



Université d'Oran2, M.B.  
Faculté des Sciences de la Terre et de l'Univers

## **MEMOIRE**

Pour l'obtention du diplôme de Master  
en Sciences de la Terre  
Option : Hydrogéologie

**Etude du contexte hydrogéologique de la source Anatra  
(Commune de Chorfa, Sig, Wilaya de Mascara)**

Présenté et soutenue publiquement par :  
M. KHELOUFI ATTOU Ahmed

Devant le jury composé de :

M. HASSANI M. Idriss	Professeur	Univ. Oran 2	Président
Mme MEBROUK Naïma	Professeur	Univ. Oran 2	Rapporteur
Mme ABLAOUI Halima	M.A.A	Univ. Oran 2	Examineur

Année 2021

# **REMERCIEMENTS**

## Remerciements

Avant tout, je remercie **DIEU** le tout puissant qui m'a donné la santé et la volonté d'entamer et de terminer ce mémoire.

Tout d'abord, ce travail ne serait pas aussi riche et n'aurait pas pu avoir le jour sans l'aide et l'encadrement de Mme **MEBROUK Naïma**, On la remercie pour la qualité de son encadrement exceptionnel, pour sa patience, sa rigueur et sa disponibilité durant notre préparation de ce mémoire. C'est un honneur pour moi de voir dans mon jury Monsieur **HASSANI M. Idriss** et Mme **ABLAOUI Halima**. Qu'ils soient vivement remerciés.

Mes remerciements à tous les enseignants et personnels du Département des Sciences de la Terre et de l'Univers de l'Université d'Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, et en particulier l'équipe du laboratoire LPSP.

Je tiens aussi à exprimer toute ma gratitude au personnel de la direction de l'exploitation du barrage Cheurfa II notamment son directeur **GOUJLAL Abdelkader**, et l'ADE de Mascara, en particulier Mme **INAR**. J'adresse aussi mes remerciements au directeur du laboratoire d'analyse de la qualité d'Oran Monsieur **AYAT Mohamed**.

Mes vifs remerciements s'adressent à ma famille, mon père, ma mère (Allah yerhamha), mon épouse qui m'a soutenu tout au long de mon travail, à mes enfants (**Mohamed Amine** et **Yacine**), mon frère, mes sœurs, mes beaux frères et mes belles sœurs.

Enfin, un grand merci à tous ceux qui ont contribué de près ou de loin à l'achèvement de ce modeste travail.

## SOMMAIRE

Remerciement	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Liste des acronymes et abréviation	
Introduction générale.....	1

### Chapitre I : Présentation générale et cadre climatique

Introduction .....	3
1. Généralités .....	3
1.1. Aquifère.....	3
1.2. Nappe.....	3
1.3. Sources.....	4
1.3.1. Sources d'une nappe libre.....	4
1.3.2. Sources d'une nappe captive.....	5
1.3.3. Sources d'une nappe karstique.....	5
2. Situation géographique.....	6
3. Réseau hydrographique.....	7
4. Cadre climatique .....	8
4.1. Aperçu général sur le climat de la région d'étude .....	9
4.2. Etude des précipitations.....	9
4.2.1. Précipitations moyennes mensuelles .....	9
4.2.2. Précipitations saisonnières.....	10
4.2.3. Précipitations moyennes annuelles.....	11
4.3. Etude des températures.....	12
4.4. Relation température précipitation .....	13
4.5. Evapotranspiration annuelle par la méthode de Thornthwaite .....	14
4.6. Les indices climatiques.....	15
4.6.1. Indice de De Martonne.....	15
4.6.2. Indice climatique d'Emberger.....	17
5. Conclusion.....	18

### Chapitre II : Cadre géologique et hydrogéologique

Introduction .....	19
1. Lithostratigraphie .....	19
1.2. Secondaire .....	19
1.2.1. Trias.....	19
1.3. Tertiaire : .....	20
1.3.2. Oligocène .....	20
1.3.3. Miocène.....	20
1.3.3.1. Miocène moyen .....	20
o Serravalien.....	20
1.3.3.2. Miocène supérieur .....	21
1.3.3.2.1. Tortonien .....	21
1.3.3.2.2. Messinien .....	22
1.4. Le quaternaire .....	22
2. Aperçu structural.....	24
3. Propriétés hydrogéologiques des formations .....	26
4. Etat d'émergence de la source Anatra .....	29
5. Conclusion.....	31

## Chapitre III : Etude hydrodynamique

Introduction .....	32
1. Débits de la source anatra .....	32
2. Hydrogramme de la source anatra .....	33
3. Aire d'alimentation .....	33
4. Identification des caractéristiques de la source .....	34
4.1. Indice de variabilité .....	34
4.2. Débits classés .....	35
4.3. Analyse de la courbe de récession .....	37
4.4. Diagramme de Mangin .....	39
5. Analyses corrélatrices et spectrales .....	41
5.1. Paramètres de caractérisation du comportement du système .....	42
5.2. Autocorrélation .....	42
5.3. Analyse corrélatrice croisée .....	44
5.4. Analyse spectrale .....	45
6. Conclusion .....	45

## Chapitre IV : Etude hydrochimique

Introduction .....	46
1. Données hydrochimiques disponibles .....	46
2. Paramètres physiques .....	46
2.1. Température .....	46
2.2. Potentiel d'hydrogène (pH) .....	47
2.3. Conductivité .....	47
3. Paramètres chimiques .....	48
3.1. Balance ionique .....	48
3.2. Les éléments majeurs .....	49
3.2.1. Les cations .....	49
3.2.2. Les anions .....	50
3.3. Alcalinité .....	51
3.4. Dureté totale .....	52
3.5. Indice de déséquilibres chloro-alcalin (I.D.C) .....	52
3.6. Indice de saturation (I.S) .....	53
3.7. Pression partielle de gaz carbonique $pCO_2$ .....	54
3.8. Rapport d'adsorption du sodium SAR .....	54
3.9. Classification des eaux de la source .....	55
3.9.1. Représentations graphiques .....	55
3.9.1.1. Digramme de Piper .....	56
3.9.1.2. Digramme de Schöeller-Berkaloff .....	57
3.10. Les rapports caractéristiques .....	58
4. Conclusion .....	59
Conclusion générale .....	60
Références bibliographiques .....	62
Annexes .....	67
Figures hors texte .....	90

## Liste des Figures

Fig. n°1 : Sources d'une nappe libre (Daum J.R., 1994).....	4
Fig. n°2 : Sources d'une nappe captive (Daum J.R., 1994).....	5
Fig. n°3 : Sources d'une nappe karstique (Daum J.R., 1994).....	6
Fig. n°4 : Carte de situation géographique de la source Anatra .....	6
Fig. n°5 : Situation du bassin versant de la Macta ( <i>In</i> Otmane A., 2015) .....	7
Fig. n°6 : Sous bassin versant de l'oued Mabtouh.....	8
Fig. n°7 : Précipitations moyennes mensuelles (Periode 2011-2020) .....	10
Fig. n°8 : Précipitations saisonnières (Periode 2011-2020) .....	11
Fig. n°9 : Précipitations moyennes annuelles.....	12
Fig. n°10 Températures moyennes mensuelles .....	13
Fig. n°11 : Courbe Ombro-thermique de la station du barrage Cheurfa (II).....	14
Fig. n°12 : Abaque d'indice d'aridité (De Martonne, 1926) .....	16
Fig. n°13 : Diagramme de l'indice climatique d'Emberger.....	17
Fig. n°14 : Carte géologique de dj. El Khaloua et dj. Merioua ( <i>In</i> Thomas G., 1985).....	23
Fig. n°15 : Structure générale de l'Oranie ( <i>In</i> Delfaud J., et al. 1973) .....	24
Fig. n°16 : schéma structural de dj. Khaloua et dj. Bou Ziri ( <i>In</i> Thomas G., 1985) .....	25
Fig. n°17 : Coupe géologique schématique de la région de la source Anatra.....	27
Fig. n°18 : Carte géologique, aperçu sur la région de la source Anatra .....	28
Fig. n°19 : La dépression topographique de la source Anatra .....	29
Fig. n°20 : Carte sismotectoniques des monts de Béni-Chougrane.....	29
Fig. n°21 : Photo montrant une cavité dans la dépression de la source Anatra .....	30
Fig. n°22 : Schéma de la source Anatra (exurgence) .....	30
Fig. n°23 : Source Anatra .....	32
Fig. n°24 : Hydrogramme de la source Anatra, periode 2020-2021.....	33
Fig. n°25 : Courbes des débits classés présentées par différents cas de rupture .....	35
Fig. n°26 : Courbe de débits classés de la source Anatra.....	36
Fig. n°27 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin.....	37

<b>Fig. n°28 : Courbe de récession de la source Anatra.....</b>	<b>39</b>
<b>Fig. n°29 : Position de la source Anatra dans le diagramme de Mangin (1975),.....</b>	<b>41</b>
<b>Fig. n°30 : Autocorrelogramme de pluviometrie de la région.....</b>	<b>43</b>
<b>Fig. n°31 : Autocorrelogramme des débits (Qs) de la source .....</b>	<b>43</b>
<b>Fig. n°32 : Intercorrelogramme de pluviometrie (P) et débits de la source (Qs).....</b>	<b>44</b>
<b>Fig. n°33 : Spectre simple des débits de la source à courte terme.....</b>	<b>45</b>
<b>Fig. n°34 : Classification des eaux de la source Anatra (Diagramme de piper).....</b>	<b>56</b>
<b>Fig. n°35 : Classification des eaux de la source Anatra (Diagramme de Schöeller-Berkaloff) ....</b>	<b>57</b>

## Liste des tableaux

Tableau n°1 : Localisation géographiques de station climatique du barrage Cheurfa (II).....	9
Tableau n°2 : Précipitations moyennes mensuelles de la station du barrage Cheurfa (II) .....	9
Tableau n°3 : Précipitations saisonnières de la station du barrage Cheurfa (II).....	10
Tableau n°4 : Précipitations moyennes annuelles de la station du barrage Cheurfa (II).....	11
Tableau n°5 : Températures moyennes mensuelles de la station du barrage Cheurfa (II).....	12
Tableau n°6 : Précipitations et températures moyennes mensuelles .....	13
Tableau n°7 : Classification climatique selon l'indice d'aridité de De Martonne .....	16
Tableau n°8 : Indice d'aridité de la région d'étude.....	16
Tableau n°9 : Indice climatique d'Emberger de la région d'étude.....	17
Tableau n°10 : Paramètres pour le calcul de la surface du bassin d'alimentation.....	34
Tableau n°11 : Interprétation des différents cas de rupture de la droite.....	36
Tableau n°12 : Paramètres de la courbe de recession de la source Anatra.....	39
Tableau n°13 : Paramètres du diagramme de Mangin pour la source Anatra .....	40
Tableau n°14 : Classification de l'eau en fonction du pH.....	47
Tableau n°15 : Les valeurs du pH de la source Anatra .....	47
Tableau n°16 : Classification des eaux en fonction de la conductivité (Potelon, 1993) .....	48
Tableau n°17 : Conductivité de la source Anatra.....	48
Tableau n°18 : Classes d'erreur des analyses chimiques.....	49
Tableau n°19 : Titre alcalimétrique complet (TAC) de la source Anatra.....	51
Tableau n°20 : Classification de l'eau en fonction de la dureté totale.....	52
Tableau n°21 : Conductivité de la source Anatra.....	52
Tableau n°22 : Valeur de l'indice déséquilibre chloro-alcalin (I.D.C) .....	53
Tableau n°23 : Valeurs moyennes de l'indice de saturation .....	54

## Liste des Acronymes et Abréviations

A.N.R.H : Agence Nationale des Ressources Hydrauliques

ADE : Algérienne des eaux

ANBT : Agence nationale des barrages et transferts

ETR : Evapotranspiration réelle

I.D.C : Indice de Déséquilibre Chloro-alcalin

IS : Indice de Saturation

M.N.T : Modèle numérique de terrain

pCO<sub>2</sub> : Pression partielle de gaz carbonique

pH : potentiel hydrogène

R.S : Résidu Sec

SAR : Rapport d'adsorption du sodium

TA : Titre alcalimétrique

TAC : Titre alcalimétrique complet

μS : micro-siemens.

# **INTRODUCTION GENERALE**

## **Introduction générale**

L'eau joue un rôle essentiel et indispensable dans la subsistance de tous les organismes vivants. Les approvisionnements en eau ne peuvent donc se faire qu'en utilisant les ressources superficielles (captages, barrages, rivières, sources), ou en extrayant des profondeurs du sol l'eau qui s'y trouve, amenée par infiltration et emmagasinée dans des aquifères.

L'hydrogéologie joue un rôle capital dans le domaine de gestion des eaux souterraines, elle permet de mieux comprendre leur comportement dynamique, hydrochimique, et aussi la relation entre l'eau et les roches encaissantes.

Les eaux souterraines sont étudiées par investigation directe dans le sous-sol, à travers des puits et des piézomètres, ou par leur restitution à l'air libre à travers des sources.

La source dont il est question dans notre étude se trouve dans la commune de Chorfa, wilaya de Mascara. Elle est captée pour l'alimentation en eau potable, selon une méthode d'exploitation par refoulement, afin de remplir le château d'eau, qui se trouve à 443m d'altitude, ensuite par écoulement gravitaire vers le village Anatra. L'exploitation cible une partie de l'eau de la source, et l'autre partie profite aux agriculteurs, pour irriguer leurs potagers se trouvant sur les rives d'oued Zeneta, suite à une convention établie entre l'ADE et la commune de Chorfa en 2019.

Notre travail a pour objectif une caractérisation hydrogéologique de la source, en nous basant sur l'étude des données aussi bien hydrométriques qu'hydrochimiques. Pour cela, nous avons fait des mesures de débits du mois d'avril 2020 au mois de mars 2021, et des paramètres physico-chimiques in situ et au laboratoire. Nous avons également établi une reconnaissance des différents affleurements géologiques de cette région.

Compte tenu des objectifs de notre travail, nous avons choisi de présenter ce document en quatre chapitres :

Le premier chapitre sera consacré à des généralités, avec une présentation générale de la région de la source Anatra, et de son cadre climatique.

Le deuxième chapitre sera consacré à une présentation du cadre géologique, hydrogéologique et structural de la région d'étude, et aux conditions d'émergence de cette source.

Le troisième chapitre est une étude hydrodynamique basée sur un traitement et analyse des débits mesurés tandis que le quatrième est une caractérisation hydrochimique de la source Anatra.

**CHAPITRE I**  
**PRESENTATION GENERALE**  
**ET CADRE CLIMATIQUE**

## **Introduction**

Les eaux souterraines sont généralement caractérisées par un processus sans fin, qui se traduit par une circulation et un temps de séjour dans le sous-sol. L'infiltration d'une partie de la précipitation dans le sous-sol permet le renouvellement des réservoirs souterrains en eau, et alimente les circulations profondes à l'origine des sources.

## **1. Généralités**

### **1.1. Aquifère**

L'aquifère c'est une formation géologique qui permet l'écoulement significatif d'une nappe d'eau souterraine et le captage de quantités d'eau appréciables. L'aquifère peut comporter une zone saturée et une zone non saturée, en fonction de la lithologie. On distingue généralement les aquifères poreux, les aquifères fissurés et les aquifères karstiques.

### **1.2. Nappe**

La nappe est la partie d'eau libre constituant la zone saturée de l'aquifère. Elle est caractérisée par des paramètres hydrodynamiques (perméabilité, transmissivité, coefficient d'emménagement, et diffusivité). On distingue généralement quatre types de nappes en fonction de la lithologie.

- Nappe libre : C'est une nappe à surface libre, comprise dans un aquifère qui comporte une zone non saturée et une zone de fluctuation.
- Nappe karstique : c'est un type particulier d'une nappe libre, elle constitue la zone noyée d'un aquifère karstique.
- Nappe captive : c'est une nappe comprise entre deux formations imperméables, dans laquelle la pression est supérieure à la pression atmosphérique et le niveau piézométrique est supérieur au toit qui la couvre.
- Nappe semi-captive : c'est une nappe qui se couvre par un toit semi-perméable

### 1.3. Sources

La source est un exutoire naturel d'une nappe. Elle constitue un type d'écoulement naturel des eaux souterraines à la surface du sol. En fonction de la nature de la nappe, on distingue les sources de la nappe libre, les sources de nappe captive et les sources de la nappe karstique.

#### 1.3.1. Sources d'une nappe libre

L'exutoire d'une nappe libre est positionné par le contact de la formation aquifère avec la formation imperméable et la surface topographique. Ce contact permet de distinguer quatre types de sources.

- Source de dépression : Elle est provoquée par l'intersection de la surface du sol avec la surface d'une nappe libre (Fig. n°1a), sans incidence d'une limite imperméable de l'aquifère (Imbeaux, 1930).
- Source de déversement : C'est une source située au contact du mur imperméable de l'aquifère, issue d'une nappe libre de déversement (Fig. n°1b), souvent comprise dans une ligne de sources (Haug, 1911).
- Source de trop-plein : Elle est située au contact du mur imperméable de l'aquifère, issue d'une nappe libre de trop-plein, et souvent comprise dans une ligne de sources (Fig. n°1c).
- Source de débordement : Elle est située au contact du toit imperméable d'un aquifère (Fig. n°1d), à la limite d'une nappe libre et d'une nappe captive (Schöeller, 1955).

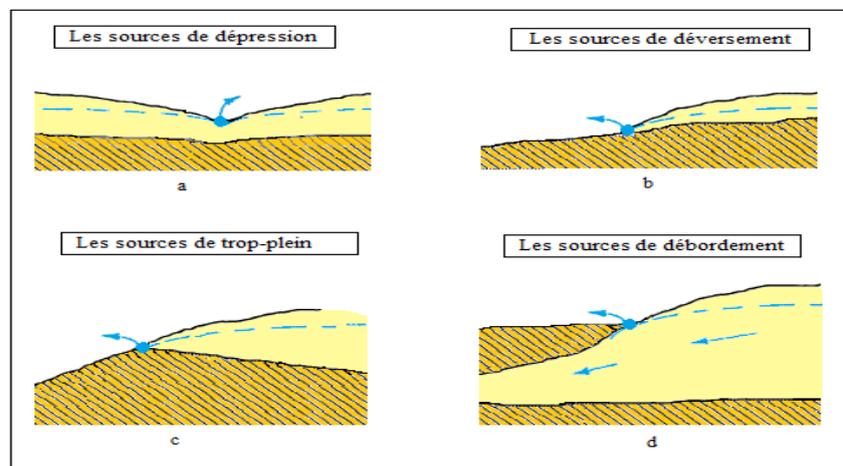


Fig. n°1 : Sources d'une nappe libre (Daum J.R., 1994)

### 1.3.2. Sources d'une nappe captive

Sources artésiennes : Ce type des sources caractérise les nappes captives. Elle est apparue sous effet de la fracturation des formations qui recouvrent une nappe captive (Fig. n°2a), ainsi que par une limite étanche ou une faille (Fig. n°2b).

