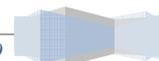
Selon notre première hypothèse, l'eau de l'Albien étant de moindre qualité que l'eau puisée directement dans l'aquifère alluvionnaire, nous tenterons d'une part, de montrer la différence de qualité entre l'eau de l'Albien et celle de la nappe alluvionnaire grâce aux différents moyens d'analyses dont nous disposons et d'autre part, de montrer l'influence des eaux de l'Albien sur celles de l'aquifère alluvionnaire.

Aussi, le développement de l'agriculture à l'amont de la ville étant de plus en plus important, nous tenterons de montrer, selon notre seconde hypothèse, l'influence de l'agriculture sur la nappe alluvionnaire en raison d'une part, de l'utilisation d'engrais et de pesticides et, d'autre part, du drainage et de l'infiltration des eaux de l'Albien, dans la nappe alluvionnaire, lors de l'irrigation des cultures.

IV.3 L'ECHANTILLONNAGE

De ce qui précède, le choix des points d'échantillonnages est le suivant :

- Tout d'abord, notre choix s'est porté sur quatre affluents majeurs le l'Oued M'Zab que sont Oued N'tissa au Sud Ouest de Ghardaïa, Oued Labiod au Nord Ouest, Oued Touzouz à l'Est et Oued Laadira au Nord.
- Sur chacun de ces affluents, nous allons sélectionner des puits à échantillonner. Les critères de sélection sont d'une part, la proximité du puits par rapport au lit mineur de l'Oued car, naturellement, nous chercherons à suivre à travers nos analyses le cheminement naturel de l'Oued et d'autre part, la fonctionnalité de celui-ci afin d'avoir les résultats les plus fiables possibles.



La démarche a été la suivante :

- Pour chaque affluent, nous nous sommes rendu à l'amont de l'Oued jusqu'à dépasser le dernier forage albien en service et la dernière exploitation agricole utilisant cette eau afin de chercher et d'échantillonner des puits étant supposés à l'abri des influences décrites précédemment.
- Une fois ce ou ces puits prélevés, nous redescendons les cours d'eau en prélevant le plus uniformément possible sur tout le long de l'Oued, des puits puisant dans l'aquifère alluvionnaire jusqu'à arriver au point de confluence avec l'Oued M'zab.

Les figures suivantes donnent les positions géographiques des différents puits échantillonnés sur les différents cours d'eau.

Sur L'Oued N'tissa, douze (12) puits ont été prélevés sur un peu plus de six (6) Km de longueur du cours d'eau jusqu'au point de confluence avec l'Oued M'zab (Figure IV.7).

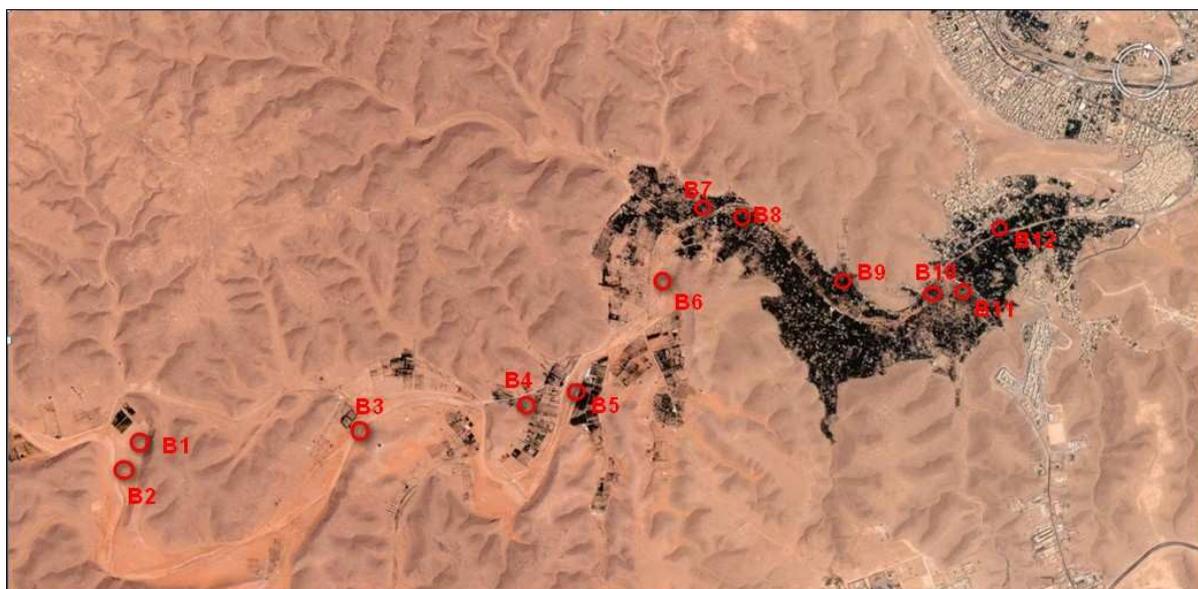
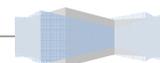


Figure IV.7 : Positions des puits sur l'Oued N'tissa.



Sur l'Oued Laadira, huit (8) puits ont été prélevés sur un peu plus de sept (7) Km de longueur du cours d'eau jusqu'au point de confluence avec l'Oued M'zab (Figure IV.8).

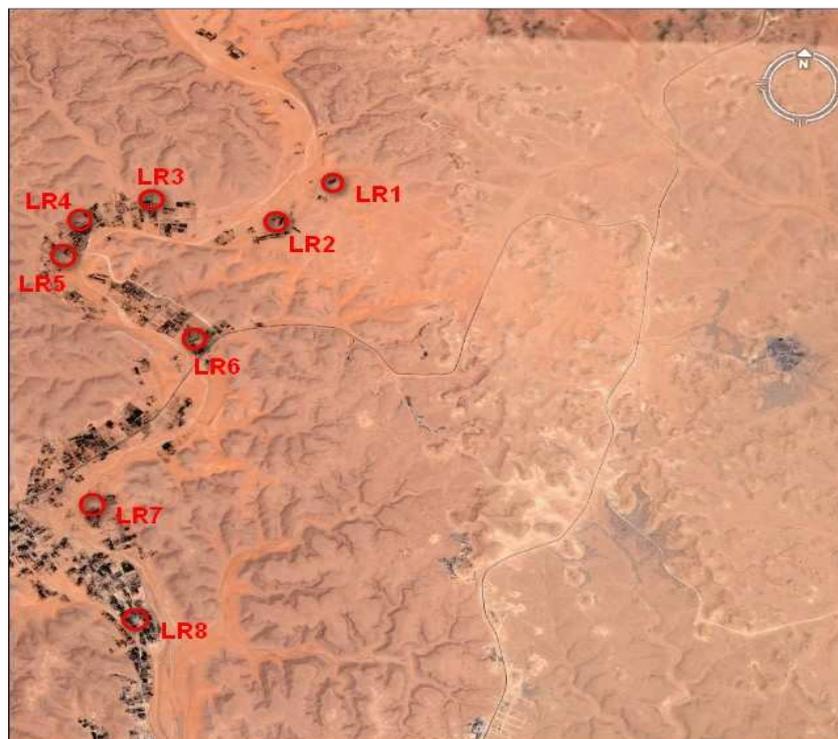


Figure IV.8 : Positions des puits sur l'Oued Laadira

Sur l'Oued Labiod, neuf (9) puits ont été prélevés sur un peu plus de onze (11) Km de longueur du cours d'eau jusqu'au point de confluence avec l'Oued M'zab (Figure IV.9).



Figure IV.9 : Positions des puits sur l'Oued Labiod

Enfin, sur l'Oued Touzouz, sept (7) puits ont été prélevés sur un peu plus de six (6) Km de longueur du cours d'eau jusqu'au point de confluence avec l'Oued M'zab (Figure IV.10).



Figure IV.10 : Positions des puits sur l'Oued Touzouz

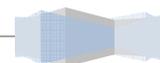
IV.4 MESURES IN SITU

La campagne de mesure des paramètres physico-chimiques des points d'eaux a été réalisée sur une période de quatre (4) jours allant du 05 juin au 08 juin 2009 à partir de 05h00 A.M. GMT.

En ajoutant le temps du trajet sur des pistes assez sinueuses et de la reconnaissance du terrain pour satisfaire les conditions citées précédemment, la première mesure était faite au environ de 07h30 A.M. GMT et les mesures continuaient de proche en proche jusqu'aux environs de 03h00 P.M. GMT avec une température moyenne d'environ 40°C à l'ombre.

Les paramètres physiques ont été mesurés *in situ*, c'est-à-dire, la température de l'eau juste après le prélèvement, la conductivité de celle-ci, les résidus secs, la salinité ainsi que le pH.

Aussi, un échantillon d'environ 50 Cl par puits a été systématiquement emporté après prélèvement à l'aide d'un échantillonneur pour la mesure des paramètres chimiques de l'eau des puits.