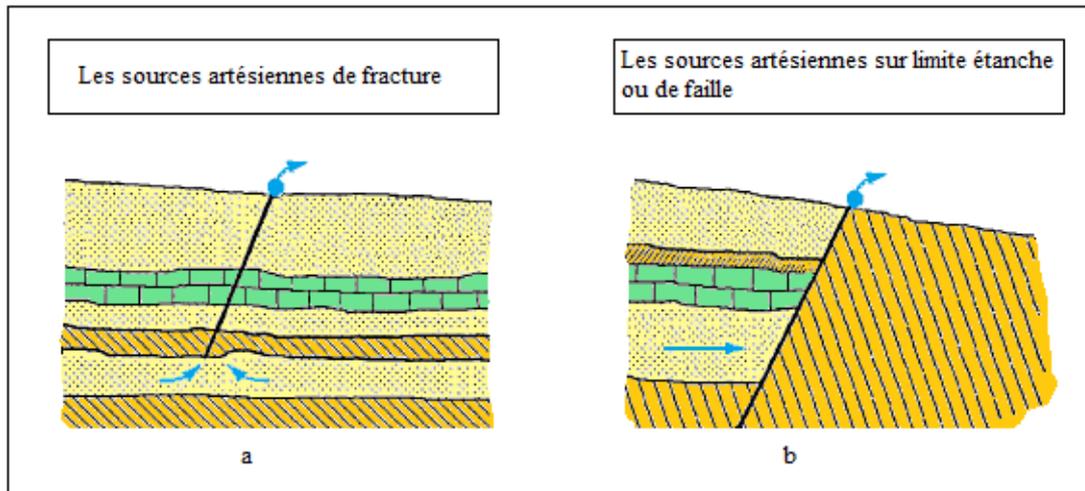


Fig. n°2 : Sources d'une nappe captive (Daum J.R., 1994)

### 1.3.3. Sources d'une nappe karstique

L'évolution morphologique de l'aquifère karstique, nous conduit à distinguer plusieurs type de sources, nommées en fonction du degré de karstification et en fonction de la position de l'exutoire. On distingue :

- L'exurgence (Fig. n°3a) : c'est une émergence d'un réseau de fissures de l'aquifère karstique, dont l'eau ne provient pas d'une perte d'un cours d'eau de surface.
- La résurgence (Fig. n°3b) : c'est une source d'un aquifère karstique, dont l'eau provient d'un écoulement de surface, qui avait disparu par une perte (In El Hakim M., 2005) dans un système karstique bien développé.
- Source vaclusienne (Fig. n°3c) : C'est un type de source karstique, où le drainage de système karstique s'organise sous le niveau de l'exutoire
- Source jurassienne (Fig. n°3d) : c'est une source karstique, où le drainage de système karstique s'organise au voisinage du niveau de l'exutoire (In Marsaud B., 1997).

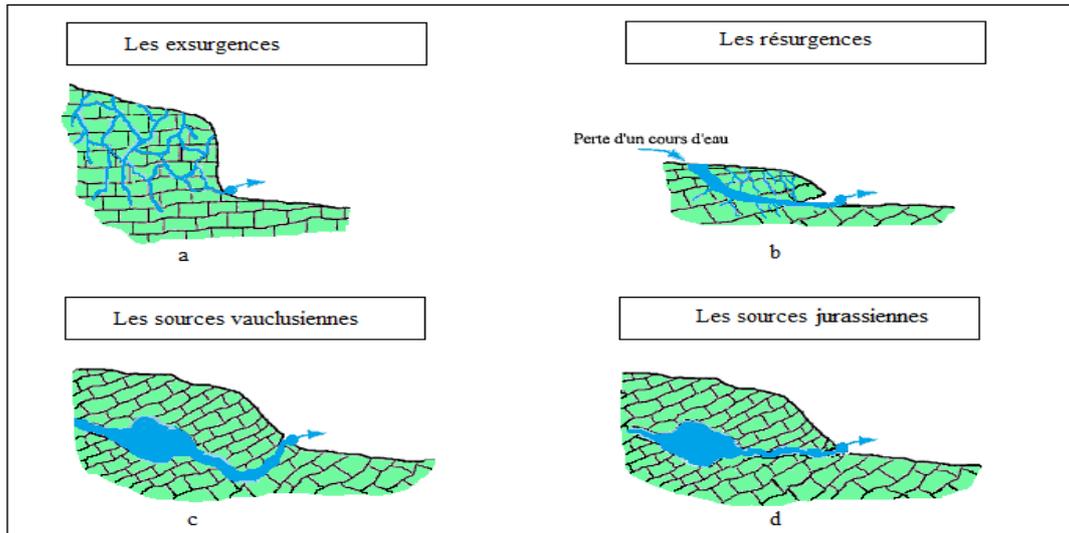


Fig. n°3 : Sources d'une nappe karstique (Daum J.R., 1994)

## 2. Situation géographique

La région de la source Anatra fait partie de la wilaya de Mascara, commune de Chorfa. La source se trouve à environ 35km au Sud de la ville de Sig (Fig. n°4), et environ 1km du village Anatra, dont elle tire son nom. Les coordonnées géographiques de la source sont comme suit :

Latitude	Longitude	Altitude
35°22'39" N	0°11'46" W	396 m

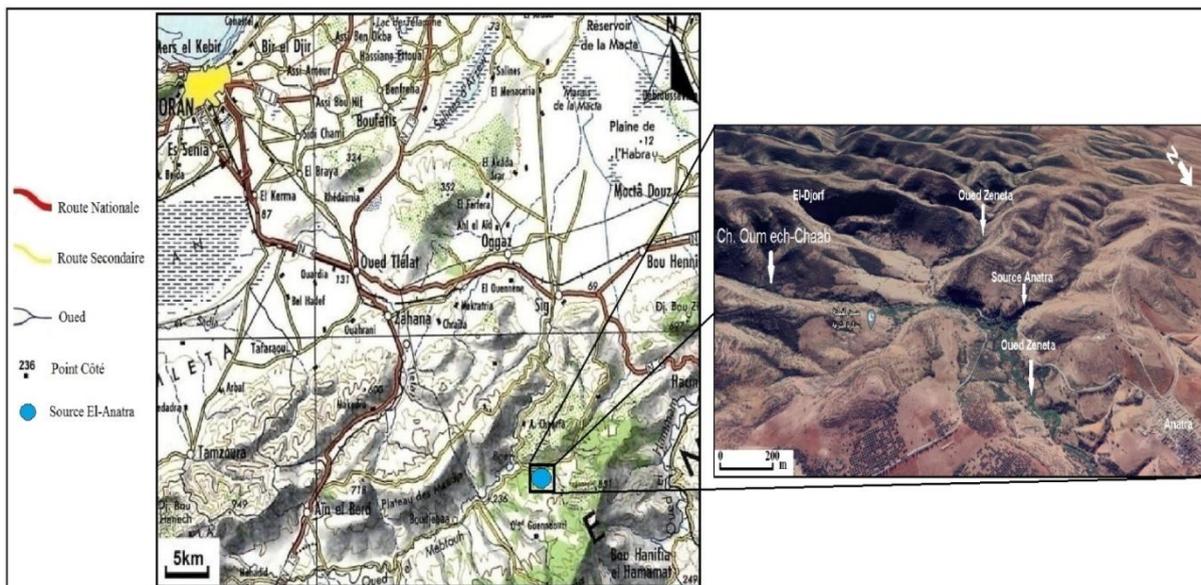


Fig. n°4 : Carte de situation géographique de la source Anatra (Extrait de la carte topographique d'Oran au 1/500 000)

### 3. Réseau hydrographique

La disposition du réseau hydrographique de la région où se trouve la source est liée en grande partie à l'évolution des phénomènes structuraux qui l'organise à une direction WSW-ENE, conforme aux plissements néogènes (Tinthoin R., 1937).

La région de la source Anatra se trouve entre deux principaux oueds, il s'agit d'Oued El Hammam dont l'écoulement est retenu par le barrage de Bou Hanifia et Oued El Mabtouh par le barrage Cheurfa II. Elle est traversée par plusieurs oueds secondaires, celui de Zeneta, Tichtiouine et Oued Ain Aden. Elle présente également une densité importante de Talwegs : rigoles de ruissellement, ravinements, et des vallées bien tracées à pente torrentielle comme la vallée Djorf.

Le réseau hydrographique de la région de la source Anatra fait partie du bassin versant de la Macta (Fig. n°5).

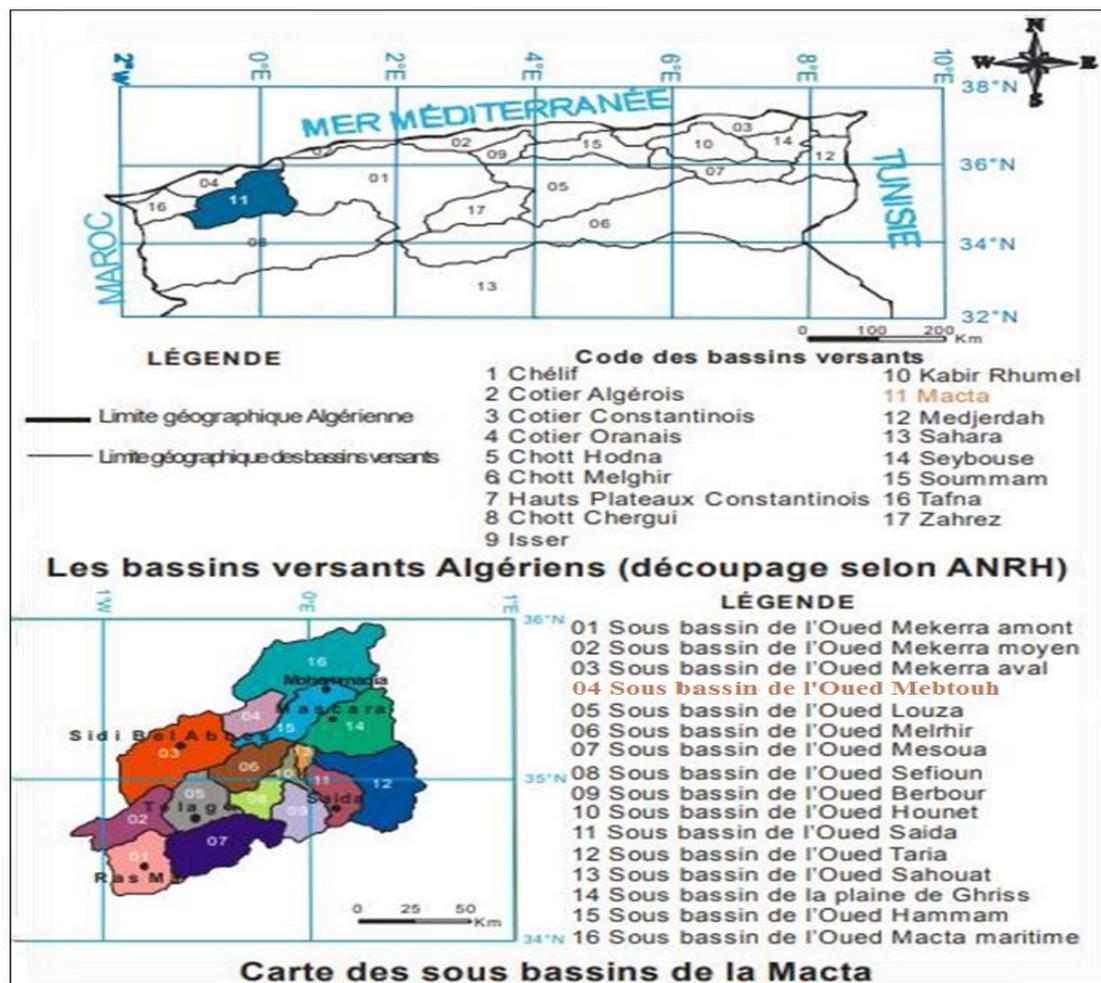


Fig. n°5 : Situation du bassin versant de la macta (In Otmane A., 2015)

Selon le découpage de l'Agence Nationale des Ressources Hydrauliques (ANRH), le sous bassin versant de l'Oued Mabtough où se trouve notre source, s'inscrit sous le N°4 dans le bassin versant de la Macta. Ce dernier porte le Code n°11 à l'échelle nationale.

Afin de mieux représenter le réseau hydrographique et la limite du sous bassin de Oued Mabtough, nous avons utilisé le logiciel ArcGIS (**module hydrology**), et le fichier MNT N30W0001 (Fig. n°6).

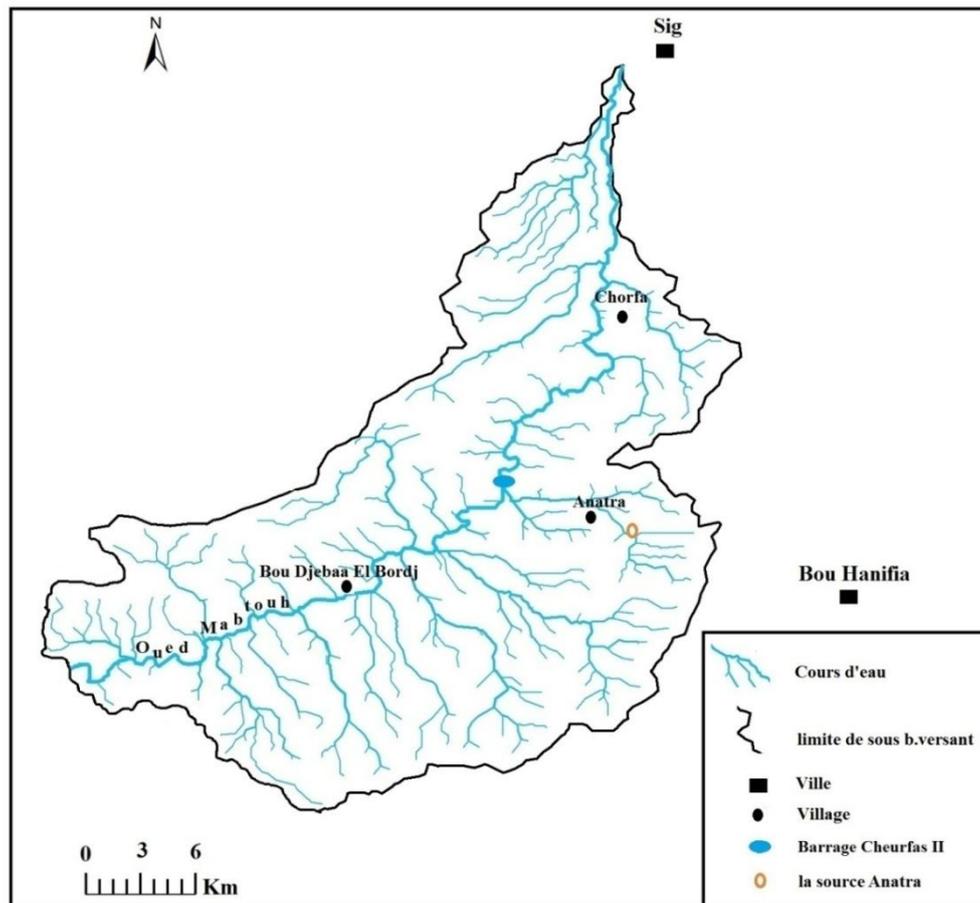


Fig. n°6 : Sous bassin versant de l'Oued Mabtough

#### 4. Cadre climatique

La climatologie intervient dans l'étude des eaux souterraines, car la recharge des réservoirs souterrains en eau est conditionnée principalement par les précipitations météorologiques (Foucault A., 2009). L'ensemble des eaux de sources a une origine essentiellement météorique.

La connaissance des caractéristiques climatologiques est nécessaire pour l'étude hydrogéologique.

## 4.1. Aperçu général sur le climat de la région d'étude

L'Algérie est caractérisé par un climat influencé par la mer méditerranée, avec un régime climatique, allant du pluvial à l'aride en passant par le semi-aride. La région d'étude est insérée dans une zone montagneuse de Béni Chougrane, qui fait partie de l'Oranie, sur laquelle plusieurs études climatologiques ont porté (Emberger, 1930-1972).

Les données climatologiques traitées relèvent de la direction de l'exploitation du Barrage Cheurfa(II). Elles sont réparties sur une période de 10 ans (2011-2020). La station climatique du Barrage Cheurfa(II) (ANBT) se trouve dans la commune de Chorfa (Tableau n°1), Daïra de Sig, wilaya de Masacra.

Tableau n°1 : Localisation géographiques de station climatique du Barrage Cheurfa (II) ANBT

Station	Latitude	Longitude	Altitude (m)
Barrage Cheurfa (II) (ANBT)	35°24'06.86"N	0°15'09.96"O	231 m

## 4.2. Etude des précipitations

La précipitation est un facteur primordial dans la détermination du régime climatique, car elle constitue la principale entrée des systèmes hydrologiques.

### 4.2.1. Précipitations moyennes mensuelles

Les précipitations moyennes mensuelles de la station du Barrage Cheurfa (II) sont présentées sur le tableau n°2.

L'analyse des données pluviométriques (Tableau n°2) montrent que le module pluviométrique moyen est de l'ordre de 338mm. Le mois le plus pluvieux est le mois de Novembre avec un maximum de 57mm, et le mois le plus sec est celui de Juillet, avec une valeur minimale de 2mm.

Tableau n°2 : Précipitations moyennes mensuelles de la station du Barrage Cheurfa (II) ANBT

Mois	Sept.	Oct.	Nov.	Déc.	Janv.	Févr.	Mars	Avr.	Mai	Juin	Juil.	Août	Total
P. moyennes mensuelles (2011-2020)	18,20	29,18	56,89	54,24	44,70	28,61	38,80	46,68	15,61	2,85	0,71	1,61	338,07

La représentation graphique (Fig. n°7) montre que la répartition des précipitations mensuelles est irrégulière d'un mois à l'autre. Cette répartition est représentée par deux régimes, un régime sec de Mai à Septembre et un régime pluvial d'Octobre jusqu'à Avril.

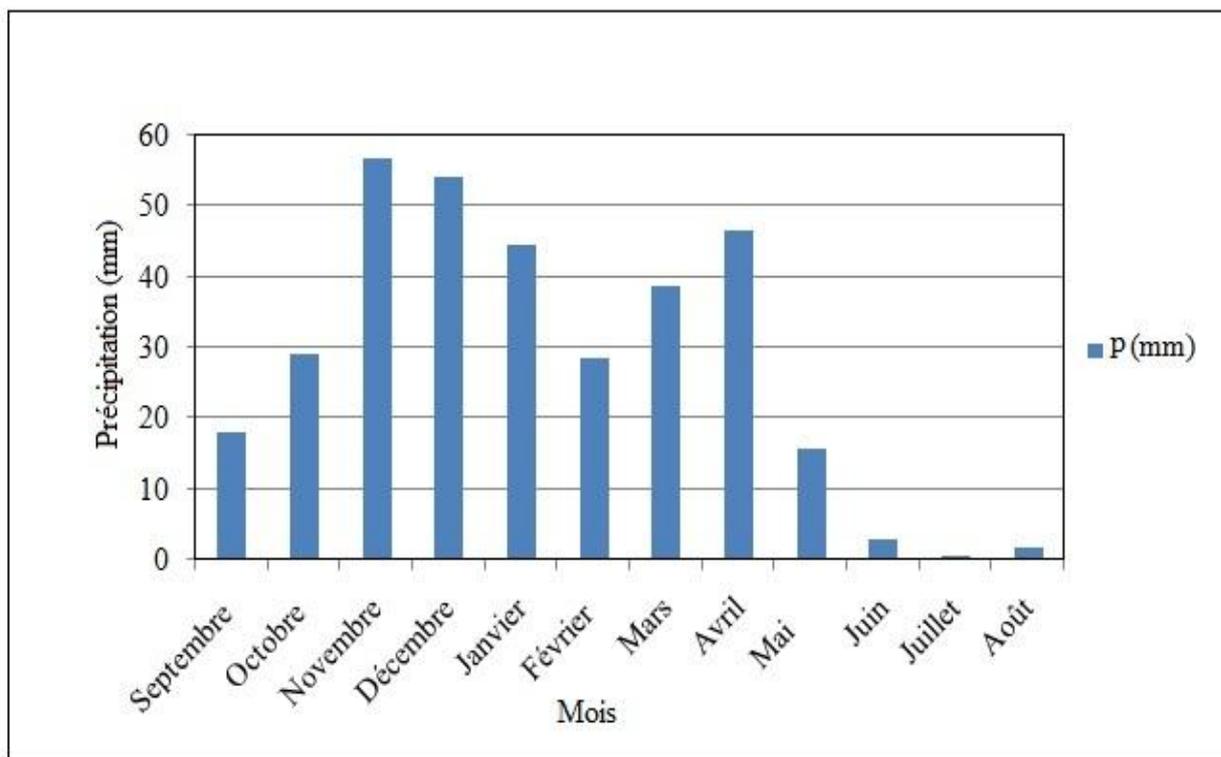


Fig. n°7 : Précipitations moyennes mensuelles de la station du Barrage Cheurfa (II) ANBT (Période 2011-2020)

#### 4.2.2. Précipitations saisonnières

La répartition des précipitations saisonnières de la période 2011-2020 est présentée dans le tableau n°3 et la figure n°8.

Tableau n°3 : Précipitations saisonnières de la station du Barrage Cheurfa (II) ANBT

Saisons	Automne	Hiver	Printemps	Eté	Total	Indice saisonnier
P. Saisonnières (mm)	104,27	127,55	101,09	5,17	338,07	HAPE
%	30,84	37,73	29,90	1,53	100%	

L'étude des précipitations à travers les saisons (Tableau n°3) montre que les pluies se répartissent de façon inégale entre les saisons. La période d'Hiver reçoit la plus grande quantité des précipitations (Fig. n°8), avec un pourcentage de 37.73% de la pluviométrie totale, par contre la saison d'Eté, reçoit la plus faible quantité des précipitations, avec un pourcentage de 1.53% de la quantité totale. Le régime climatique de la région est donc de type HAPE.

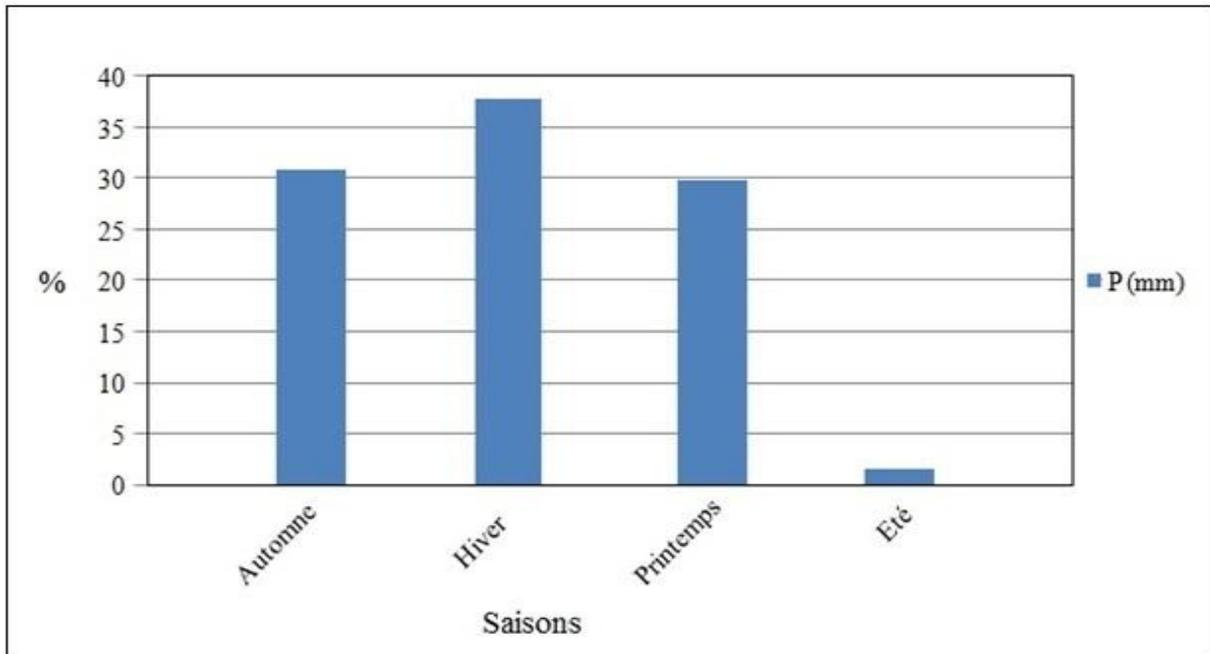


Fig. n°8 : Précipitations saisonnières (Période 2011-2020)

#### 4.2.3. Précipitations moyennes annuelles

L'analyse des précipitations moyennes annuelles (Tableau n°4) permet de connaître la quantité de la précipitation accumulée pour chaque année, afin de faire la comparaison entre ces années en fonction de la quantité.

Tableau n°4 : Précipitations moyennes annuelles de la station du Barrage Cheurfa (II) ANBT

Année	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
P. annuelle (mm)	335,92	407,30	529,00	321,50	284,10	369,40	226,00	499,80	241,50	166,20

La représentation graphique des précipitations moyennes (Fig. n°9) donne une courbe dentée, ce qui signifie que les précipitations sont caractérisées par une variation interannuelle, avec un maximum de précipitation enregistrée en 2013, égale à 529mm, et une valeur minimum estimée à 166mm en 2020.

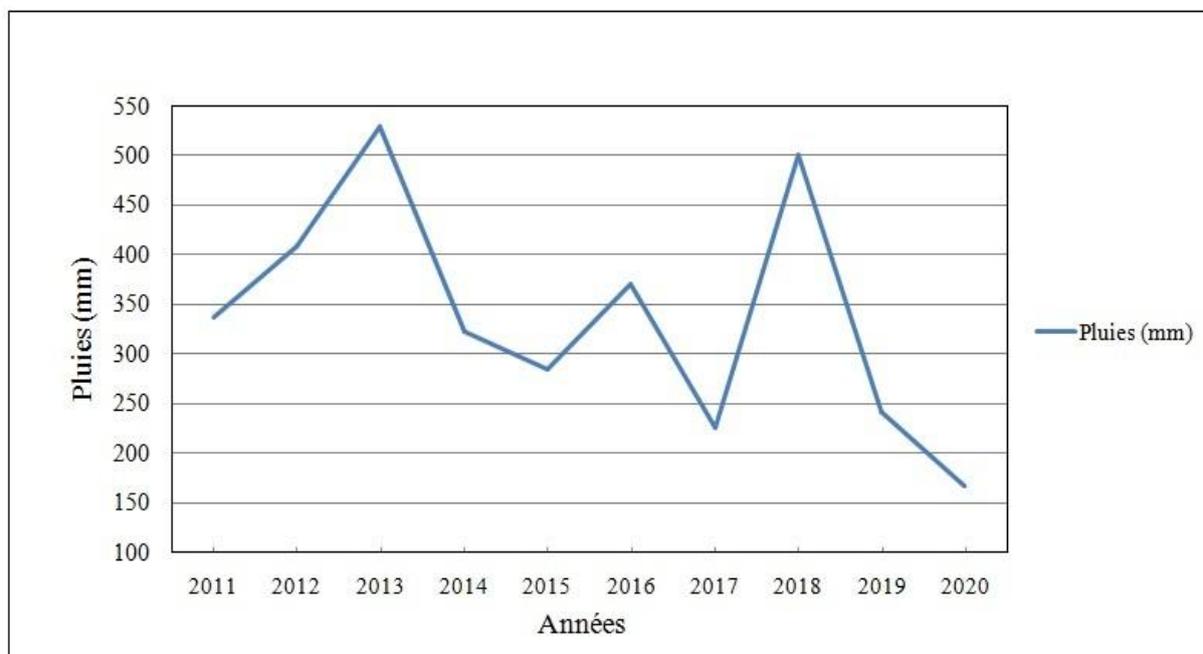


Fig. n°9 : Précipitations moyennes annuelles  
(Station du Barrage Cheurfa (II) ANBT, Période 2011-2020)

### 4.3. Etude des températures

La température constitue un facteur important dans l'estimation du déficit d'écoulement. Les valeurs de la température enregistrées au niveau du barrage Cheurfa (II) sont présentées dans le tableau n° 5. Ce tableau montre que les valeurs les plus faibles sont enregistrées au mois de janvier, et les valeurs les plus élevées sont enregistrées au mois d'Août.

Tableau n°5 : Températures moyennes mensuelles maximales (M), minimales (m) et moyennes (2011-2020) de la station du Barrage Cheurfa (II) ANBT

T (°C)	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Moy.
Max.	23,33	19,80	14,55	9,66	10,56	11,95	11,89	14,54	18,47	21,79	26,16	27,64	17,53
Moy.	20,22	16,82	11,98	8,21	7,53	9,24	9,69	12,55	14,70	19,24	22,72	24,16	14,76
Min.	17,10	13,83	9,42	6,76	4,50	6,54	7,50	10,57	10,93	16,70	19,27	20,68	11,98

Les courbes de la température maximale, minimale et moyenne (Fig. n°10), montrent une décroissance de la température à partir du mois de Septembre au mois de janvier, et une croissance du mois de Février au mois d’Août.

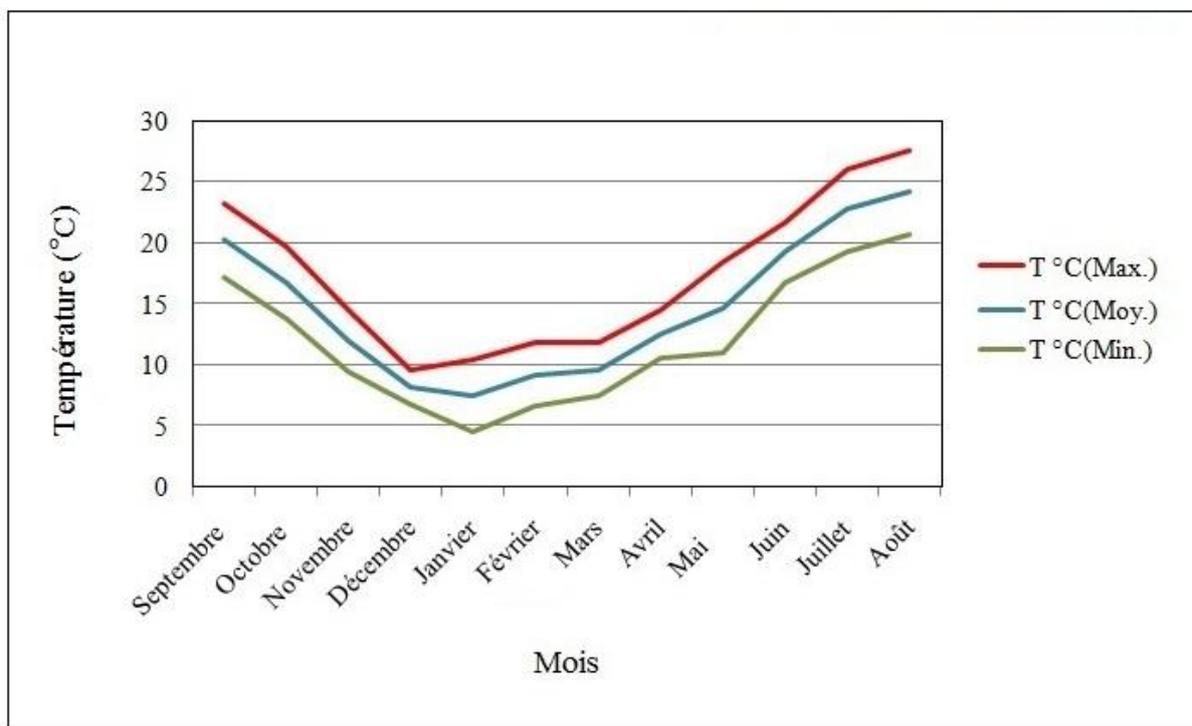


Fig. n°10 Températures moyennes mensuelles  
(Station du Barrage Cheurfa (II) ANBT, (Période 2011-2020))

#### 4.4. Relation température précipitation

##### Diagramme Ombro-thermique de Gaussen

Le diagramme de Gaussen a pour objectif de représenter les valeurs de précipitations en (mm) et les valeurs de température en °C sur deux axes. Les températures sont portées à une échelle double de celle des précipitations  $P = 2T$ . Le diagramme pluvio-thermique permet de fixer le début et la fin d’une période sèche et humide.

Un mois est sec lorsque les précipitations moyennes exprimées en mm, sont inférieures ou égales au double des températures durant la même période (In Amroune A., 2018).

Tableau n°6 : Précipitations et températures moyennes mensuelles

Mois	Sep.	Oct.	Nov.	Déc.	Jan.	Fév.	Mars	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août
P (mm)	18,20	29,18	56,89	54,24	44,70	28,61	38,80	46,68	15,61	2,85	0,71	1,61
T °C	20,22	16,82	11,98	8,21	7,53	9,24	9,69	12,55	14,70	19,24	22,72	24,16

L'analyse de la courbe pluvio-thermique (Fig. n°11) montre l'existence de deux périodes, une période humide (excédentaire) de mi-October au début Mai et une période sèche (déficitaire) s'étalant presque sur cinq mois.

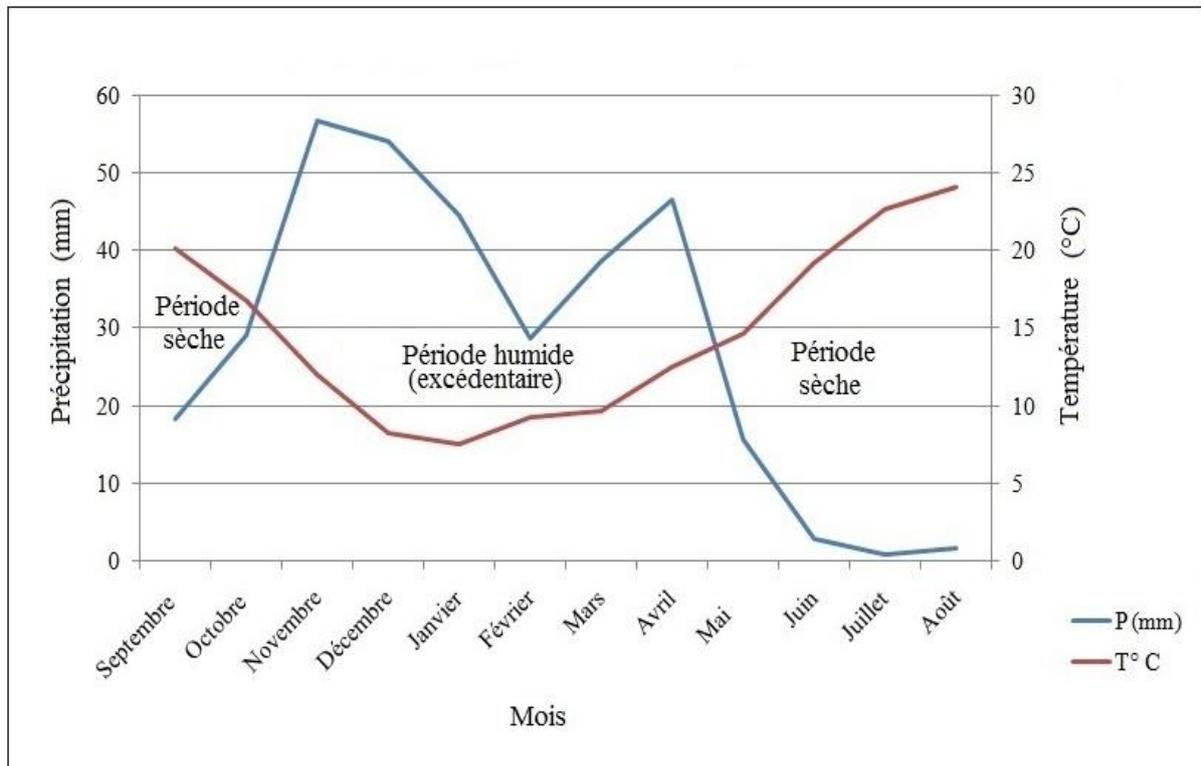


Fig. n°11 : Courbe Ombro-thermique de la station du Barrage Cheurfa (II) ANBT

#### 4.5. Evapotranspiration annuelle par la méthode de Thornthwaite

La méthode de Thornthwaite permet de calculer ponctuellement (en une station) le bilan d'eau mensuel et annuel à partir des valeurs mensuelles des précipitations et des valeurs moyennes mensuelles des températures.

Pour une température moyenne mensuelle inférieure à 26,5 C°, le cas de notre région, l'évapotranspiration potentielle mensuelle est calculée d'après la formule suivante :

$$ETP = 16 \left[ \frac{10t}{I} \right]^a K$$

ETP : évapotranspiration potentielle mensuelle corrigée, (en mm)

t : température moyenne mensuelle (en ° C)

I : indice thermique annuel : c'est la somme des indices mensuels calculés à partir des températures moyennes mensuelles selon la formule suivante :

$$i = \left[ \frac{t}{5} \right]^{1,514}$$

$$a = 6,75 * 10^{-7} * I^3 - 7,71 * 10^{-5} * I^2 + 1,79 * 10^{-2} * I + 0,49$$

K : coefficient de correction dépendant de la latitude, donné par une table

La valeur de l'évapotranspiration potentielle annuelle est la somme des 12 valeurs d'évapotranspirations potentielles mensuelles (annexe n°8). En fonction des valeurs obtenues et avec celles de la précipitation, l'évapotranspiration réelle (ETR) est donnée par :

Si :  $ETP > P$ , on prend  $ETR = P$ ,                      Si :  $ETP < P$ , on prend  $ETR = ETP$

Nous avons pris en considération la période des mesures des débits, pour calculer ETR car nous en aurons besoin dans le troisième chapitre. Les calculs effectués (annexe n°8) nous ont donné 142 mm, cette valeur représente 84% des précipitations dans la région d'étude.

## 4.6. Les indices climatiques

### 4.6.1. Indice de De Martonne

La classification de De Martonne est fondée sur l'indice d'aridité qu'il a défini en 1926, élaboré principalement pour qualifier les zones arides (Tableau n°7). En effet, cet indice n'est pas défini pour  $T \leq -10$  °C (Foucault A., 2009). L'indice de De Martonne est calculé par la formule suivante :

$$I = P/T + 10$$

I : indice d'aridité annuel de Martonne

P : précipitations moyennes annuelles (mm)

T : température moyenne annuelle (°C)

Tableau n°7 : Classification climatique selon l'indice d'aridité de De Martonne

Valeur d'indice	Type de climat	Signification
$I < 5$	Aridité absolue	Désert sans culture
$5 < I < 10$	désert (aride)	Désert et steppe, aucune culture sans irrigation
$10 < I < 20$	Semi-aride	Formation herbacées, steppes ou savanes, irrigation nécessaire pour les cultures exigeant de l'humidité
$20 < I < 30$	Semi-humide	Prairie naturelle, irrigation généralement non nécessaire
$30 < I < 40$	Humide	Les arbres jouent un rôle de plus en plus grand dans le paysage.
$I > 20$	humide	La forêt est partout la formation climatique. Les cultures de céréales tendent à être remplacées par les herbages

Tableau n°8 : Indice d'aridité de la région d'étude

Station	Période	P	T	I	Climat
B. Cheurfa(II) ANBT	2011-2020	338.07	14.76	13.66	Semi-aride

Le calcul de l'indice de De Martonne a donné une valeur égale à 13.66. Cette valeur, comprise entre 10 et 20, indique que le climat de la région d'étude est semi-aride (Tableau n°8), (Fig. n°12).

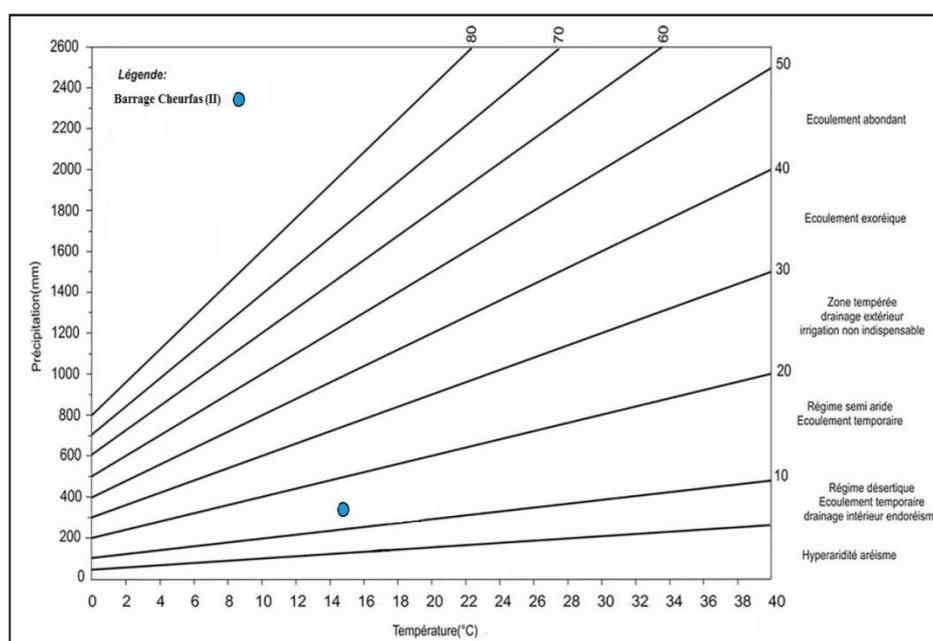


Fig. n°12 : Abaque d'indice d'aridité (De Martonne, 1926)

#### 4.6.2. Indice climatique d'Emberger

L'utilisation de l'indice d'Emberger permet de préciser le type du climat dominant sur une région donnée. Cet indice se base sur le quotient d'écoulement et les températures minima (m) et maxima (M). Il est calculé par les formules suivantes :

$$Q = 2000P/2((M + m)/2) (M - m) = 2000P/M2 - m2$$

Q : indice d'Emberger

P : précipitations annuelles en (mm)

M : moyenne des maxima de T° du mois le plus chaud en Klvine

m : moyenne des minima de T° du mois le plus froid en Klvine

Tableau n°9 : Indice climatique d'Emberger de la région d'étude

Station	P (mm)	m (°C)	M (°C)	Q
B. Cheurfa (II)	338,07	4,50	27,64	50,51

La valeur de Q est égale à 50,51, et la valeur moyenne des minima (m) est égale 4,50 °C, La représentation de ces valeurs sur le diagramme d'Emberger (Fig. n°13) confirme les résultats précédents, soit un climat semi-aride à hiver tempéré.