Il est à noter que les analyses chimiques des échantillons prélevés ont été faites quelques heures seulement après le prélèvement. Il s'agit des éléments suivants :

- Le dichlore (Cl_2)
- Les sulfates (SO_4)
- Les nitrates (NO_3)
- Les nitrites (NO_2)
- Les phosphates (PO_4)

IV.4.1 Description du matériel utilisé

Pour l'ensemble des mesures qui ont été réalisées au cours de cette campagne, les appareils de mesures proviennent en majeure partie de la compagnie HACH, le matériel étant la propriété du "Laboratoire de Recherche des Science de l'Eau de école nationale supérieure polytechnique d'Alger".

IV.4.1.1 pH meter (HACH)

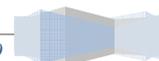
Ce mV/pH-mètre portatif *sensIONI* (Figure IV.11) est conçu pour la mesure d'échantillons sur le terrain ou en laboratoire.

L'appareil mesure le pH de l'échantillon, de -2,0 à 19,99, ainsi que sa température.

Les valeurs de pH affichées sont compensées en température grâce à la température de l'échantillon mesurée ou à une température par défaut. L'appareil mesure et affiche aussi les valeurs en mV.



Figure IV.11: pH mètre HACH.



La précision des résultats mesurés est la suivante :

Pour le pH, la précision est de 0,01% de la valeur lue.

Pour la température, si celle-ci est comprise entre 0 et 70 °C, la précision est de ± 0.3 °C et si la température est comprise entre 70 et 100 °C, elle est de ± 1.0 °C.

IV.4.1.2 Conductimètre (HACH)

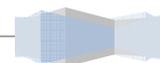
Le conductimètre sensION5 (Figure IV.12) se caractérise par un affichage LCD numérique personnalisable, affichant simultanément la température et les résultats de mesure. Cet appareil de mesure répond aux spécifications d'imperméabilité à l'eau IP67. Il offre un support d'électrode, un design ergonomique, la collecte des données et une communication RS232 pour l'impression des résultats vers un ordinateur ou une imprimante.

L'appareil de mesure peut être utilisé pour un large éventail d'applications de laboratoire. La qualité de l'eau, la salinité, les acides, les bases et d'autres échantillons aqueux peuvent être facilement analysés en conductivité avec les sondes de conductivité disponibles.

Il permet la mesure de la conductivité, des TDS (solides dissous totaux), de la température et de la salinité des échantillons.



Figure IV.12: Conductimètre mètre HACH.



La précision des résultats mesurés est la suivante :

Conductivité : $\pm 0.5\%$ de la valeur mesurée.

Solides dissous totaux : $\pm 0.5\%$ de la valeur mesurée.

Salinité : ± 0.1 ppt (de -2 à 35 °C).

Température : ± 0.3 °C de 0 à 70 °C.

± 1.0 °C > 70 à 110 °C

IV.4.1.3 Colorimeter (HACH)

Le colorimètre série DR/800 HACH illustré à la Figure IV.13 est un photomètre à filtre avec source DEL, commandé par microprocesseur pour l'analyse colorimétrique au laboratoire ou sur le terrain. L'appareil est pré-calibré pour les mesures colorimétriques courantes et permet de créer facilement des étalonnages supplémentaires pour des méthodes créées par l'opérateur ou pour les méthodes HACH futures.

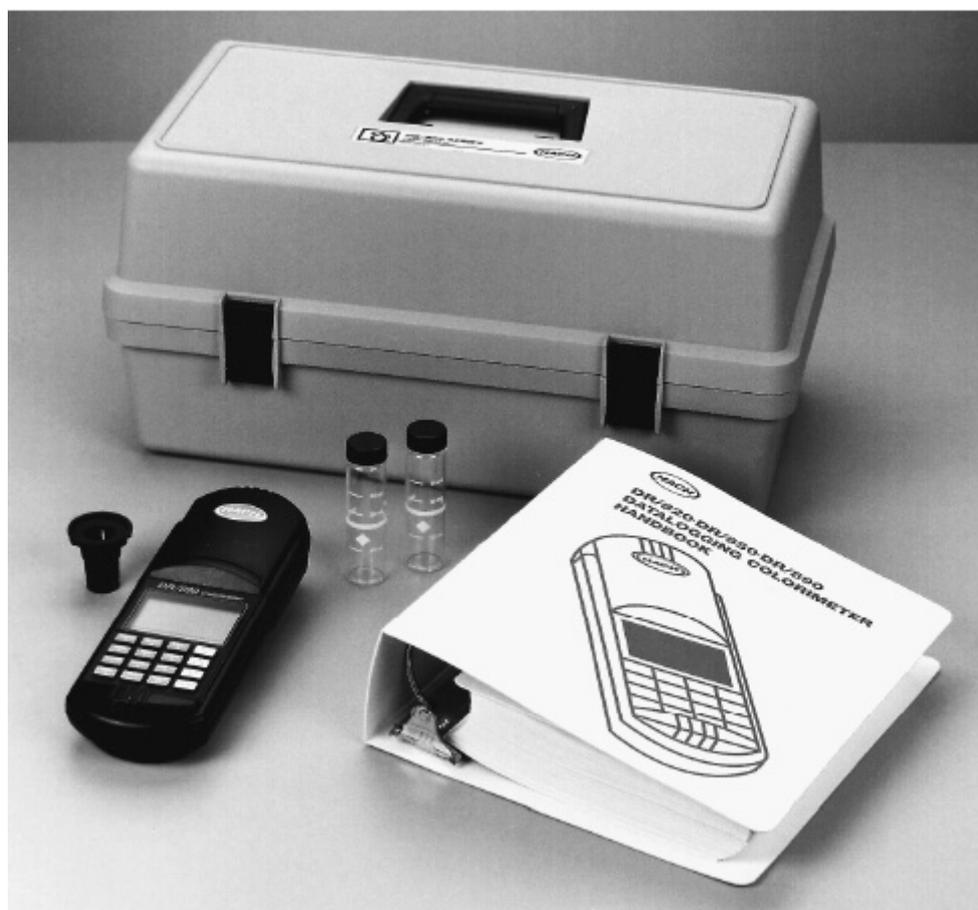
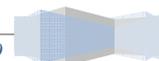


Figure IV.13 : Colorimètre HACH série DR/800.



IV.5 HYDROCHIMIE DES EAUX DES FORAGES ALBIENS

L'étude des eaux de l'Albien porte sur les résultats des analyses effectuées au niveau du laboratoire de l'EPEG Ghardaïa en 2003. Il est remarqué que pour des raisons que nous ignorons l'élément sulfate, qui est généralement l'élément dominant dans les eaux albiennes, n'a pas été dosé. De ce fait, il est impossible de soumettre les résultats des analyses chimiques au test de validité qui consiste au calcul de la déviation relative entre la somme des cations et la somme des anions et par la suite de vérifier la validité des déterminations chimiques.

IV.5.1 Les paramètres physico-chimiques

IV.5.1.1 Le pH

Les valeurs du pH obtenues pour les différents forages oscillent de 7 à 8.2. Ce sont des valeurs assez proches de la neutralité avec une légère tendance vers la basicité ce qui explique l'absence des ions CO₃.

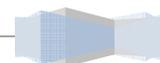
IV.5.1.2 La température

Les eaux des forages profonds sont à classer dans la catégorie des hypothermales qui regroupent les eaux dont les températures se situent entre 21 et 35°C.

Si nous admettons qu'une perte calorifique pendant l'ascension des eaux jusqu'à la surface est fort probable et que la circulation d'eaux froides dans les 400 à 500 mètres peut jouer le rôle d'un « réfrigérant », la température des eaux doit être plus élevée à l'intérieur du réservoir que celle que nous avons enregistrée à l'exutoire. Cette valeur élevée est la conséquence de la captivité de la nappe dans la région, de l'importance du temps de séjour des eaux dans l'aquifère ainsi que de la circulation profonde de ces eaux.

IV.5.2 Classification des eaux

Les nombreuses données physico-chimiques, utiles à la caractérisation d'une eau, induisent l'utilisation de représentations graphiques. L'objectif principal est de permettre une approche rapide des résultats analytiques en vue de caractériser facilement une eau, de suivre son évolution ou de la comparer à d'autres eaux de compositions physico-chimiques voisines ou de proximité géographique.



IV.5.2.1 Le diagramme de Schoeller-Berkaloff

L'application de cette méthode pratique aux eaux de la nappe albienne dans la région de Ghardaïa (figure IV.14) laisse apparaître un faisceau de droite qui met en évidence une similitude chimique presque parfaite entre les différents échantillons.

Le graphe permet en outre de classer ces eaux dans la catégorie de potabilité médiocre.