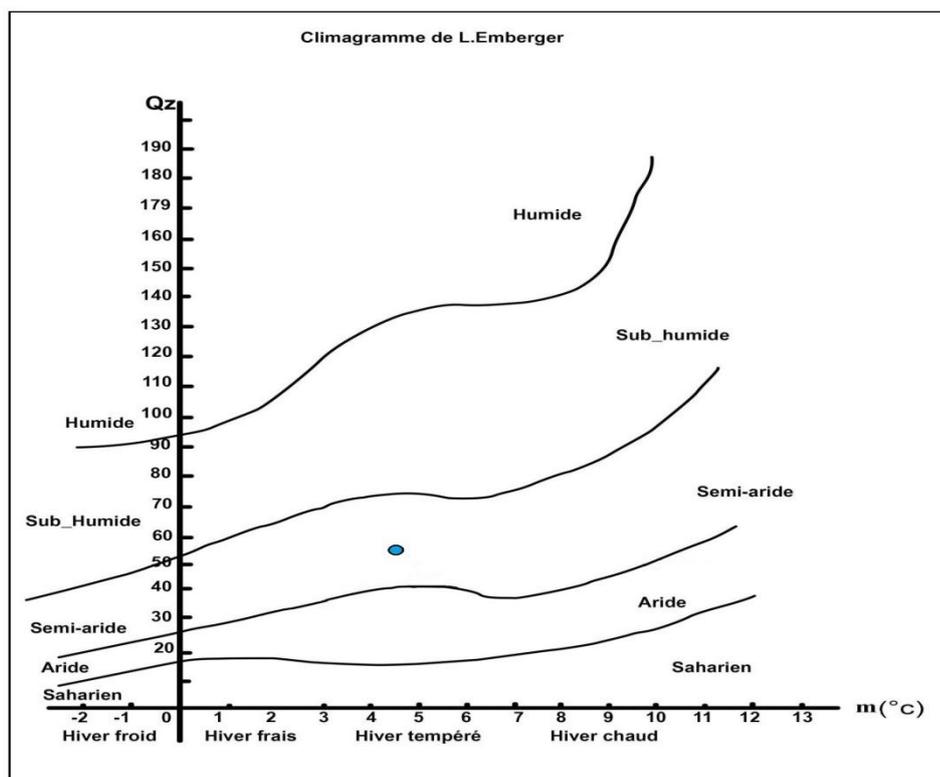


Fig. n°13. Diagramme de l'indice climatique d'Emberger

## **5. Conclusion**

La zone étudiée fait partie du grand bassin versant de la Macta. Elle est caractérisée par un climat semi-aride influencé par les courants humides en hiver et chauds en été. Les précipitations moyennes annuelles, calculées sur une période allant de 2011 à 2020, varient entre 166mm et 336mm à la station du Barrage Cheurfa (II), et la température moyenne est égale à 14,76 °C pour la même période.

**CHAPITRE II**  
**CADRE GEOLOGIQUE ET**  
**HYDROGEOLOGIQUE**

## **Introduction**

Le Nord algérien est connu par sa structure actuelle, liée aux mouvements orogéniques hercyniens et alpins. Ces mouvements ont donné plusieurs domaines, parmi lesquels nous avons le domaine tellien, qui est orienté grossièrement E-W, et subdivisé en Tell septentrional, et Tell méridional.

Le Tell méridional est constitué par un ensemble de massifs montagneux. Il s'agit des Monts de Tessala, et les Monts d'Ouled Ali et Béni-Chougrane. Cet ensemble forme une zone de charnière. La majorité du Tell méridional est formée par des formations géologiques d'âge cénozoïque.

La région de la source Aantra s'inscrit dans la partie Ouest des Monts de Béni Chougrane. Les formations qui y affleurent, d'un côté, font partie du djebel El Khaloua et djebel Cheurfa, et de l'autre côté, font partie de l'Ouest du djebel Bou Hanifia et Guetna.

## **1. Lithostratigraphie**

Les Monts de Béni-Chougrane sont très plissés, caractérisés par des terrains dont l'âge varie du Secondaire au Quaternaire.

### **1.2. Le Secondaire**

#### **1.2.1. Trias**

Deux affleurements triasiques sont remarquables au Sud de l'Oued Mabtouh, les deux sont emballés dans l'allochtone (Fenet B., 1975). Le premier affleure dans la Chabet Melah, présentée de bas en haut par des marnes et des éboulis, 8 à 10m de roches vertes en bancs, et 5 à 6m de dolomie cristallisée. Le second affleure au Sud de Bou-Djebâa, dans une vallée (X = 226,9, Y = 231). Cette formation est caractérisée par une succession qui commence par des roches vertes et dolomies litées, bien cristallisées, les deux sont associées sur 100m environ ; s'ensuivent des marnes blanches à grises sur 3m d'épaisseur, et plusieurs mètres de calcaire dolomitique recristallisés.

### **1.2.2. Crétacé**

Le Crétacé forme l'ossature des Monts de Béni-Chougrane (*In* Bekkoussa et al., 2013), représenté par des grès, des calcaires épais avec des passées de calcaire dolomitiques (*In* Mekebret I., 2017).

### **1.3. Le Tertiaire :**

La majorité des formations constituant la région de la source Anatra sont d'âge tertiaire (Fig. n°18). Ce dernier est représenté par des dépôts essentiellement marins. Nous distinguons de bas en haut :

#### **1.3.1. Eocène**

Les terrains d'âge éocène inférieur affleurent sur les rives d'Oued el Hammam au niveau de Bou Hanifia et El Guetna, représentés par des calcaires à silex, des marno-calcaires, parfois à gypse ; les marnes argileuses de l'Eocène inférieur supportant les calcaires à silex (Dalloni M., 1939).

#### **1.3.2. Oligocène**

Bien visible au niveau de Sidi Samllache et de Guetna, il est constitué par des grès et des passées marneuses. Une bande oligocène très continue, passe par Bou-Djebâa pour arriver dans la vallée de l'Oued el Hammam entre Dublineau et Bou Hanifia, avec une alternance fréquente de grès tendres, grossiers et de marnes argileuses grises (Dalloni M., 1939).

#### **1.3.3. Miocène**

##### **1.3.3.1. Miocène moyen**

- Serravalien

Le miocène est représenté par deux cycles sédimentaires (Thomas G., 1985), le premier cycle est marqué par des dépôts continentaux. Ces dépôts marquent la fin du Miocène moyen, caractérisés par la fameuse formation continentale de Bou Hanifia.

### ❖ **Formations de Bou Hanifia :**

Les formations de Bou Hanifia sont des formations continentales, dont l'épaisseur peut atteindre 400 m. Elles affleurent largement dans la haute vallée de Oued el Hammam, jusque dans la région de Sfifef (Perrodont A., 1957). Ces formations sont constituées par une alternance de grès, parfois de conglomérats et de marnes (Thomas G., 1985) de teinte grise, ou rouge. A la base de cette série, nous avons un niveau de cinérites. L'âge de ces formations a été donné par deux datations : l'une faite sur la formation marine qui les recouvre, leur attribuant un âge Tortonien inférieur (Glaçon G. et Guiraud R., 1970), l'autre est une datation radiométrique au potassium-argon effectuée sur des cinérites qui se trouvent au-dessous des formations de Bou Hanifia, et qui a fourni un âge de  $12,18 \pm 1\text{Ma}$  (Chabbar Ameer R. et al., 1976).

#### 1.3.3.2. Miocène supérieur

Le deuxième cycle sédimentaire post-nappe est représenté par des dépôts marins. Ces dépôts caractérisent le miocène supérieur.

##### 1.3.3.2.1. Tortonien

### ❖ **Les grès roux :**

Le Tortonien est matérialisé par des formations détritiques, celles des grès roux, dont l'épaisseur est de l'ordre 100 à 150 m à Oued Fergoug. Elle dépasse les 300 m au Djebel Bou-Ziri (Moussa K., 1993). Les grès roux sont bien visibles au djebel Merioua et djebel Khaloua (Fig. n°14). Ces formations sont très similaires à celles de la source Anatra et Djorf dont l'épaisseur dépasse les 150 m. Les formations des grès tortoniens sont bien marquées au niveau du barrage et Djebel Cheurfa (Dalloni M., 1939).

### ❖ **Les marnes bleues :**

Les marnes bleues sont présentes à Chabet Dâlia, en succession avec les grès ocres tortoniens, passant latéralement à des dépôts marno-calcaires (Trescartes N., 1992).

### ❖ **Les calcaires à algues (lithothamnium) :**

Le Tortonien est aussi représenté par le faciès des calcaires à algues, qui acquiert plus d'importance dans le miocène supérieur (Dalloni M., 1939). Ces calcaires constituent une

variation latérale de faciès des marnes bleues (Thomas G., 1985). Les couches à algues succèdent en continuité à la série détritique de base et demeurent gréseuses à leur base (Saint-Martin J. P., 1990). Ces formations se prolongent latéralement vers le Sud-ouest de Djebel El Khaloua, en continuité sur les grès roux de Djebel Djorf.

#### 1.3.3.2.2. Messinien

Le Messinien est représenté au Nord de la région de la source Anatra au Djebel Bou Midouna, par des marnes gréseuses brunes, des bancs de grès et des lits de gypse. L'étage messinien est connu par les fameuses formations diatomitiques (formations El-Bordj) et celles des calcaires récifaux.

##### ❖ **Les formations diatomitiques ou formations El-Bordj :**

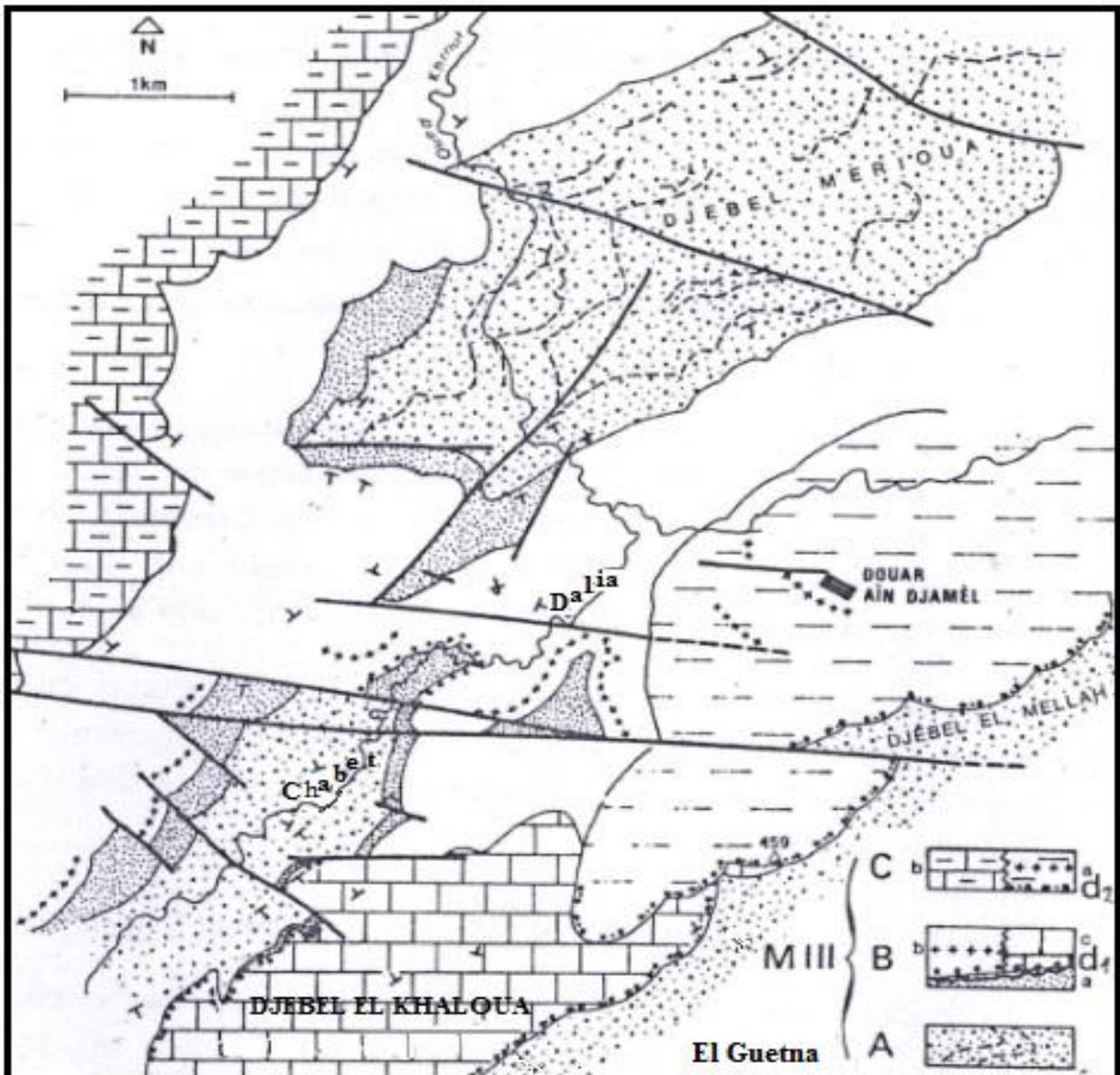
Ces formations sont représentées par un faciès à tripolis, typique de celles du Murdjadjo. Ces diatomites sont déposées en milieu littoral peu profond. A Chabet Naga, les formations d'El-Bordj n'atteignent qu'une épaisseur de 40m seulement (Trenscartes N., 1992). Elles sont marquées par une alternance gréso-diatomitique sur une épaisseur de 14m, une alternance de bancs gréseux friables de couleur jaunâtre et des niveaux argilo-sableux de 20m d'épaisseur (Belkercha M., 2011). À la Chapelle, les dépôts à diatomites sont moins riches en tripolis et plus épais qu'à Chabet Naga (Trenscartes N., 1992).

##### ❖ **Les formations des calcaires récifaux**

Les calcaires récifaux sont très développés au Djebel Cheurfa (Saint-Martin J. P., 1990), représentant l'essentiel de la sédimentation du Miocène supérieur en équivalence partielle avec les formations diatomitiques qui disparaissent dans ce secteur (Thomas G., 1985).

## **1.4. Le Quaternaire**

Le quaternaire est formé par des alluvions qui tapissent les lits de Oued El Hammam et Oued Mabtouh. Les séries détritiques souvent grossières du Néogène sont recouvertes par les épandages quaternaires dans les vallées.



- A. Formation des grès roux.
- B. Formation des marnes bleues avec ses variations de faciès :
  - a : alternances marno-gréseuses.
  - b : marnes à passée cinéritique.
  - c : calcaires à algues du Djebel el Khaloua.
  - d<sub>1</sub> : discordances.
- C. Formation du Murdjadjo avec ses variations de faciès :
  - a : sables d'El Bordj et marnes à passée cinéritique.
  - b : marno-calcaires de Saharidj.
  - d<sub>2</sub> : discordances.

Fig. n°14 : Carte géologique de Dj. el Khaloua et Dj. Merioua (In Thomas G., 1985).

## 2. Aperçu structural

La région de la source Anatra se trouve sur les Monts de Béni-Chougrane, qui sont organisés entre deux sillons (Fig. n°15), Sud et Médian, guidés par des accidents NE-SW, et des décrochements transverses à jeu sénestres (Thomas G., 1985). La disposition NE-SW a été enregistrée par les isopaches du miocène post-nappes (Perrodon A., 1957).

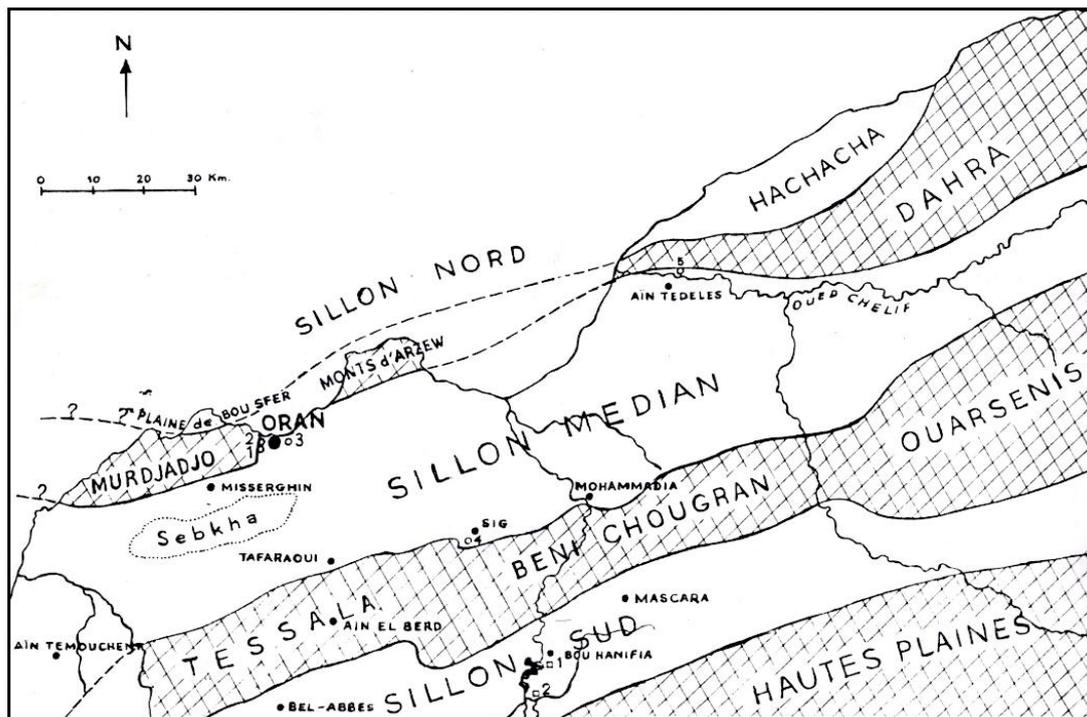


Fig. n°15 : Structure générale de l'Oranie (In Delfaud J., et al. 1973)

La sédimentation miocène est caractérisée par deux cycles sédimentaires, et s'est effectuée sous le contrôle tectonique, par deux actions :

- ❖ Une transtension au cours de miocène moyen, caractérisé par les dépôts du 1<sup>er</sup> cycle post-nappe, sont présentés par les formations continentales rouges.
- ❖ Une transpression au cours de miocène supérieur, caractérisé par les dépôts du 2<sup>eme</sup> cycle, des grès roux, des marnes bleues, des diatomites et des calcaires récifaux. La limite entre les deux cycles est marquée par une discordance progressive, séparant les grès roux du Tortonien et les formations continentales du Serravalien (Moussa K., 1992).

Les plissements NW-SE, et les failles E-W, ont impliqué des manifestations compressives, qui se traduisent par des anticlinaux (Fig. n°16), comme l'anticlinal du dj. Touaka, dj. Bou Ziri, et l'anticlinal de Chabet Dâlia, et par des synclinaux, comme le petit synclinal de Bou Djebâa, et le synclinal de Dj. Khaloua.

La phase compressive intra-miocène post-nappes (fini-tortonienne) est bien marquée sur la rive d'Oued Mabtouh par un repli anticlinal décamétrique, de direction axiale N30°E (Terscartes N., 1992).

La dépression de Bou Djebâa est le résultat de la manifestation des grands accidents au cours du Pliocène (Fenet B., 1975).

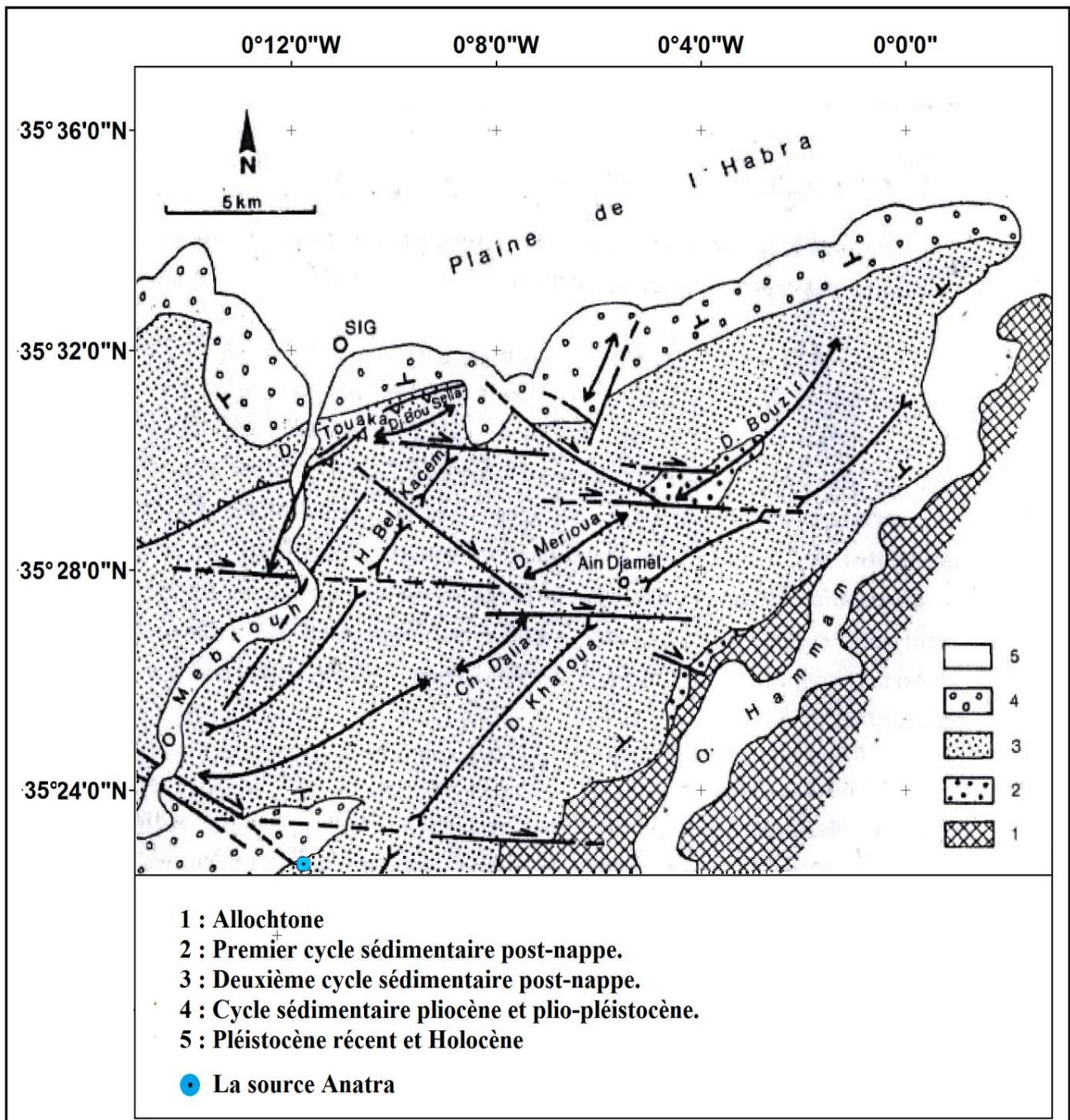


Fig. n°16 : Schéma structural de dj. Khaloua et dj. Bou Ziri (In Thomas G., 1985)

### **3. Propriétés hydrogéologiques des formations**

D'une manière générale, les dépôts néogènes, avec leurs alternances répétées de couches grossièrement détritiques, conglomérats ou grès, essentiellement perméables et de lits argilo-marneux, sont particulièrement favorables à la formation de nappes aquifères.

La région de la source Anatra, est constituée par des formations géologiques, qui ont un intérêt hydrogéologique très important.

#### **❖ La formation des grès roux**

Les grès roux constituent de puissants dépôts dans la région de la source Anatra. Ils sont très fissurés, et caractérisés par une forte perméabilité liée à la porosité primaire (d'interstice) et secondaire (celle de fissures) et parfois tertiaire liée à la dissolution de la matrice carbonatée, pour donner des cavités (Fig. n°21). C'est ce qui explique leur forte capacité de rétention d'eau souterraine.

#### **❖ La formation des calcaires à algues (lithothamnium)**

Dans la région de la source Anatra, les calcaires à algues sont en continuité avec les grès roux. Ces calcaires présentent par endroits des diaclases. Ils sont peu karstifiés à la surface, avec une perméabilité moyenne.

#### **❖ Les formations des marnes bleues**

Les marnes bleues sont des formations imperméables, avec une faible rétention d'eau souterraine. Elles recouvrent les formations détritiques, donnant ainsi naissance à des zones captives, et forment parfois les couches superficielles, afin d'empêcher l'infiltration souterraine.

#### **❖ Les formations diatomitiques**

L'aspect des diaclases et des fissures donne à ces formations diatomitiques une certaine perméabilité. Ces formations sont caractérisées par l'absence de réservoir dans la région de la source Anatra, en raison de leur faible extension latérale et parfois verticale.

### ❖ Les calcaires récifaux

Les calcaires récifaux occupent une grande partie de Djebel Cheurfa jusqu'aux Monts d'Ouled Ali. Leur extension leur confère une importance hydrogéologique. Elles sont caractérisées par une perméabilité de fissures, et la construction récifale facilite la dissolution.

### ❖ Les formations alluvionnaires

Les alluvions sont des formations caractérisées par une forte capacité de rétention souterraines, constituent des zones d'échange entre les eaux de surface d'oued Mabtough, Oued El Hammam et les eaux souterraines. La source Ain Toulba est drainée à travers les alluvions pour sortir à Ch. Oum ech-Chaâbe.

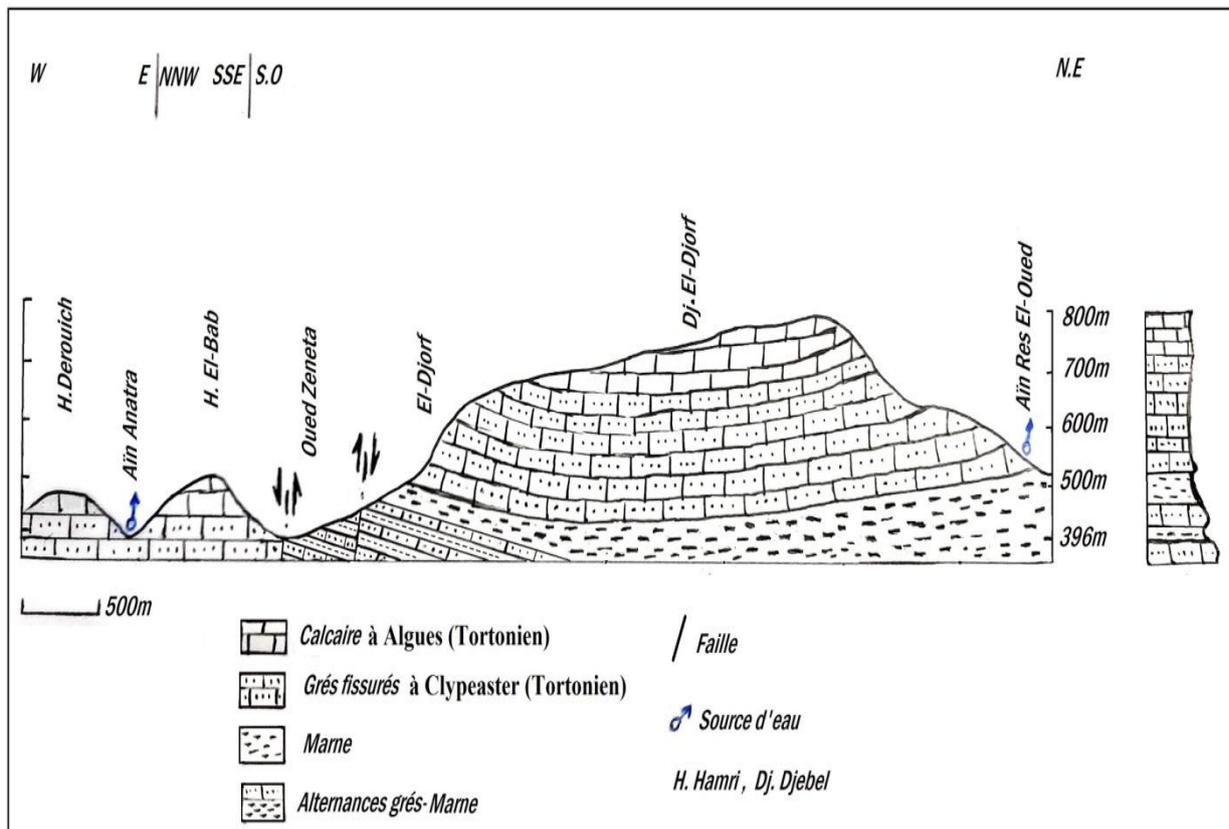


Fig. n°17 : Coupe géologique schématique de la région de la source Anatra

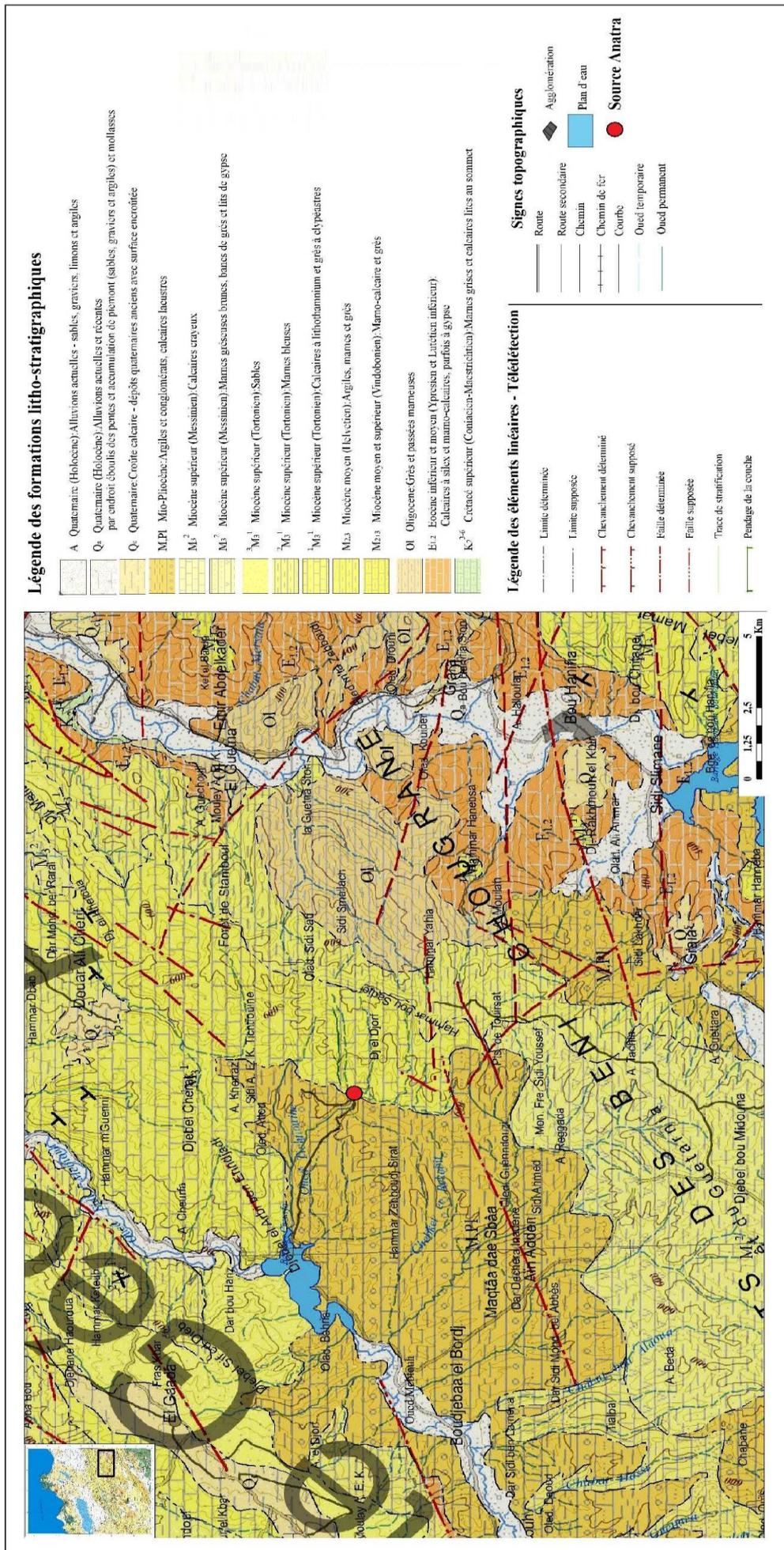


Fig. n° 18 : Carte géologique , aperçu sur la région de la source Anatra (D'après la carte géologique 1/200 000 de ANRH 2008. Edition :ME . ENERGOPROJEKT )

#### 4. Etat d'émergence de la source Anatra

La position des exutoires (les sources) d'une nappe est conditionnée par la géométrie relative entre le réservoir aquifère, les formations imperméables et la surface topographique (Gilli É., Mangan Ch., Mudry J., 2008), Pour la source Anatra qui se trouve sur la rive droite d'Oued Zeneta, elle émerge dans une dépression topographique à la faveur d'une faille NE-SW (Fig. n°20), à travers les formations de grès roux à clypeaster, très fissurées (Fig. n°19).



Fig. n°19 : La dépression topographique de la source Anatra

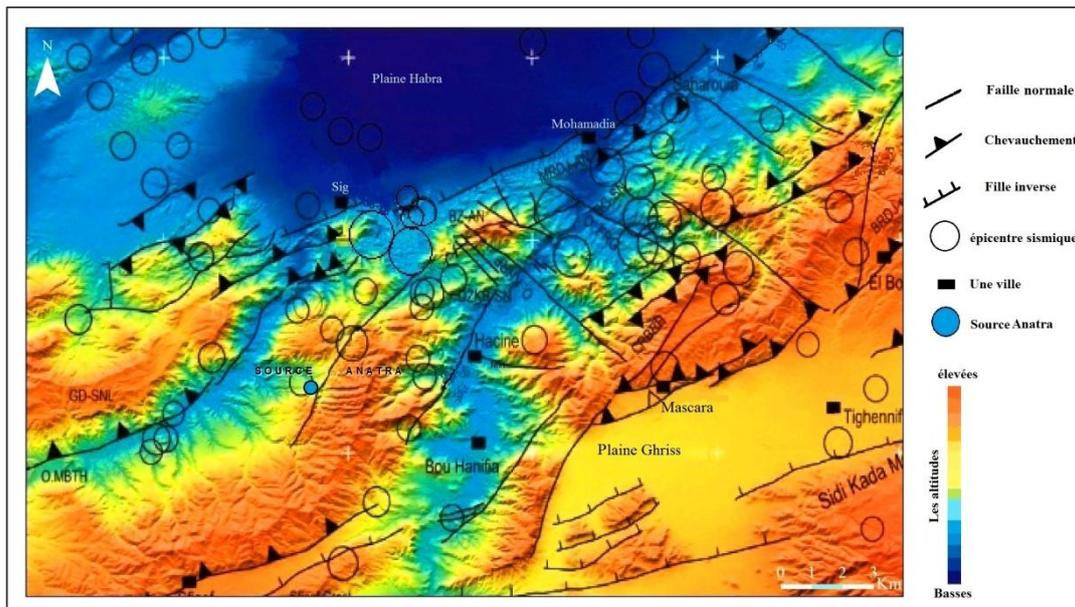


Fig. n°20 : Carte sismotectoniques des Monts de Béni-Chougrane et les principales failles géologiques (In Refas S., 2019) modifiée

Dans la dépression où la source Anatra émerge, les grès roux à clypeaster sont surmontés par des calcaires à algues qui sont plus dures que la formation gréseuse à la base, la dissolution du ciment des grès élargit les fissures et donne des cavités souterraines (Fig. n° 21).

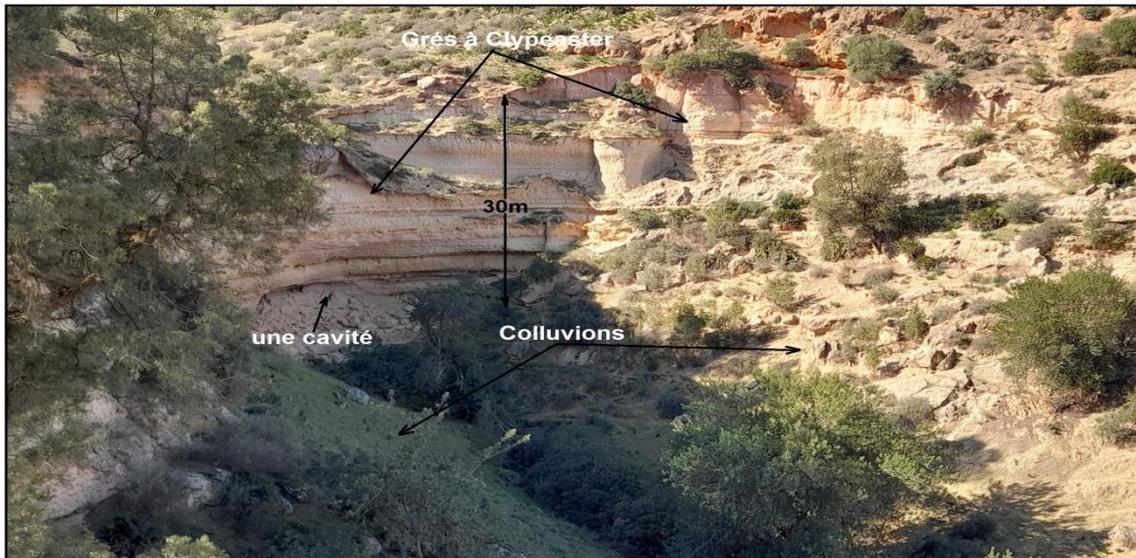


Fig. n°21 : Photo montrant une cavité dans la dépression de la source Anatra

D'après l'étude du contexte géologie, hydrogéologie et structural et en tenant compte aussi les résultats obtenues dans le chapitre de l'hydrodynamique et celui de l'hydrochimique, nous avons considéré que la source Anatra c'est source de type exsurgence caractérise une nappe karstique (Fig. n°22).