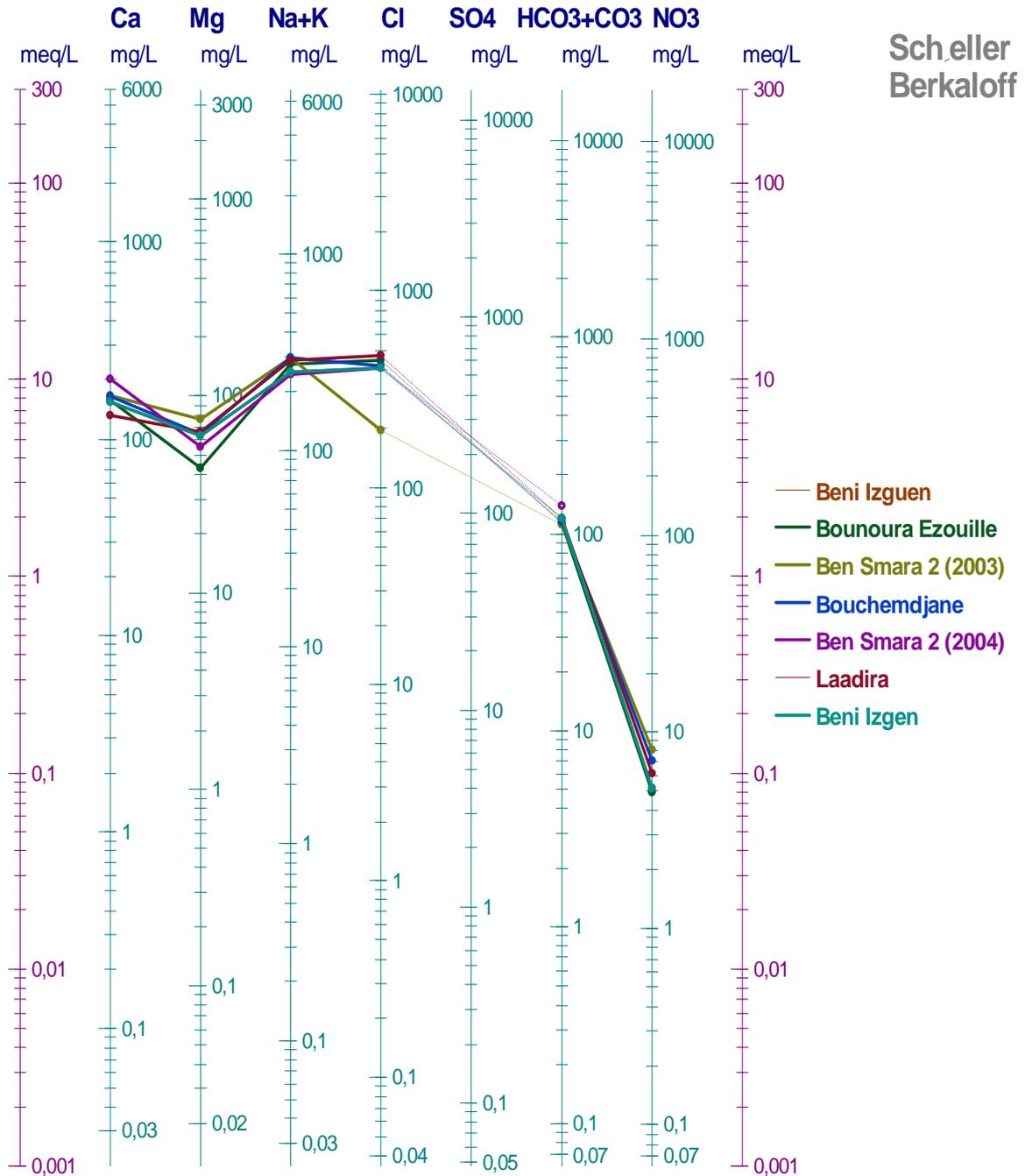
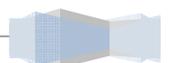


Figure IV.14 : Représentation graphique des eaux de l'aquifère Albien sur le diagramme Schoeller-Berkaloff.



IV.5.2.2 Le diagramme de piper

La représentation des analyses des eaux albiennes sur le diagramme de Piper (figure IV.15) fait ressortir un faciès *chloruré et sulfaté calcique*.

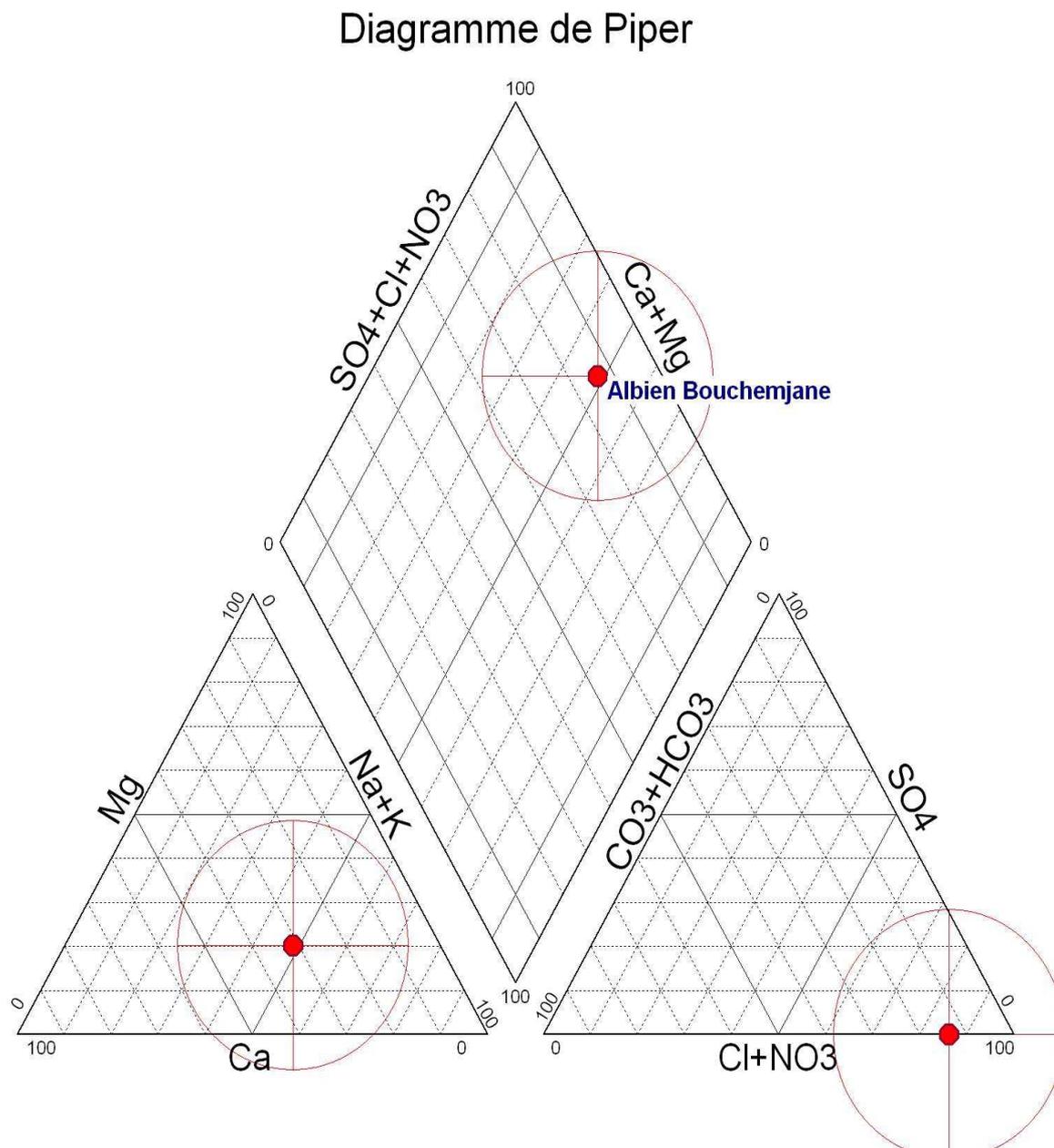


Figure IV.15 : Représentation graphique des eaux de l'aquifère Albien sur le diagramme Piper.

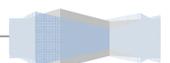


Plusieurs facteurs se sont associés pour que les eaux de l'Albien soient chimiquement moyennement chargées il s'agit :

- Du temps de séjour très important.
- De l'écoulement en contact avec les formations argileuses sous forme d'intercalations dans les grès et les formations carbonatées et marneuses formant le toit de l'aquifère.
- De la grandeur de la surface de contact entre la roche magasin et les eaux. Cette surface est naturellement proportionnelle à la longueur du trajet des eaux souterraines et à l'épaisseur du réservoir.
- De la température élevée des eaux, qui a pour rôle d'activer la dissolution de certains sels, tels que le CaSO_4 , le CaCO_3 et le $(\text{Mg}, \text{Ca})\text{CO}_3$.
- Ainsi que de la pression considérable exercée par les formations plus récentes sur l'aquifère mettant la nappe en charge.

Ces éléments ont contribué, avec des degrés différents, pour que les ions soient ordonnés de la façon suivante :

$$\begin{array}{ll} r_{\text{Ca}} > r_{\text{Mg}} > r_{(\text{Na}+\text{K})} & \text{pour les cations.} \\ \text{et } r_{\text{Cl}} > r_{\text{SO}_4} > r_{\text{HCO}_3} & \text{pour les anions.} \end{array}$$



IV.6 HYDROCHIMIE DES EAUX DE LA NAPPE ALLUVIALE**IV.6.1 Les paramètres physiques****IV.6.1.1 Le pH et la température**

Les tableaux suivants regroupent les résultats de l'ensemble des analyses faites sur le pH et la durant notre campagne ainsi que les températures correspondantes.

Tableau IV-1: Résultats de la mesure du pH et de la température sur Oued N'tissa.

<i>Puits</i>	<i>Ph</i>	<i>Température (°C)</i>
B1	7.62	24.7
B2	7.63	28.5
B3	7.65	24.9
B4	7.54	26.2
B5	7.34	21.6
B6	7.56	25.1
B7	6.9	27.1
B8	7.26	26.9
B9	6.77	25.4
B10	7.62	25.5
B11	7.65	25.1
B12	6.94	26.8

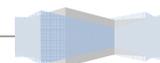


Tableau IV-2 : Résultats de la mesure du pH et de la température sur Oued Laadira

<i>Puits</i>	<i>pH</i>	<i>Température (°C)</i>
LR1	7.72	25.4
LR2	7.53	24.5
LR3	7.60	27.1
LR4	7.20	25.1
LR5	7.33	25.8
LR6	7.36	25.3
LR7	7.16	27.3
LR8	7.30	24.3

Tableau IV-3 : Résultats de la mesure du pH et de la température sur Oued Labiod

<i>Puits</i>	<i>pH</i>	<i>Température (°C)</i>
L1	7.77	23.8
L2	7.69	23.7
L3	7.39	23.8
L4	7.66	24.2
L5	7.46	27.3
L6	7.44	27.1
L7	6.97	26.5
L8	6.94	23.1
L9	7.23	26.0

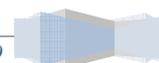


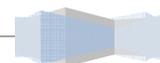
Tableau IV-4 : Résultats de la mesure du pH et de la température sur Oued Touzouz

<i>Puits</i>	<i>pH</i>	<i>Température (°C)</i>
T1	7.22	25.7
T2	7.21	24.5
T3	7.25	25.2
T4	7.41	24.3
T5	7.23	24.9
T6	7.35	25.8
T7	7.40	25.1

Nous pouvons distinguer que les pH varient de 6.9 à 7.7 et que les températures des eaux oscillent entre 21°C et 27°C. Elles n'atteignent que rarement 28°C.

IV.6.2 Les paramètres chimiques

Les résultats des analyses chimiques effectuées à partir des échantillons prélevés sur la zone d'étude lors de notre campagne de juin 2009 sont répertoriés dans un tableau Excel dans l'annexe.



IV.7 Comparaison des eaux Albiennes et alluvionnaires

IV.7.1 Le diagramme de Schoeller-Berkaloff

Le diagramme suivant (Figure IV.16) est une représentation, à l'aide du diagramme de Schoeller-Berkaloff, du faciès des eaux provenant de l'Albien et de celles provenant de l'aquifère alluvionnaire.

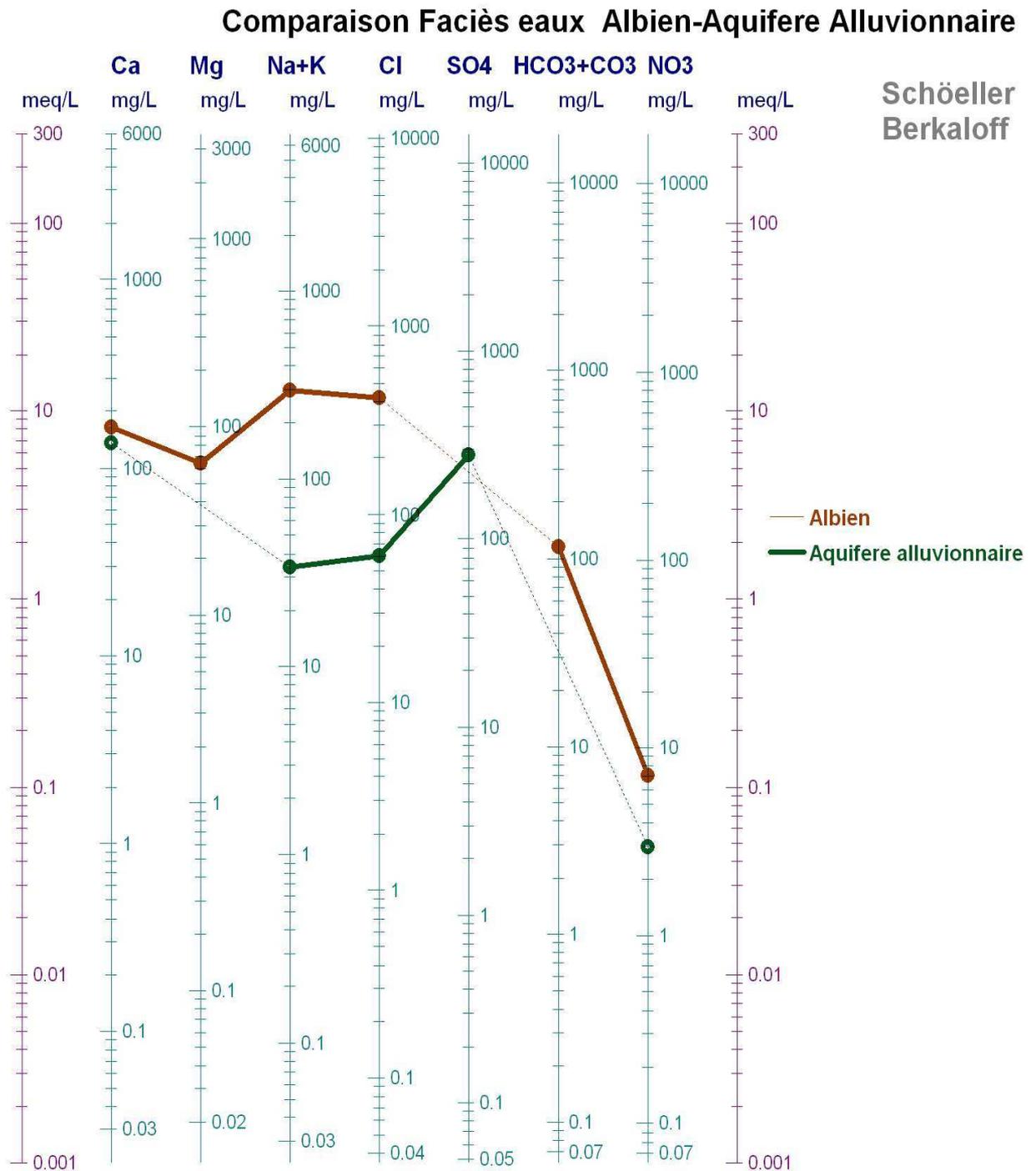
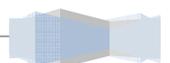


Figure IV.16 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff des eaux de l'Albien et de l'aquifère alluvionnaire.



Le diagramme montre clairement la différence de faciès entre les eaux provenant de l'Albien et celles provenant de l'aquifère alluvionnaire. Cette différence se caractérise notamment par la grande variation des concentrations du chlore et du sodium, différence d'un facteur de 10, et influençant fortement les paramètres physique de ces eaux.

Des interprétations précédentes, nous pouvons clairement dire que les eaux de l'albien et celle de la nappe superficielle sont très différentes de par les éléments dissous qu'elles contiennent d'une part, et de la quantité de ceux-ci d'autres parts.

Ceci étant dit, la salinité des eaux de l'albien est beaucoup plus importante que celle de l'aquifère de surface.

Nous venons de montrer de manière exhaustive que l'eau de l'albien est de moins bonne qualité que celle de l'aquifère de surface et qu'un mélange des deux eaux serait néfaste d'une part, pour l'agriculture car cela entraînerait à moyen ou long terme des dépôts salin qui réduirait sensiblement le rendement agricole et d'autre part pour la population qui consomme cette eau de surface qui pourrait devenir très rapidement impropre à la consommation.

IV.7.2 Calcul du SAR de l'Albien

Calculons le SAR d'une eau provenant de l'Albien avec celui d'une eau provenant de l'aquifère alluvionnaire.

➤ Pour l'eau de l'Albien :

Nous avons les valeurs suivantes : $[Ca^{2+}] = 165,9 \text{ mg/L}$, $[Mg^{2+}] = 76,2 \text{ mg/L}$, $[Na^+] = 165,9 \text{ mg/L}$

En convertissant ces valeurs en méq/L, nous obtenons :

$$[Ca^{2+}] = \frac{165,9}{40} \text{ ce qui donne : } [Ca^{2+}] = 8,295 \text{ méq/L}$$

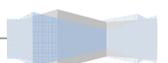
$$[Mg^{2+}] = \frac{76,2}{24} \text{ ce qui donne : } [Mg^{2+}] = 6,350 \text{ méq/L}$$

$$[Na^+] = \frac{165,9}{23} \text{ ce qui donne : } [Na^+] = 7,21 \text{ méq/L}$$

Ce qui nous permet de calculer le SAR :

Applications numériques :

$$S.A.R = \frac{7,21}{\sqrt{\frac{8,295 - 6,350}{2}}} \quad \text{Pour l'Albien, le SAR} = 7,31$$



Quand le SAR se situe entre 6 et 9 ce qui est notre cas ici, les risques de problème reliés avec la perméabilité du sol augmentent. Dans ce cas, le sol devrait être échantillonné tous les 1 ou 2 ans pour déterminer si l'eau augmente la teneur en sodium du sol.