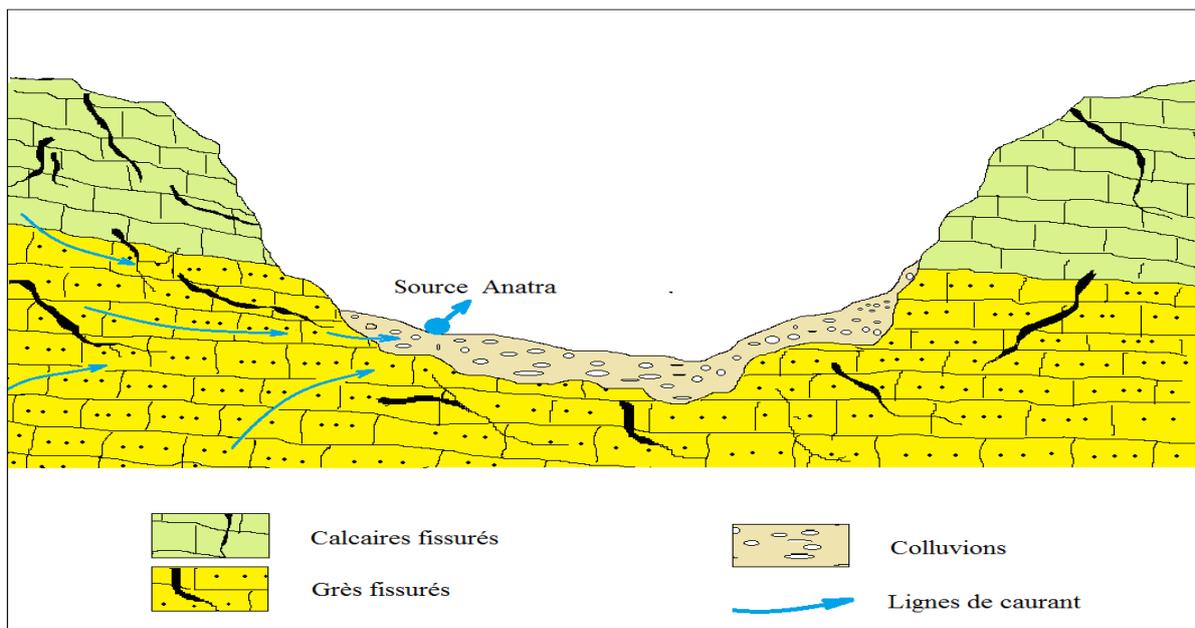


Fig. n°22 : Schéma de la source Anatra (Exsurgence)

## 5. Conclusion

La synthèse géologique de la zone étudiée nous a permis de constater que le massif de la source Anatra est composé par des affleurements gréseux surmontés par des formations carbonatées.

Le secteur de la source Anatra est le résultat d'une phase tectonique compressive se traduisant par la formation d'anticlinaux et synclinaux.

La nature des formations géologiques affleurant dans cette région a influencée le comportement hydrogéologique. En effet, le terrain est formé par des calcaires peu karstifiés favorisant l'infiltration des eaux souterraines, et par des grès permettant la circulation souterraine à travers des fissures et des cavités, résultant de la dissolution de la matrice carbonatée de ces grès.

Les calcaires à algues et les grès à clypeaster forment dans cette région un aquifère du miocène supérieur, capté par plusieurs forages au niveau d'Ouled Ali Bouziane.

**CHAPITRE III**  
**ETUDE HYDRODYNAMIQUE**

## Introduction

La majorité des formations géologiques qui constituent la région de la source Anatra sont des formations carbonatées. Au niveau de la source, ces formations surmontent les grès. Généralement, les formations carbonatées subissent les phénomènes de karstification.

Dans ce chapitre, nous allons étudier les débits de la source Anatra, afin de mieux connaître les caractéristiques et le fonctionnement hydrodynamique de cette source.

### 1. Débits de la source Anatra

Les mesures des débits de la source Anatra sont basées sur une méthode volumétrique, elle consiste en la mesure du temps nécessaire au remplissage d'un seau étalonné (Fig. n°23).

Compte tenu de la difficulté de la mesure du débit à l'exutoire, nous avons réalisé une conduite, pour que l'eau se déverse par gravité dans le seau (Fig. n°23), en permettant la mesure du temps à l'aide d'un chronomètre.

Nous avons changé le seau au fur et à mesure de l'augmentation du débit, le plus grand seau que nous avons utilisé est celui de 40l, idéal pour les débits de hautes eaux de notre source. Afin d'augmenter la précision finale, on doit toujours répéter la mesure plusieurs fois de suite et retenir comme valeur la moyenne des mesures.

Les mesures de débits sont effectuées à pas de temps constant sur un cycle hydrologique. La chronique des mesures de débit que nous avons constituée est une chronique de débit hebdomadaire. Nous l'avons réalisée durant la période allant du 27/03/2020 au 31/03/2021.



Fig. n° 23 : Source Anatra

## 2. Hydrogramme de la source Anatra

L'hydrogramme est la représentation graphique de la variation du débit d'une source, en fonction du temps, la représentation peut être sur une échelle arithmétique ou logarithmique. La figure n°24, montre la variation des débits de la source Anatra durant l'année 2020-2021.

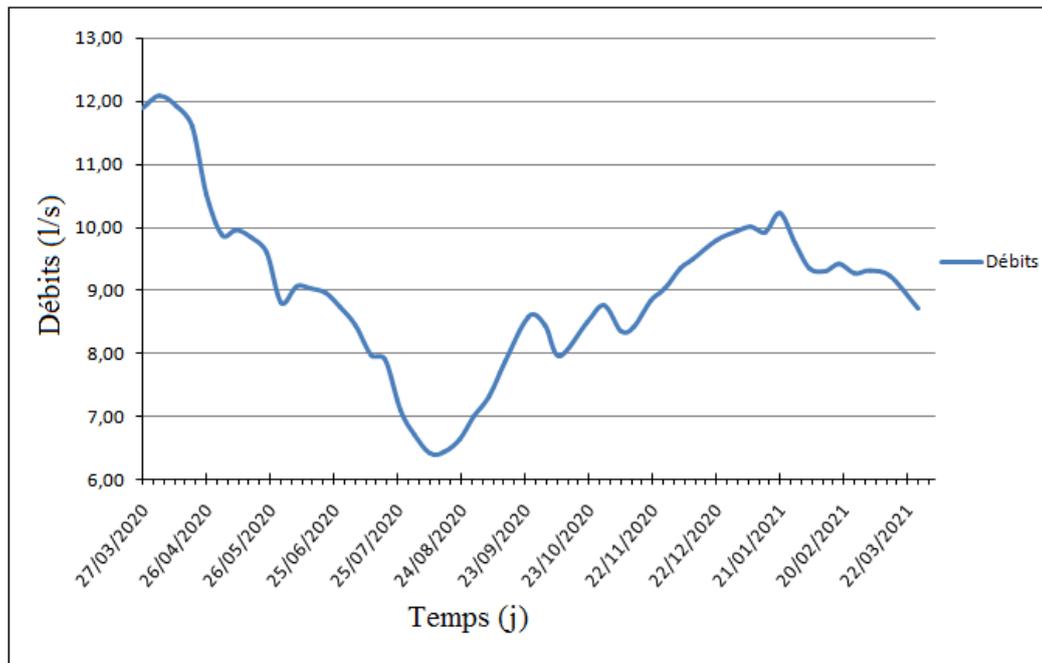


Fig. n° 24 : Hydrogramme de la source Anatra, période 2020-2021

La chronique des débits permet d'approcher de façon satisfaisante le débit moyen écoulé pendant la période du 27/03/2020 au 31/03/2021. Elle fournit en outre l'hydrogramme à travers lequel, on peut estimer directement les périodes des hautes eaux et les basses eaux.

Le débit moyen de la source Anatra est estimé à  $9,01 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$  et le volume de transit de  $284\,137 \text{ m}^3$  relatif à la période indiquée précédemment.

## 3. Aire d'alimentation

Le fait d'établir un bilan hydrologique des bassins est utile, notamment pour déterminer la surface du bassin d'alimentation (Duran L., 2015). Les paramètres tels que les pluies efficaces sont déterminées généralement au pas de temps annuel (Dörfliger N. et al., 2010) selon la formule suivante:

$$P_{eff} = P - ETR$$

Une tentative de bilan hydrologique a été faite sur l'année 2020-2021, du 01/04/2020 au 31/03/2021. L'évapotranspiration réelle (ETR) (Annexe n°8) a été calculée au pas mensuel à l'aide de la formule de Thornthwaite sur chaque mois, puis sommée pour obtenir une valeur annuelle (Tableau n°10).

Tableau n° 10 : paramètres pour le calcul de la surface du bassin d'alimentation

Pluie totale (mm)	ETR (mm)	Pluie efficace (mm)	V transit (m <sup>3</sup> )
169	142	27	284 137

Les valeurs obtenues (Tableau n°10), nous permettent de calculer la surface du bassin d'alimentation par la formule suivante :

$$S = \frac{V_{trans.}}{P_{eff}}$$

La surface du bassin d'alimentation de la source Anatra, calculée à partir des données précédentes est d'environ 11 km<sup>2</sup>.

## 4. Identification des caractéristiques de la source

### 4.1. Indice de variabilité

L'indice de variabilité (Iv) a été proposé par H. Paloc en 1965 et il est appliqué par plusieurs hydrogéologues (Mangin 1975, Fabre 1983, Muet 1985, Jakada H. et al, 2019). Cet indice est le rapport entre le débit maximum et le débit minimum correspondant successivement aux hautes eaux et basses eaux.

$$Iv = \frac{Q_{max}}{Q_{Min}}$$

On peut estimer que pour des indices de variabilité inférieurs à 10, la fonctionnalité karstique est très faible (In Dörfliger N. et al, 2010).

Les mesures de débits de la source Anatra au cours de l'année 2020 et 2021 nous ont donné un débit maximum mesuré au mois d'avril 2020 (hautes eaux) et un débit minimum

enregistré au mois d'août 2020 (basses eaux). L'indice de la variabilité de la source Anatra est égal à 1,88.

## 4.2. Débits classés

La méthode d'analyse des débits classés a pour objectif de caractériser les différents régimes d'écoulement observables au niveau d'un exutoire, en identifiant des événements particuliers (fuites, mise en fonctionnement d'un trop plein) à partir des modifications qu'ils induisent sur l'hydrogramme.

L'interprétation des diagrammes de débits classés repose sur l'identification d'anomalies affectant la droite représentative (Fig. n°25). Ces anomalies sont représentées par des variations de la pente. L'information obtenue sur le fonctionnement du système est différente selon les ruptures qui apparaissent dans la partie du graphique relative aux forts ou aux faibles pourcentages (Tableau n°11), (Marsaud B., 1997).

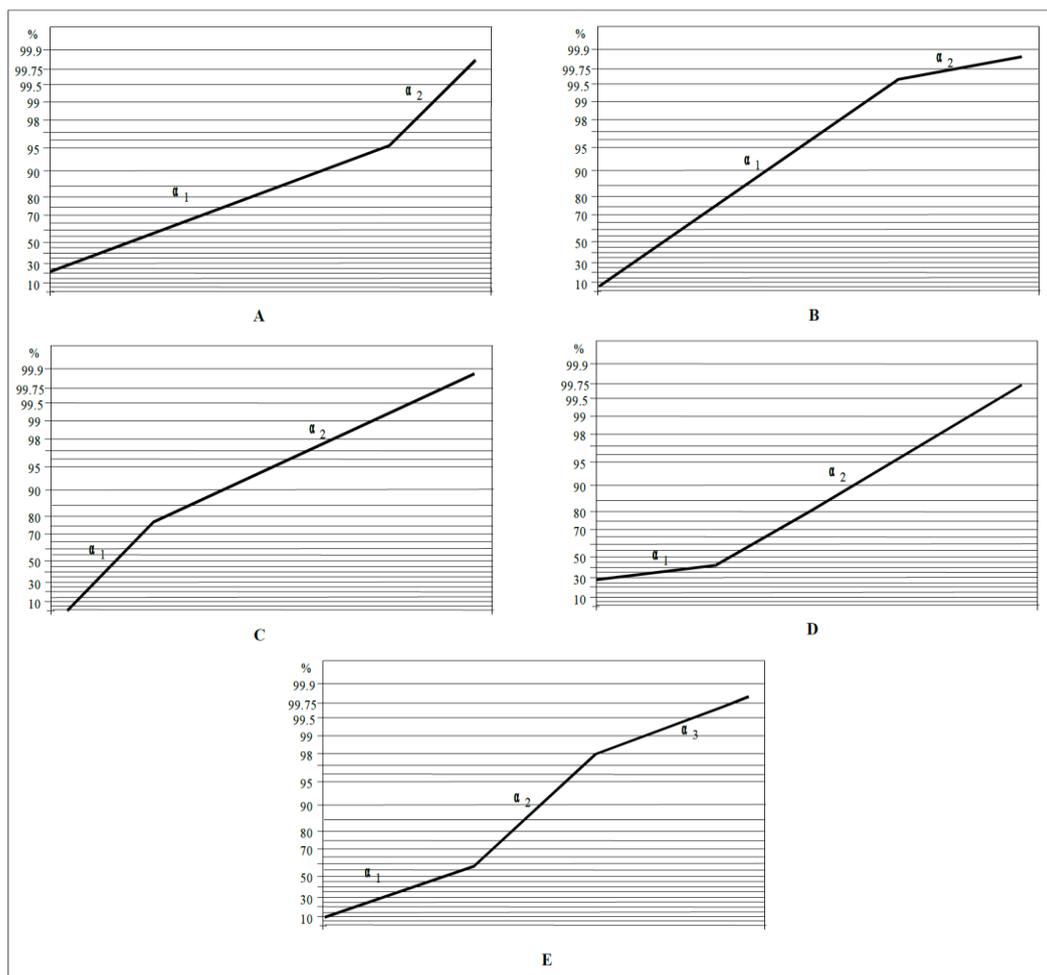


Fig. n°25 : Courbes des débits classés présentées par différents cas de rupture de pente de la droite (Marsaud B, 1997)

Tableau n°11 : Interprétation des différents cas de rupture de la droite (In El Hakim M., 2005)

Cas	Pentes des droites	Position de la rupture	Interprétation
A	$\alpha_2 > \alpha_1$	Forts pourcentages	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Mise en fonctionnement de trop-plein</li> <li>- Fuites vers un autre système</li> <li>- Stockage momentané</li> <li>- Fuites ou débordement de la station de jaugeage lors des hautes eaux</li> </ul>
B	$\alpha_2 < \alpha_1$		
C	$\alpha_2 < \alpha_1$	Faibles pourcentages	- Apports d'une réserve issue d'un cycle antérieur
D	$\alpha_2 > \alpha_1$		- Constitution d'une réserve
E	$\alpha_2 > \alpha_1$ $\alpha_3 < \alpha_2$	Double rupture	- Piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement

Dans notre travail, nous avons analysé les débits classés appliqués à la chronique des débits mesurés pendant la période du 01/04/2020 au 31/03/2021 (365 jours). Cette analyse a été réalisée avec un même intervalle de classes (Annexe n°10), qui est égal à 0,5l/s (Fig. n°26).

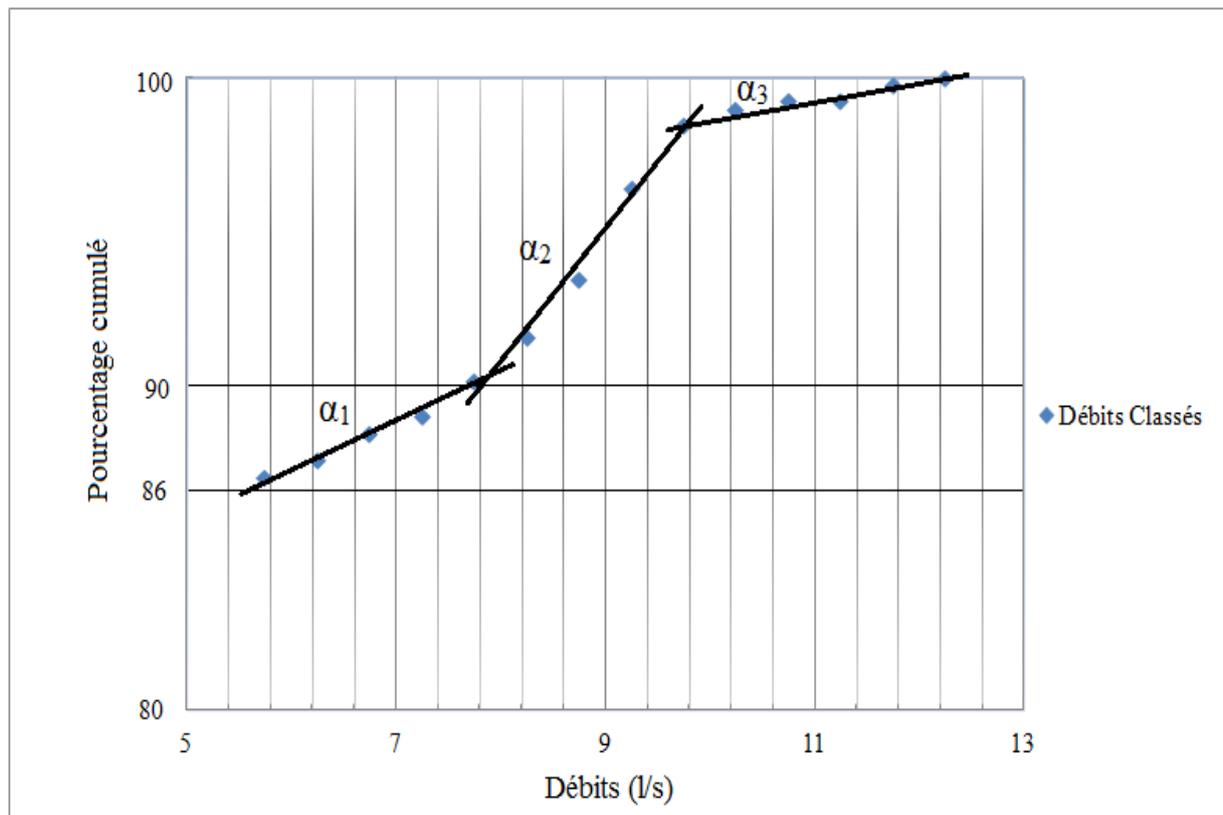


Fig. n°26 : Courbe de débits classés de la source Anatra

La courbe de débits classés de la source (Fig. n°26) est représentée par une double rupture de pente similaire aux forts pourcentages, la première rupture à 8,10 l/s et la deuxième à 9,75 l/s.

La configuration des débits classés de notre source est celle du cas E (Fig. n°25), décrit par Marsaud B. (1997) : il s'agit du piégeage d'une réserve lors de la décrue et restitution au cours du tarissement.

### 4.3. Analyse de la courbe de récession

La courbe de récession est la partie décroissante de l'hydrogramme. Elle présente la décroissance observée du débit d'une source. Elle peut se décomposer en courbe de décrue qui décrit la zone noyée en régime influencé et courbe de tarissement qui décrit la vidange de la nappe lorsque la pluie a cessé (Fig. n°27).