Aussi, lorsque l'eau d'irrigation est saline, une valeur de SAR encore plus basse devrait être utilisée. Les problèmes dus au sodium sont aussi reliés à la concentration totale en sel de l'eau d'irrigation. Par conséquent, des eaux d'irrigation avec des salinités entre 1,5 et 3,00 mS/cm (2,4 pour notre eau) avec un SAR au-dessus de 4 doivent être utilisées avec prudence

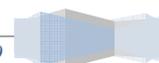
IV.7.3 Effet de la crue du 1^{er} octobre 2008

L'histogramme (Figure IV.17) représente les variations, pour un même puits, des paramètres physico-chimiques de l'eau avant et après la crue d'octobre 2008. Il fait apparaître une baisse sensible de la quantité des paramètres physico-chimiques et donc, d'éléments dissous dans cette eau.

Ceci est dû au lessivage de la crue qui était principalement constituée d'eau de pluie dont la minéralisation et la teneur en éléments chimiques est quasiment nulle et qui s'approche beaucoup des caractéristiques d'une eau distillée.

La crue ayant affectée l'ensemble de notre zone d'étude, nous nous devons de prendre les résultats qui suivent avec beaucoup de soin.

Les résultats obtenus lors de notre campagne et les conclusions qui en découleront devraient être affectés d'un facteur amplificateur pour estomper l'effet de la crue et ainsi avoir des résultats et surtout des conclusions viables à long terme et qui représentent de manière plus fidèle la réalité des choses.



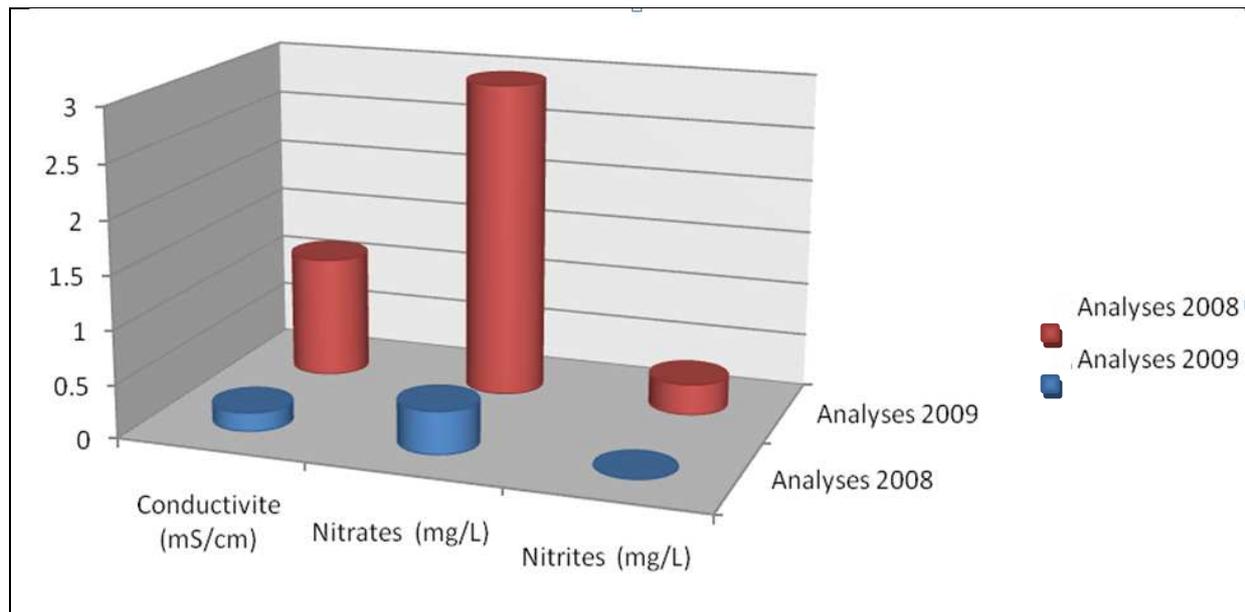


Figure IV.17 : Variation de paramètres physico-chimiques de l'eau du puits Moussa ou Slimane de Beni-Izgene avant et après la crue d'octobre 2008.

IV.8 VARIATIONS SPATIALES DE LA CONDUCTIVITE

Sur les figures suivantes, nous pouvons voir la variation spatiale de la conductivité de l'amont des oueds jusqu'à leurs points de confluence avec l'Oued M'zab.

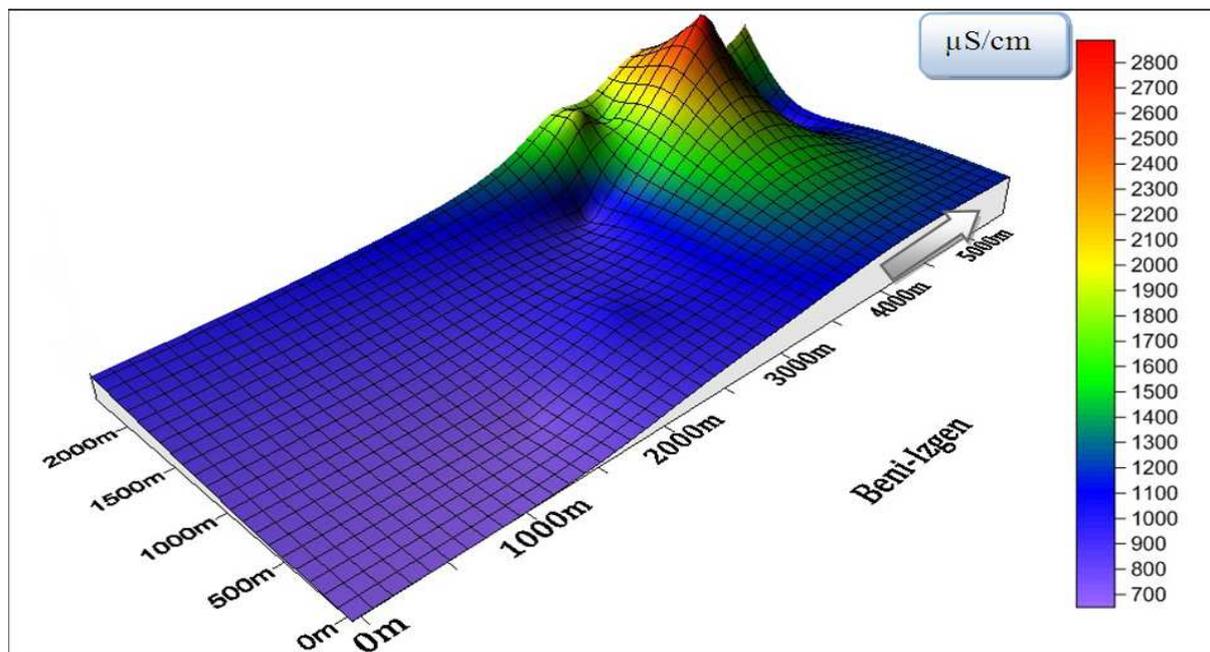
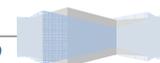


Figure IV.18 : Variation de la conductivité le long de l'oued N'tissa.



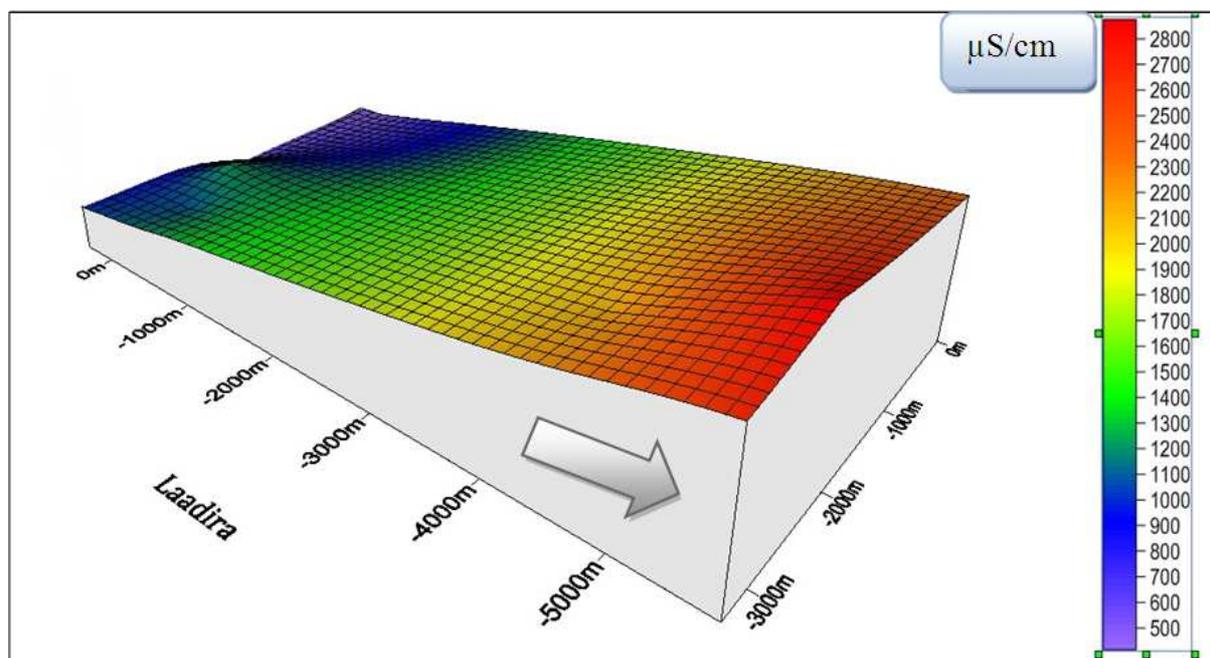


Figure IV.19 : Variation de la conductivité le long de l'oued Laadira.

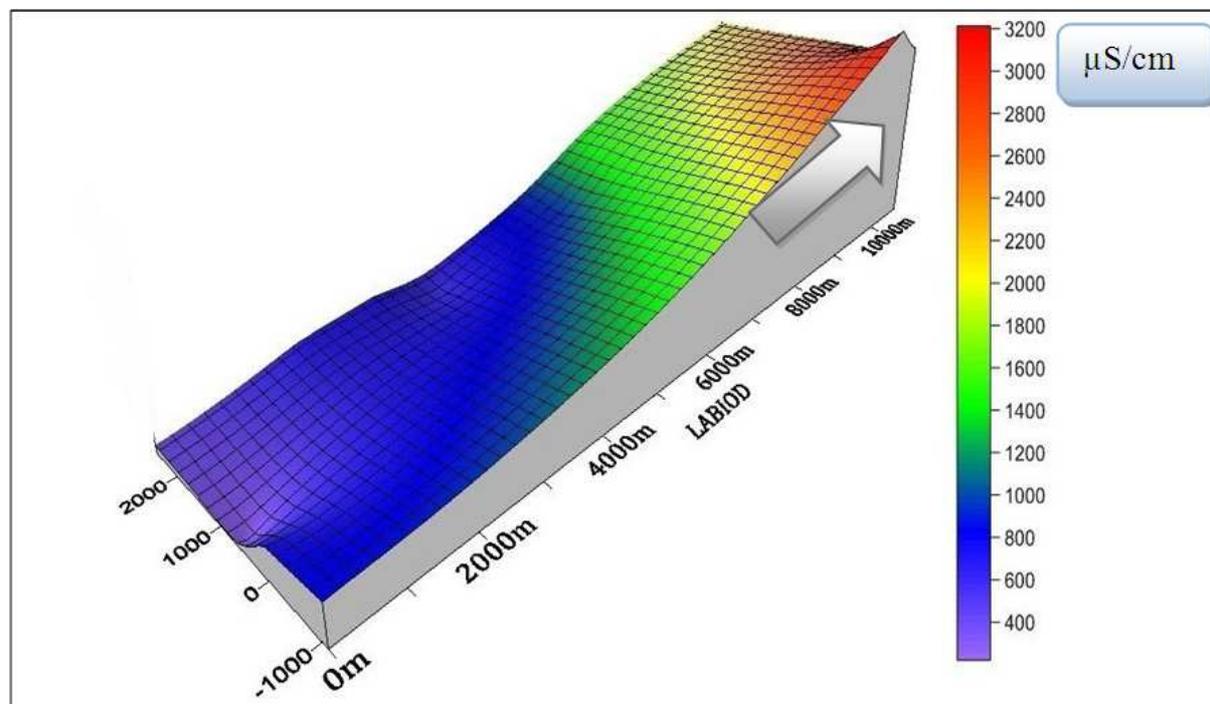
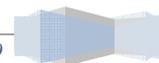


Figure IV.20 : Variation de la conductivité le long de l'oued Labiod.



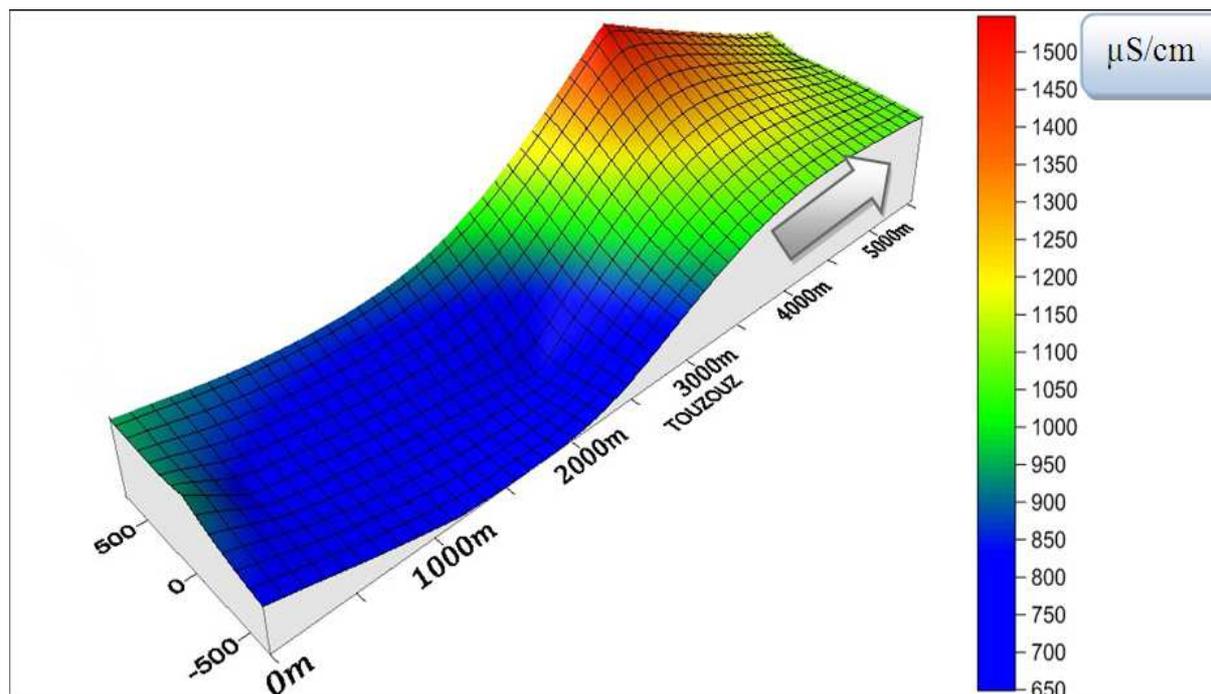


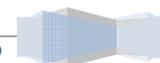
Figure IV.21 : Variation de la conductivité le long de l'oued Touzouz.

IV.8.1 Description des résultats

D'après les quatre représentations précédentes, à savoir les figures IV.18, IV.19, IV.20 et IV.21, nous remarquons que la tendance de la variation de la conductivité sur les quatre affluents est identique dans la forme. C'est à dire que la teneur en éléments électriquement chargés que sont les anions et les cations varie de la même manière sur les quatre affluents en fonction de l'éloignement du point de confluence.

Ces représentations nous montrent clairement que la conductivité des eaux prélevées augmente depuis le point le plus à l'amont de l'affluent qui est aussi, par hypothèse, le point qui est à l'abri de toute influence, jusqu'à arriver à des maximums au niveau des points de confluences.

Les valeurs de la conductivité, aux points extrêmes, atteignent respectivement à Laadira et Labiod les valeurs de 2900 et 3200 μ S/cm, valeurs qui, selon l'organisation mondiale de la santé, sont au dessus des normes préconisées pour la potabilité de l'eau.



IV.8.2 Interprétations des résultats

La variation de la conductivité précédemment peut s'expliquer de deux manières différentes :

- La première résulte du fait que les premiers points mesurés le plus à l'amont ne sont soumis, de visu sur le terrain, à aucune influence et que les points qui suivent quand à eux sont soumis à l'influence grandissante de plusieurs forages du C.I. (Albien) qui se multiplient aux furs et à mesure que l'on descend les cours d'eaux vers les points de confluences.
- La seconde est liée de très près à la première et n'est autre que l'agriculture. En effet, l'agriculture étant dépendante de l'eau, elle est concentrée au niveau des forages Albien. D'une part, l'irrigation des cultures avec les eaux de l'Albien qui, rappelons-le, ont une salinité très importante, s'infiltrent dans l'aquifère de surface et le contamine et, d'autre part, emporte avec elles une partie des engrais utilisés par les agriculteurs et augmentent ainsi la conductivité de la nappe de surface ce qui la rend impropre à la consommation.