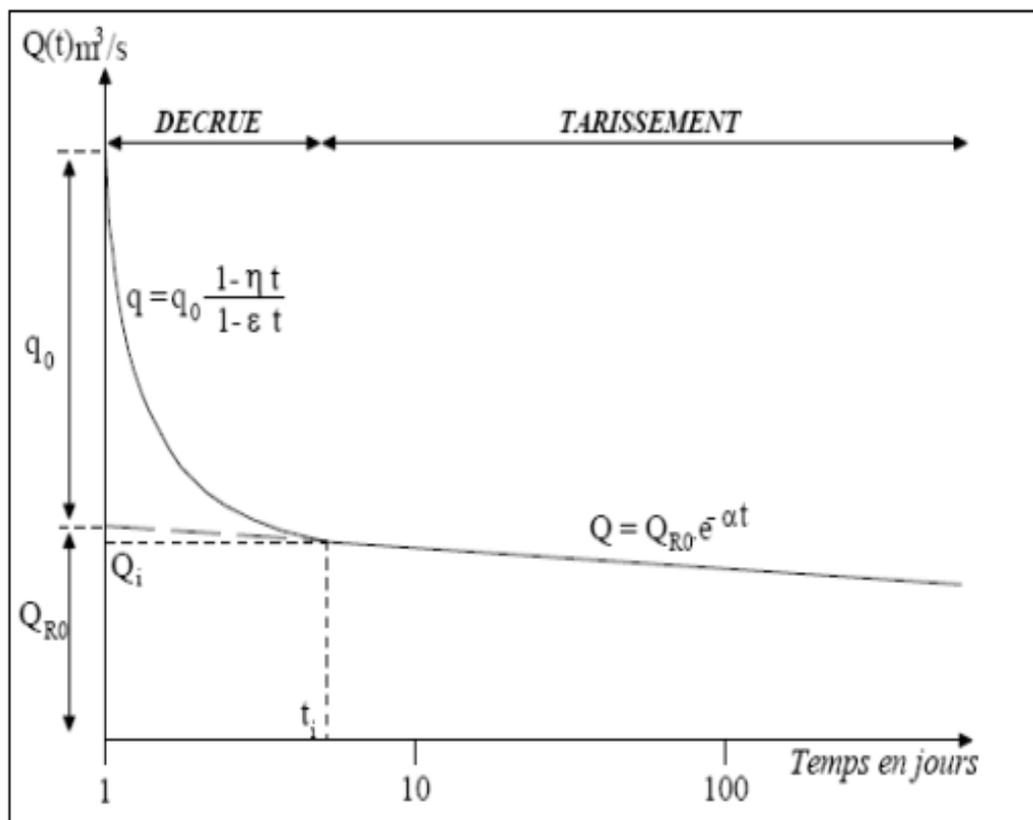


Fig. n°27 : Décomposition de la récession selon la méthode de Mangin  
(In Marsaud B., 1997)

L'analyse de cette courbe a été proposée par Mangin A. (1970) dans le but d'estimer l'importance des ressources en eau et certaines caractéristiques d'un système karstique. Depuis, de très nombreux articles ont été consacrés à cette méthode, toujours actuelle (Seguin

J., 2015). Elle pourrait être utilisée pour décrire le drainage des réserves aquifères au fil du temps (Jakada H. et al, 2019). Les principales caractéristiques d'un système sont :

- Le Coefficient de tarissement  $\alpha$  : il rend compte de l'inertie du système. Les valeurs de  $\alpha$  vont de  $10^{-3} \text{ j}^{-1}$  pour un système très inertielle, mal drainé, donc peu karstifié, à  $10^{-1} \text{ j}^{-1}$  pour un système peu inertielle, donc très karstifié (In Mathevet T., 2002). Lorsque  $Q_t$  ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) est le débit à  $t \neq t_0$  ; et  $Q_0$  est le débit à  $t = t_0$ ;  $\alpha$  est une constante dépendant uniquement des systèmes hydrauliques de l'aquifère (In Gizzi M. et al., 2020). Le coefficient de tarissement est donné par la formule de Maillet :

$$\alpha = \frac{\log Q_{R0} - \log Q_t}{e(t - t_0)}$$

$Q_{R0}$  est le débit du tarissement.

- Le Coefficient d'infiltration  $\eta$ . Il rend compte de la vitesse d'infiltration.  $\eta$  varie théoriquement entre 0 et 1, et l'infiltration est d'autant plus rapide que  $\eta$  tend vers 1 (In Dubois E. et al., 2019).

$$\eta = 1/t_i$$

$t_i$  est le temps où le tarissement a commencé

- Le Coefficient d'hétérogénéité de l'écoulement  $\varepsilon$ . Lorsque ce coefficient est élevé (1 à 10), il caractérise un système où l'infiltration rapide prédomine, alors que lorsqu'il est faible (0.01 à 0.001), il caractérise un système où l'infiltration est lente (In El Hakim M., 2005).

Le volume dynamique  $V_d$  est le volume des réserves de la zone saturée de l'aquifère, il détermine les variations de débit à l'exutoire en l'absence de crue (In Lo Russo S. et al., 2014), ce paramètre est défini par la formule suivante :

$$V_d = Q_i \cdot \frac{1}{\alpha} \cdot C$$

Avec  $C$  = constante de temps ( $C = 86400$  lorsque  $Q_i$  est exprimé en  $\text{m}^3/\text{s}$  et  $\alpha$  en jours)

$Q_i$  : débit correspondant au temps  $t_i$

$\alpha$  : Coefficient de tarissement

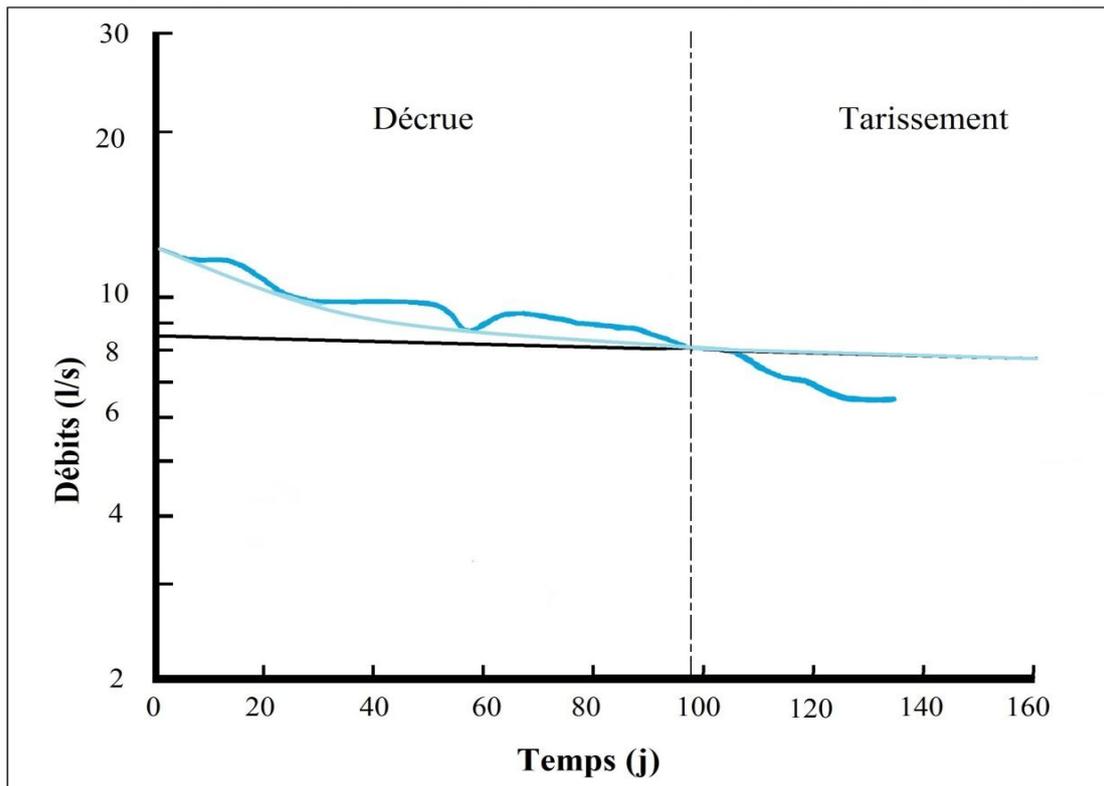


Fig. n°28 : Courbe de récession de la source Anatra

Tableau un°12 : Paramètres de la courbe de récession de la source Anatra

$t_i$ (j)	$\eta$ ( $j^{-1}$ )	$\varepsilon$ ( $j^{-1}$ )	$q_0$ ( $m^3/s$ )	$Q_{R0}$ ( $m^3/s$ )	$Q_i$ ( $m^3/s$ )	$\alpha$ ( $j^{-1}$ )
97	0.0103	0.0206	$3,58 \times 10^{-3}$	$8,5 \times 10^{-3}$	$8,12 \times 10^{-3}$	$0,5 \times 10^{-3}$

#### 4.4. Diagramme de Mangin

A partir de l'analyse des courbes de récession, les systèmes karstiques peuvent être classés et comparés, en fonction des caractéristiques de leur zone d'infiltration et de leur zone noyée. Les deux paramètres utilisés sont :

Le Coefficient  $k$ , qui traduit le pouvoir régulateur d'un aquifère. Il correspond à la capacité d'un système à stocker les précipitations et à les restituer au cours du temps. Il renseigne ainsi sur l'importance de la zone saturée. Ce coefficient est calculé par le rapport du volume dynamique sur le volume de transit moyen annuel du système. Dans le domaine karstique,  $k$  est généralement inférieur à 0.5 et une valeur tendant vers 0 indique un pouvoir régulateur faible.

$$k = V_{\text{Dyn.}} / V_{\text{Trans.}}$$

Le Coefficient  $i$ , qui traduit les retards à l'infiltration d'un aquifère. Le coefficient  $i$  donne ainsi une idée sur le degré de karstification d'un système (*In Dubois E. et al., 2019*). Il est d'autant plus faible que le système est bien drainé, que la karstification est forte. Au contraire, un  $i$  fort indique un mauvais drainage et un système peu karstifié.

$$i = (1 - \eta t) / (1 + \epsilon t)$$

Le Coefficient  $i$  est calculé pour  $t = 2$  jours (*In Dörfliger N. et al., 2010*), (*In Duran L., 2015*).

Tableau°13 : Paramètres du diagramme de Mangin pour la source Anatra

$i$	$V_{\text{Dyn.}} (m^3)$	$V_{\text{Trans.}} (m^3)$	$k$
0,94	1 403 136,00	284 137,00	4,94

Le diagramme est composé par cinq domaines de référence, définis par Mangin (Fig. n°29) :

- (1) Le domaine des systèmes complexes, systèmes généralement de grande taille et dont la structure est faite de nombreux sous systèmes ;
- (2) Le domaine des systèmes karstiques plus karstifiés à l'amont qu'à l'aval et avec des retards dans l'alimentation dus, soit à la présence de terrains non karstiques, soit à une couverture neigeuse importante ;
- (3) Le domaine des systèmes possédant un réseau de drainage très développé, avec une zone noyée peu importante ;
- (4) Le domaine des systèmes possédant un réseau spéléologique bien développé et débouchant à l'aval sur un important karst noyé ;
- (5) Le domaine des aquifères non karstiques selon Mangin A. et Marsaud B. (*In Ablaoui H., 2007*). Système avec une zone phréatique profonde, en partie ou totalement confinée sous une couche imperméable, largement karstifiée selon Bakalowicz et El Hakim (*In Duran L., 2015*).

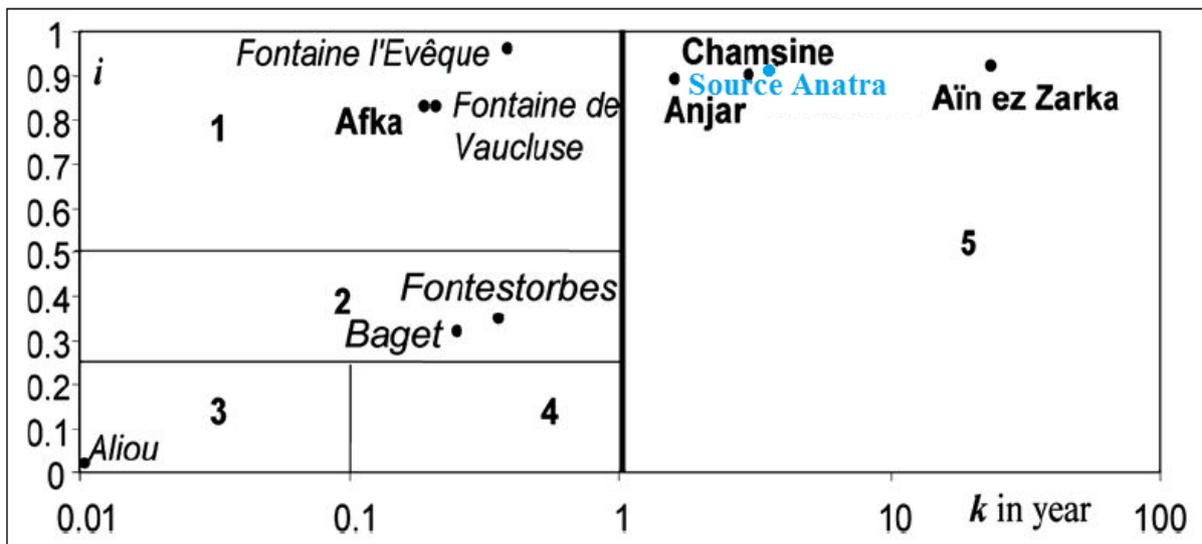


Fig. n°29 : Position de la source Anatra dans le diagramme de Mangin (1975),  
(Modifié par El Hakim et Bakalowicz, 2007)

Nous avons indiqué dans les paragraphes précédents que les coefficients  $k$  et  $i$ , représentant respectivement la capacité de régulation du système (stockage / évacuation des précipitations) et les conditions d'infiltration (rapide contre retardée) respectivement. Le système de la source Anatra a une capacité de régulation élevée ( $k \approx 5$  ans), similaire à un aquifère poreux. Il a un délai d'infiltration faible,  $i$  de 0,94 caractérisant un système avec un stockage important. Les deux paramètres  $k$  et  $i$  classent l'aquifère de la source Anatra dans le domaine 5 sur le diagramme de Mangin.

## 5. Analyses corrélatoires et spectrales

L'analyse corrélatoire étudie la pondération relative des événements entre eux dans le domaine temporel. L'analyse spectrale traduit les périodicités du signal en décomposant la variance de la variable étudiée dans le domaine fréquentiel. L'analyse simple correspond au traitement d'une seule chronique, par exemple celle d'entrée ou celle de sortie, et l'analyse croisée traite simultanément deux chroniques : l'une considérée comme chronique d'entrée du système, l'autre étant la chronique de sortie.

L'application de ces analyses aux systèmes karstiques repose sur le fait qu'un système possède un comportement de filtre : l'état du système ne dépend que des entrées les plus récentes. En d'autres termes, un système possède une mémoire plus ou moins longue des entrées antérieures, et le comportement du système est plus ou moins inertiel (Marsaud B., 1997).

Deux paramètres influencent ce pouvoir de filtre : l'importance des réserves et le réseau de drainage. Le pouvoir de filtre du système est d'autant plus grand que le système possède des réserves et que le drainage est médiocre, ce qui a pour conséquence de modifier le signal d'entrée en le filtrant. Un système bien drainé possède peu de réserves, et le signal pluie n'est pas déformé ; il se produit de grandes crues et peu de stockage.

### **5.1. Paramètres de caractérisation du comportement du système**

1- L'effet mémoire : identifié sur le corrélogramme simple, correspond à la valeur de  $k$  (jours) pour  $r(k)=0.2$ . Cet effet est proportionnel au pouvoir de filtre du système ; il est inversement proportionnel au degré de karstification. Il traduit la dépendance dans le temps des valeurs du débit en présentant une décroissance plus ou moins rapide de la corrélation (Mangin A., 1984).

2- La fréquence de coupure correspond à la fréquence pour laquelle le spectre devient négligeable (In Dörfliger N. et al., 2010). Elle quantifie la régulation induite par le système qui, en fonction de son caractère inertiel, filtre l'information à court terme et la restitue à l'échelle du cycle annuel ou pluriannuel.

3- Le temps de régulation définit la durée d'influence du signal d'entrée ; c'est la longueur de la réponse impulsionnelle. Il correspond au temps égal à l'ordonnée maximale du spectre divisé par 2. Plus il est grand, plus le système possède un comportement inertiel, plus les réserves sont grandes et moins le système est karstifié (Marsaud B., 1997).

### **5.2. Autocorrélation**

L'autocorrélogramme de la pluviométrie (signal entrée) (Fig. n°30) et celui du débit (signal sortie) (Fig. n°31), est une illustration de la fonction d'autocorrélation appliquée à la chronique hebdomadaire. Nous avons utilisé la macro Xlstat, option Time (analyse de séries temporelles), afin de faire l'analyse corrélatrice et spectrale en traçant les graphiques (analyse à court terme), ( $k = 7$  ;  $m = 20$ ).

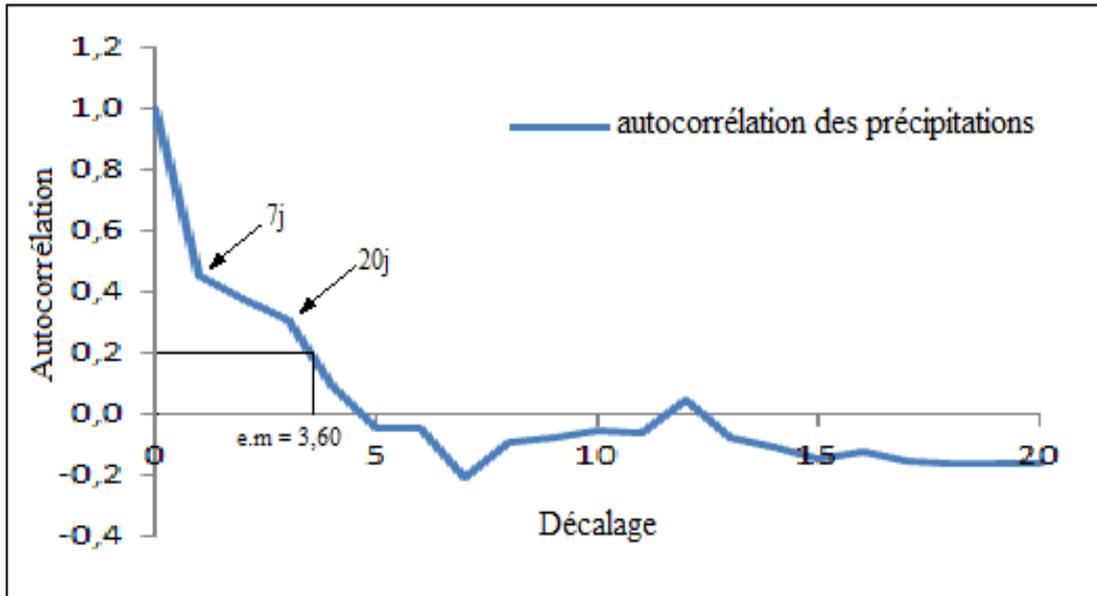


Fig. n°30 : Autocorrélogramme de pluviométrie de la région de la source Anatra à court terme

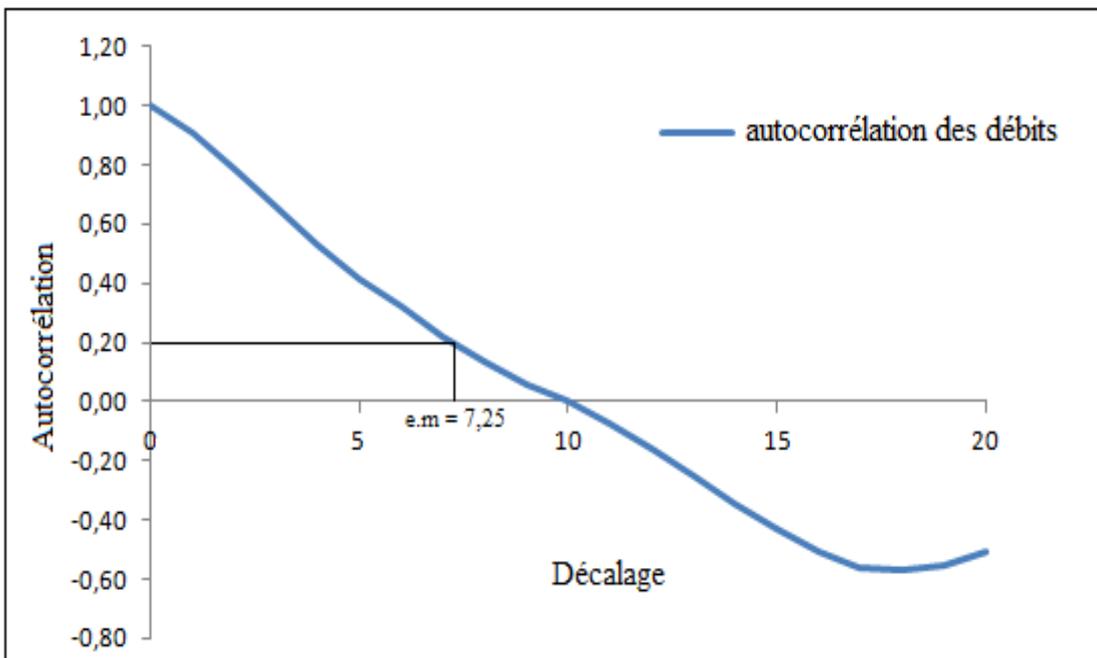


Fig. n°31 : Autocorrélogramme des débits (Qs) de la source Anatra à court terme

Pour la chronique de pluviométrie, la figure n°30 montre que la décroissance rapide du corrélogramme est ralentie par deux cassures à 7 jours et 20 jours, ce qui peut être interprété comme le temps séparant des événements pluvieux d'une certaine importance.