Cependant, ces résultats sont à interpréter avec beaucoup de minutie en raison de la crue du 1^{er} octobre 2008 qui, comme nous l'avons montré (IV.7.2), a fortement atténué les valeurs des différents paramètres.

IV.9 VARIATIONS SPATIALES DES NITRATES

Sur les figures suivantes, nous pouvons voir la variation spatiale des nitrates de l'amont des oueds jusqu'à leurs points de confluence.

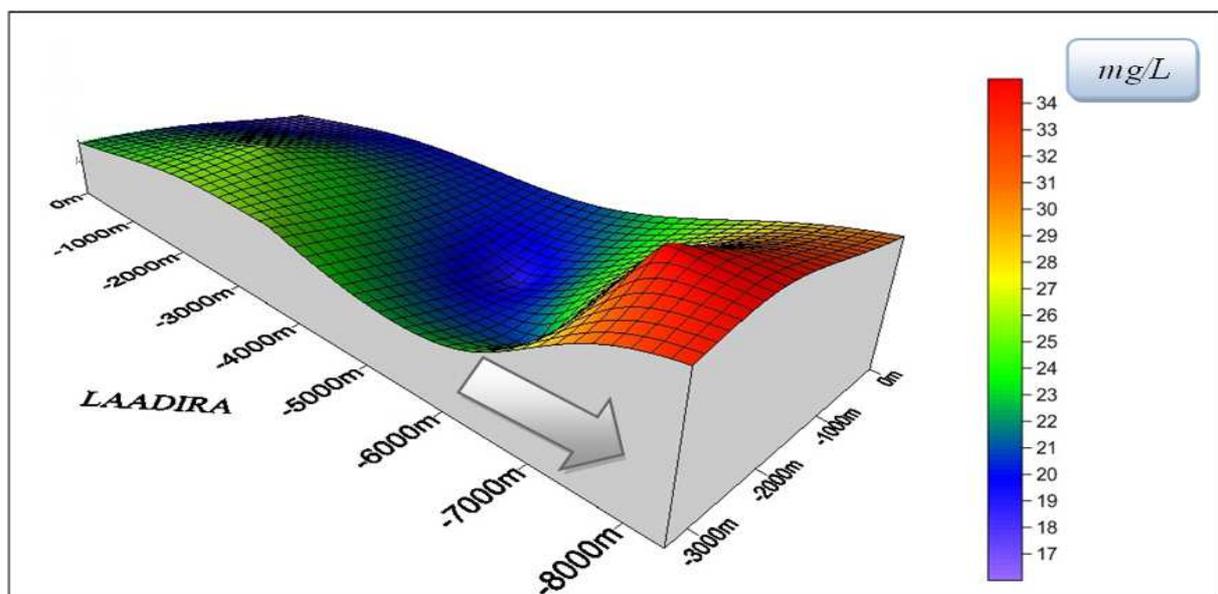


Figure IV.22: Variation de la concentration des nitrates le long de l'oued Laadira.

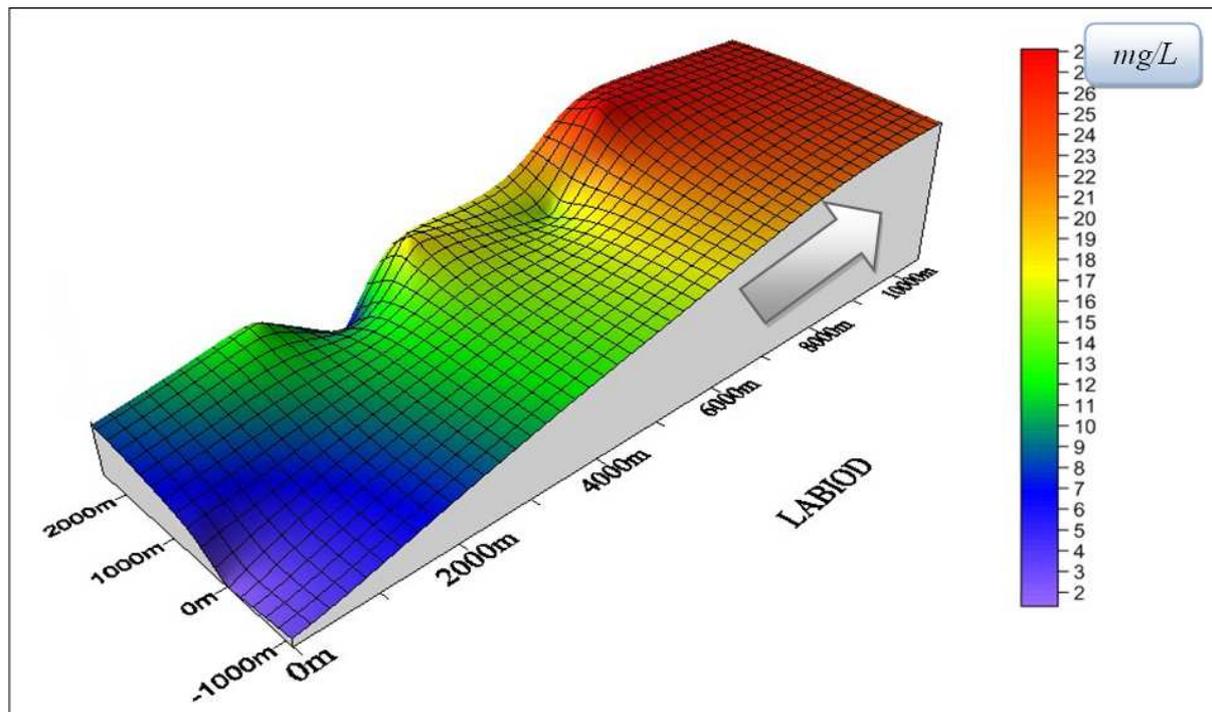


Figure IV.23 : Variation de la concentration des nitrates le long de l'oued Labiod.

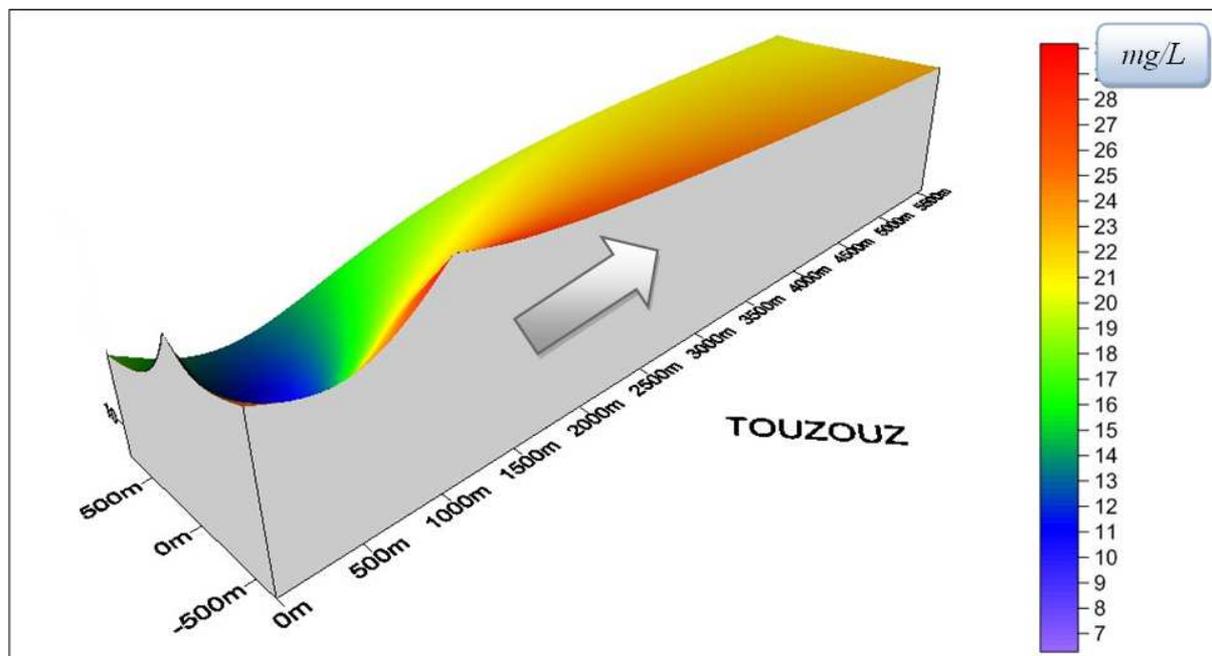
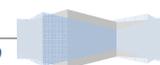


Figure IV.24 : Variation de la concentration des nitrates le long de l'oued Touzouz.



IV.9.1 Descriptions des résultats

D'après les représentations précédentes, à savoir les figures IV.22, IV.23 et IV.24, nous remarquons que la tendance de la variation de la concentration des nitrates sur les affluents est identique dans la forme. C'est à dire que la concentration en nitrates varie de la même manière sur les quatre affluents en fonction de l'éloignement de l'exutoire.

Ces représentations nous montrent clairement que la concentration en nitrates des eaux prélevées augmente depuis le point le plus à l'amont de l'affluent qui est aussi, le point par hypothèse qui est à l'abris d'influences, jusqu'à arriver à des maximums au niveau des points de confluences.

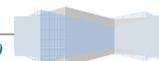
Les valeurs de la concentration en nitrates, aux points extrêmes, atteignent respectivement à Laadira et Labiod les valeurs de 34 et 28 mg/L, valeurs qui, selon l'organisation mondiale de la santé, sont en dessous des normes préconisées pour la potabilité de l'eau mais ces résultats sont à interpréter avec beaucoup de minutie en raison de la crue du 1er octobre 2008 qui, comme nous l'avons montré (IV.7.2), a fortement atténué les valeurs des différents paramètres dont la concentration en nitrates.

IV.9.2 Interprétations des résultats.

La variation de la concentration de nitrates peut s'expliquer de la manière suivante :

Elle est liée de très près à la présence de forages Albien. En effet, l'agriculture étant dépendante de l'eau, elle est concentrée au niveau des forages Albien. D'une part, l'irrigation des cultures avec les eaux de l'Albien qui, rappelons-le, ont une salinité très importante s'infiltrent dans l'aquifère de surface et le contamine et emportent avec elles une partie des engrais utilisés par les agriculteurs et augmentent ainsi la concentration en nitrates de la nappe de surface ce qui la rendra à court voir à moyen terme impropre à la consommation.

Aussi, les eaux usées ont leurs parts de responsabilité dans ce qui précède car en l'absence de système de drainage efficace, elles s'infiltrent dans le sol et sont parfois directement injectées dans les puits qui mènent vers la nappes et la contamine à *fortiori*.



IV.10 CONCLUSION ET RECOMMANDATIONS

Nous venons de voir que la nappe superficielle est largement influençable et influencée par l'activité humaine en générale et l'agriculture en particulier.

De plus, les résultats qui précèdent ont largement été atténués en raison de la crue du 1^{er} octobre 2008 qui a lessivé l'aquifère superficielle constitué de la nappe du Turonien et de l'alluvionnaire.

Aussi, étant donné l'expansion démographique et agricole dans la région, si les causes citées précédemment ne sont pas neutralisées, nous courrons à court terme, voir à moyen terme à une contamination de la nappe jusqu'à arriver à un seuil de non-potabilité et surtout, elle tendra à devenir tout simplement non-utilisable et les habitants de la région seraient ainsi privés d'une des rares ressources d'eau potable, eau pourtant si précieuse dans un désert.

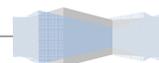
Les recommandations sont les suivantes :

Il serait capital pour la protection de l'écosystème de la vallée du M'zab :

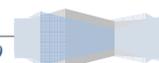
- D'exploiter convenablement le réseau d'assainissement et les stations de traitements d'eaux usées réalisées ou en cours de réalisation dans la vallée, car ce système élimine une source de nuisance importante vu le taux d'urbanisation de la vallée, urbanisation qui, soit dit en passant, ne cesse d'augmenter.
- De concevoir un modèle de gestion des eaux souterraines et de surface en faisant jouer à chaque type de ressources le rôle le plus bénéfique possible cela en prenant en compte en particulier le chimisme des eaux et les apports solides.

En période de sécheresse, et pour l'irrigation des cultures, les eaux albiennes peuvent servir uniquement d'appoint aux eaux de la nappe alluvionnaire et pas, comme cela se fait actuellement, de source principale d'alimentation pour l'irrigation des surfaces agricoles.

- D'introduire les techniques d'irrigation modernes les plus adéquates et les moins consommatrices d'eau tout en généralisant le système d'épandage des crues à tous les périmètres créés ou en voie de création.
- Orienter le choix des cultures agricoles vers des cultures à rendement optimum vu la quantité d'eau disponible comme la phoeniciculture.



- D'étendre l'opération de restauration et de réhabilitation non seulement aux puits d'exhaure mais aussi à ceux destinés à la réalimentation de la nappe au moment des crues (puits capteurs d'eaux), cela pour un meilleur fonctionnement de la nappe alluviale.
- Enfin, il serait intéressant de favoriser les nouvelles implantations agricoles à l'aval de la vallée afin de préserver la palmeraie de Ghardaïa des influences de l'utilisation des engrais agricoles et ainsi protéger ce qui est classé par l'UNESCO comme patrimoine mondiale.



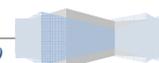
CONCLUSION GENERALE

La présente étude constitue un point de départ pour l'évaluation de la réhabilitation de l'aquifère de surface de la vallée du M'zab. Notre objectif était de montrer la vulnérabilité de cet aquifère face aux activités humaines dans la région et les conséquences qu'elles impliquent.

Nous avons pu constater que cette nappe à la géologie si particulière est très sensible d'une part, aux activités agricoles étant donné les concentrations de nitrates que nous avons mesuré et d'autre part, aux eaux du continental intercalaire qui en se mélangeant aux eaux plus douces de l'aquifère, augmentent sa salinité, la rendant impropre à la consommation.

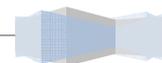
Nous avons ressenti lors de nos différentes campagnes de mesure, sur des puits privés rappelons-le, que la population locale, principalement les agriculteurs, est très sensible à ce problème de contamination de la nappe. Mais nous avons aussi constaté qu'elle manque beaucoup d'informations et nous espérons qu'avec toute la bonne volonté qui les anime, les recommandations émises dans ce document seront intégrées, de manière durable, dans les comportements des populations locales afin d'aboutir à une utilisation raisonnable sur la durée des ressources hydriques de la région.

A l'avenir, suite aux recommandations données dans le document, nous espérons que cette étude servira de tremplin pour une éventuelle réhabilitation et que l'eau de l'aquifère de surface de la vallée du M'zab redevienne une source d'eau potable comme elle l'a traditionnellement toujours été.



BIBLIOGRAPHIE

1. **BG engineering conseils & ENHPC** (1996). "Etude hydrologique de l'oued M'Zab", 194 pages.
2. **Carlier, M.** (1980). "Hydraulique générale et appliquée", Edition Eyrolles, 565 Pages.
3. **Fernand, Joly**, (4/2006). "Les eaux sauvages des régions arides. Notions de base sur l'hydrologie des déserts".
4. **Hariz, A.** (2008). "Palmerai de Guerrara, espace naturel et culturel à sauvegarder " Association pour la sauvegarde du patrimoine, 30 pages.
5. **Lemarchand, F.** (07/2008). "Les nappes fossiles du Sahara" Dossier spécial *La Recherche* N°421.
6. **Meddi, M.; Labadi, A.S. & Dali, A.** (05/2008), " Mission de reconnaissance, système hydraulique de la vallée du m'zab", 5 pages.
7. **Nouh-Mefnoune, B.** (2006). "Contribution a la stratigraphie de la barre carbonatée cénomano-turonienne de la plate-forme saharienne : étude des affleurements de Ghardaïa (Dorsale du M'zab) ", Mémoire de projet de fin d'études, USTHB, 136 pages.
8. **Organisation mondiale de la santé**, (1996). "*Guidelines for drinking-water quality*", OMS Genève, 2nd ed. Vol. 2.
9. **OSS**, (2003). "Système aquifère du Sahara septentrional - gestion commune d'un bassin transfrontière".
10. **Ould Baba Sy, M.** (2005). "Recharge et paléorecharge du système aquifère du Sahara septentrional", thèse de doctorat, université de Tunis.
11. **Roche, M.** (1989). "Dictionnaire français de l'hydrologie de surface ", 383 pages.



WEBOGRAPHIE

1. www.who.int (World Health Organization).
2. www.epfl.ch (Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne).
3. www.hach.com (Hach company)
4. www.ird.fr (Institut de recherche et développement)



ANNEXES

ANNEXES

Ci-joint à ce mémoire de projet de fin d'études un DVD-ROM contenant les annexes suivantes :

- Un fichier Excel contenant les caractéristiques de 256 puits recensés lors de la première campagne de mesure piézométrique d'avril 2009 à Ghardaïa, plus précisément au niveau de la palmeraie de Ghardaïa. Il est à noter que ce fichier Excel contient des liens hypertextes au niveau des numéros des puits qui, en cliquant dessus, renvoie à une photographie du puits en question.

- Un deuxième fichier Excel contenant les résultats des analyses chimiques de notre campagne de juin 2009 portant sur des puits se trouvant sur tout le long de quatre affluents de l'Oued M'Zab, c.à.d. Oued Ntissa, Oued Touzouz, Oued Labiod et Oued Laadira. Il est à noter que ce fichier Excel contient des liens hypertextes au niveau des noms des puits qui, en cliquant dessus, renvoie pour la plupart à une photographie du puits en question, puits qui, soit dit en passant, sont clairement localisés sur les figures IV.7, IV.8, IV.9 et IV.10 du chapitre IV.