Le corrélogramme a une allure aléatoire à partir de 25 jours. L'autocorrélogramme des débits (Fig. n°31) montre un étalement de la courbe de corrélation qui se traduit par une

décroissance lente des débits, afin d'être inférieur à 0,2 à partir de 51 jours. Cela signifie que le système a une réserve importante, ce qui confirme les résultats de la courbe de récession.

### 5.3. Analyse corrélatrice croisée

L'intercorrrelation ou corrélation croisée permet de déterminer la corrélation entre deux séries temporelles  $x_t$  (entrée) et  $y_t$  (sortie), décalées dans le temps (Fig. n°32). L'intercorrrelation renseigne sur l'intensité de la corrélation en fonction du décalage temporel.

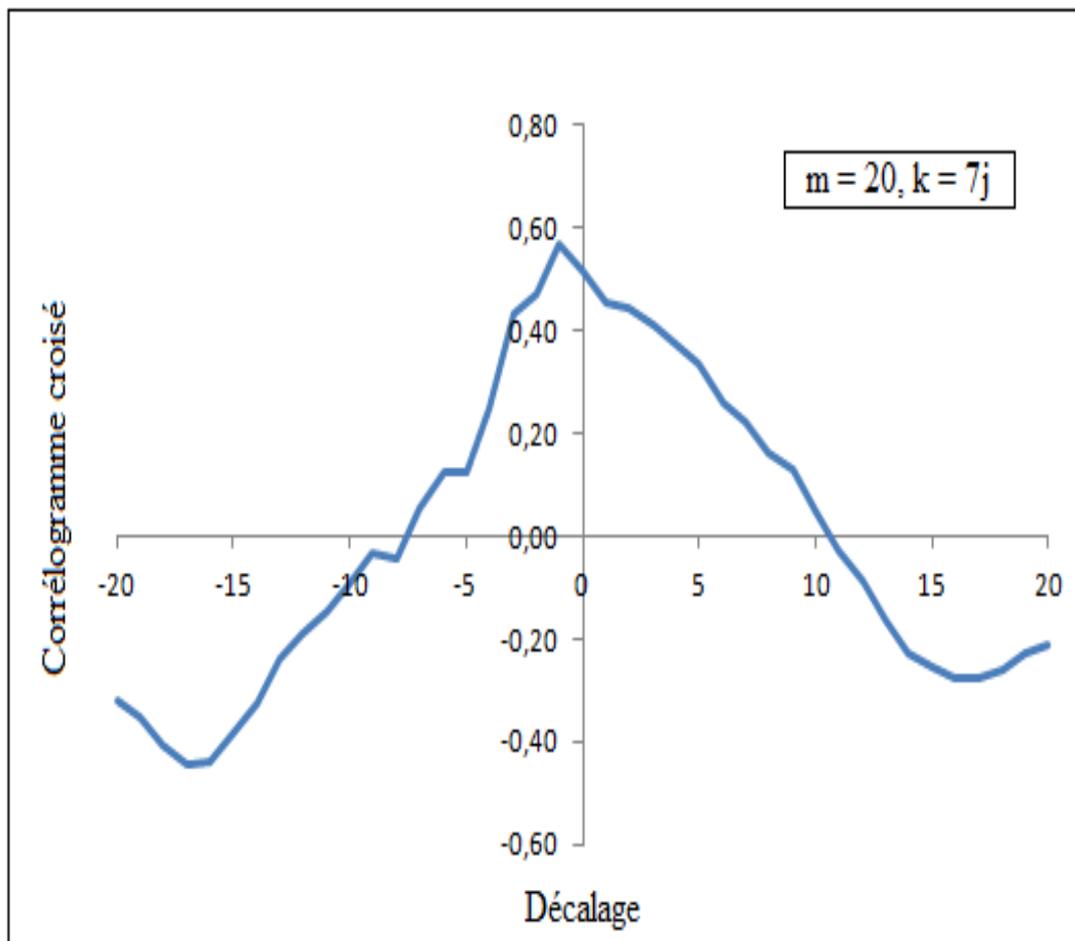


Fig. n°32 : corrélogramme croisé (à court terme)

La réponse impulsionnelle ou le temps de réponse est un indicateur quantitatif, défini comme le temps entre  $k$  (temps)=0 et le maximum de  $r_{xy}(k)$  (In Moussu François M., 2011).

Dans notre cas, le pas chronique hebdomadaire ne permet pas d'interpréter le corrélogramme croisé, car ce dernier n'est pas représenté par une valeur maximale bien individualisée dans sa partie positive, et dans ce cas, on ne peut pas définir le temps de régulation.

## 5.4. Analyse spectrale

L'analyse spectrale simple permet d'identifier les différentes composantes de la variance totale en fonction de la fréquence.

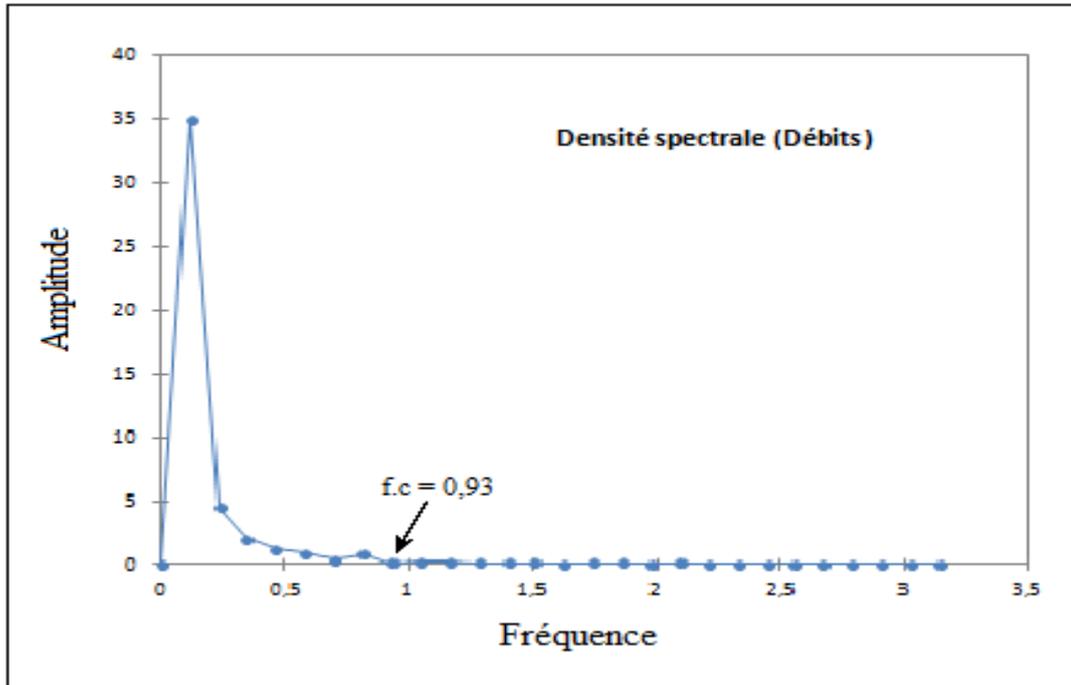


Fig. n°33 : Spectre simple des débits de la source à courte terme

Dans notre cas, la figure n°33 montre les fréquences de coupure, qui sont représentées par une bande spectrale étroite de 0,93, ce qui traduit que l'aquifères a un degré de karstification faible, la réserve est importante avec un temps de régulation long.

## 6. Conclusion

L'analyse hydrodynamique de la source Anatra a mis en exergue plusieurs caractéristiques de son fonctionnement, et la présence de réserves relativement importantes avec un drainage karstique peu fonctionnel. Ceci nous a permis de considérer ce système fissuré comme peu karstifié, permettant une régulation du signal d'entrée. La courbe de récession a montré un temps de séjour relativement long sous l'effet d'une circulation lente. Les analyses de la courbe de débits classés montrent qu'on a un piégeage d'une réserve lors de la décrue. Ce piégeage peut-être localisé au niveau des cavités caractérisant les grès. Ces résultats sont obtenus sur la base de la méthode de mesure des débits au pas de chronique hebdomadaire. Ils auraient besoin d'être confirmés par d'autres méthodes, en mesurant les débits journaliers par exemple.

**CHAPITRE IV**  
**ETUDE HYDROCHIMIQUE**

## **Introduction**

Les méthodes d'analyse physico-chimique des eaux et la détermination de leurs teneurs sont d'une grande importance, car elles permettent d'avoir une idée sur la nature des formations géologiques traversées par ces eaux. Dans cette partie de notre travail, nous allons interpréter les données physico-chimiques disponibles, afin de situer la source Anatra dans son contexte hydrochimique.

### **1. Données hydrochimiques disponibles**

Une partie des données utilisées dans ce chapitre provient du laboratoire de l'Algérienne des eaux (ADE) de Mascara (Annexe n°1). Six prélèvements ont été effectués par ce laboratoire depuis l'année 2019, afin d'analyser les éléments majeurs, ainsi que les paramètres physiques. L'autre partie (Annexe n°2) a été faite au niveau d'un laboratoire privé d'analyse de la qualité (Laboratoire du Dr. AYAT Mohamed, Oran).

Nous avons respecté le protocole d'échantillonnage de l'eau, en utilisant des flacons en verre de 1000ml conservés à température basse au cours du transport, pour analyser les cations et les anions. Lors du prélèvement, nous avons mesuré les paramètres physiques tels que la température et la conductivité in situ.

### **2. Paramètres physiques**

#### **2.1. Température**

La température de l'eau souterraine varie en fonction de la profondeur du gisement d'eau d'origine, du temps de transit dans le sous-sol, de la longueur du trajet parcouru et de la vitesse de remontée. Elle est ainsi influencée par les taux de mélanges avec les eaux superficielles.

La température joue un rôle important dans la dissolution des sels et des gaz, et dans la détermination du pH. La mesure de température se fait sur le terrain (in-situ) grâce à un thermomètre, elle est exprimée en degré Celsius (C°).

La température moyenne de la source Anatra, mesurée au cours du prélèvement, est de 22,5C°.

## 2.2. Potentiel d'hydrogène (pH)

Le pH ou le potentiel d'hydrogène est le logarithme décimal de l'inverse de la concentration de l'ion d'hydrogène ( $H^+$ ). Ce paramètre donne une indication de l'acidité ou l'alcalinité d'une eau, ainsi que son état d'équilibre carbonique. La mesure du pH se fait in-situ par une méthode colorimétrique ou électrométrique à l'aide d'un pH-mètre,

$$pH = -\log (H^+) = \log 1/ (H^+)$$

Le pH d'une eau varie entre 1 et 14. Pour cette raison, on distingue trois classifications de milieux de l'eau (Tableau n°14). Le pH des eaux naturelles varie généralement de 7,2 à 7,6 (Rodier J., 2009).

Tableau n°14 : Classification de l'eau en fonction du pH

pH	Milieu
pH = 7	Milieu neutre ( $H^+$ ) = ( $OH^-$ )
pH > 7	Milieu basique ( $H^+$ ) < ( $OH^-$ )
pH < 7	Milieu acide ( $H^+$ ) > ( $OH^-$ )

Tableau n°15 : les valeurs du pH de la source Anatra

pH	Max.	Moyen	Min.	Ecart-type
	8,24	7,89	7,26	0,38

Les valeurs du pH présentées dans le tableau n°15 montrent que l'eau de la source Anatra a un pH autour de la neutralité avec une tendance basique.

## 2.3. Conductivité

La conductivité est un moyen d'information privilégié, qui sert de référence lors de toute étude hydrogéochemie (Bakalowicz M., 1979). Elle est donnée par la mesure de la capacité de l'eau à conduire un courant électrique entre deux électrodes métalliques de 1 cm<sup>2</sup> de surface, et séparé l'une de l'autre de 1 cm, donc c'est une mesure indirecte de la teneur de l'eau en ions.

La mesure de la conductivité permet d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau, donc la minéralisation de l'eau. Elle est exprimée en  $\mu S/cm$  ou  $S/cm$ .

Tableau n°16 : Classification des eaux en fonction de la conductivité (Potelon, 1993)

La conductivité	La minéralisation
$\sigma < 100 \mu\text{S/cm}$	Minéralisation très faible
$100 < \sigma < 200 \mu\text{S/cm}$	Minéralisation faible
$200 < \sigma < 400 \mu\text{S/cm}$	Minéralisation peu accentuée
$400 < \sigma < 600 \mu\text{S/cm}$	Minéralisation moyenne
$600 < \sigma < 1000 \mu\text{S/cm}$	Minéralisation importante
$\sigma > 1000 \mu\text{S/cm}$	Minéralisation excessive

Tableau n°17 : Conductivité de la source Anatra

Conductivité ( $\mu\text{S/cm}$ )	Max.	Moyen	Min.	Ecart-type
	607,00	575,83	537,00	23,70

Les eaux de la source ont une conductivité comprise entre 400 et 600  $\mu\text{S/cm}$ , ce qui correspond à une minéralisation moyenne (Tableau n°16) si on se réfère à la classification internationale et une eau de bonne qualité, peu minéralisée comparée aux eaux souterraines algériennes.

### 3. Paramètres chimiques

#### 3.1. Balance ionique

La balance ionique a pour but de tester la qualité des analyses. Elle est donnée par la relation suivante :

$$E\% = [(\sum rC - \sum rA) / (\sum rC + \sum rA)] * 100$$

Avec :

**rC:** Quantités en réaction des cations,

**rA:** Quantité en réaction des anions,

**E% :** Pourcentage d'erreur.

Tableau n°18 : Classes d'erreur des analyses chimiques

$E < 2 \%$	$2 \% < E < 5 \%$	$E > 5 \%$
Bonne analyse	Analyse acceptable.	Mauvaise analyse

Dans notre travail, nous avons considéré l'erreur comprise entre 2% et 7% comme acceptable (Annexe n°1 et 2).

### 3.2. Les éléments majeurs

Les éléments majeurs sont des éléments essentiellement présents dans la composition chimique des eaux. Il est très important de déterminer leur quantité, car elle est permet d'avoir une idée sur la nature des formations géologiques traversées par ces eaux.

#### 3.2.1. Les Cations

##### **Calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ )**

Le calcium provient essentiellement de la dissolution des formations carbonatées ou des formations gypseuses. Dans les eaux de la source Anatra, le taux de calcium varie de 50,5 à 91,8 mg/l. provient de la formation des calcaires à algues.

##### **Magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ )**

Ses origines sont comparables à celle du calcium. En effet, la présence de cet élément dans la composition chimique des eaux provient de la dissolution des formations carbonatées à fortes teneurs en magnésium (Debileche T.H., 2002), comme les dolomies, les calcaires dolomitiques et les minéraux ferromagnésiens. Sa concentration varie de 33,12 à 64,63 mg/l dans les eaux de la source Anatra.

##### **Sodium ( $\text{Na}^+$ )**

L'origine de cet élément est liée principalement à la dissolution des évaporites. En outre, il peut provenir de la décomposition de sels minéraux comme les silicates de sodium et d'aluminium, de l'intrusion salée, ou d'origine industriels (Belghiti M.L. et al., 2013). Il varie de 50,20 à 90 mg/l.

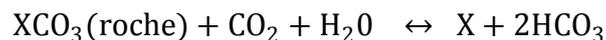
### **Potassium (K<sup>+</sup>)**

Le potassium est un élément très fréquent dans les argiles potassiques comme les illites, il provient également des évaporites comme la Sylvine, Généralement, la teneur des eaux en potassium est très faible par rapport à celles des autres cations, on trouve rarement une eau à des teneurs en potassium supérieures à 20 mg/l (Amroune A., 2018). Il varie de 1,75 à 3,72 mg/l dans l'eau de la source.

### **3.2.2. Les Anions**

#### **Bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>)**

Le système calco-carbonique est un système complexe d'ions interdépendants (F. Hoffmann, J. C. Pellegrin 1996). Les bicarbonates résultent de la dissolution des formations carbonatées (calcaires, dolomies) par des eaux chargées en gaz carbonique (CO<sub>2</sub>) selon l'équation :



L'élément (X) peut être le (Ca<sup>2+</sup>), ou le (Mg<sup>2+</sup>) (Beaudry et Henry, 1984).

Les eaux de notre source contiennent entre 256,20 et 340,40 mg/l.

#### **Carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)**

L'acide carbonique (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>) se décompose en ion bicarbonate (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>), puis en ion carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>). La présence et les proportions de ces deux ions dépendent du pH de l'eau. En dessous d'un pH de 8,3, le carbonate (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) est tenu pour négligeable (Hoffmann F. et Pellegrin J. C., 1996), et seul pris en compte les bicarbonates (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>). Les analyses n'indiquent aucune valeur de CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>.

#### **Chlorures (Cl<sup>-</sup>)**

Les chlorures sont des anions inorganiques contenus dans les eaux souterraines en concentration variables. La présence de cet élément est liée principalement à la dissolution des formations salifères, les évaporites qui constituent la source principale de cet enrichissement (*In* Mekebret I., 2017). Sa teneur varie entre 89,15 et 117,15 mg/l.

### Sulfates (SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>)

La présence des ions sulfatés dans les eaux est liée principalement à la dissolution des formations gypseuses, comme ils peuvent avoir une origine météorique, ou une origine anthropique, comme l'activité agricole, l'utilisation domestique (détergents), ou d'une activité biologique naturelle. Leur teneur varie de 53,87 à 120,44 à mg/l.

### Nitrates (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)

Les nitrates représentent la forme la plus oxydée de l'azote, c'est la forme la plus soluble. La teneur naturelle des eaux souterraines en nitrate est faible. Leur présence dans les eaux peut être d'origine atmosphérique. Elle dépend également des types de sol et de la couverture végétale. La teneur élevée en nitrate dans les eaux est un indicateur de pollution, d'origine anthropique. L'eau de la source Anatra en contient entre 8,5 et 23,04 à mg/l.

## 3.3. Alcalinité

L'alcalinité d'une eau correspond à la présence de bases et de sels d'acides faibles. Dans les eaux naturelles, l'alcalinité résulte le plus généralement de la présence de carbonates, hydrogénocarbonates et hydroxydes (Legube B. et Merlet N., 2009). On distingue deux titres qui sont le titre alcalimétrique ou titre alcalimétrique simple (TA) et le titre alcalimétrique complet (TAC) en tenant compte de la valeur du pH.

- Titre alcalimétrique simple (TA), correspond à la mesure des bases fortes:

$$TA = [CO_3^{2-}] + [OH^-]$$

- Titre alcalimétrique complet (TAC) mesure les bases fortes et faibles :

$$TAC = [HCO_3^-] + [CO_3^{2-}] + [OH^-]$$

Le pH des eaux de notre source est compris entre 7,26 et 8,24. Cet intervalle indique un TA nul, donc l'alcalinité de l'eau de la source se résume par la mesure de son TAC (Tableau n°19).

Tableau n°19 : Titre alcalimétrique complet (TAC) de la source Anatra

TAC	Max.	Moyen	Min.	Ecart-type
(°F)	27,90	23,99	21,00	2,27

### 3.4. Dureté totale

Elle s'appelle aussi titre hydrotimétrique (TH) et correspond à la teneur globale de l'eau en cations bivalents comme le calcium ( $\text{Ca}^{2+}$ ) et le magnésium ( $\text{Mg}^{2+}$ ), mais également en cations trivalents comme le fer ferrique ( $\text{Fe}^{3+}$ ) et l'aluminium ( $\text{Al}^{3+}$ ) (Anctil F., 2008). La dureté est directement liée à la nature des terrains traversés,

$$\text{TH} = [\text{Ca}^{2+}] + [\text{Mg}^{2+}] + [\text{Fe}^{3+}] + [\text{Al}^{3+}]$$

La quantité en réaction du calcium [ $\text{Ca}^{2+}$ ] représente la dureté calcique, et la quantité en réaction du magnésium [ $\text{Mg}^{2+}$ ] représente la dureté magnésienne. Ces deux cations proviennent essentiellement de la dissolution des roches calcaires ou dolomitiques, favorisée par la présence du gaz ( $\text{CO}_2$ ). La dureté totale s'exprime en degrés français ( $^{\circ}\text{F}$ ).

Tableau n°20 : Classification de l'eau en fonction de la dureté totale

Dureté totale en $^{\circ}\text{F}$	$0 < \text{TH} < 7$	$7 < \text{TH} < 22$	$22 < \text{TH} < 32$	$32 < \text{TH} < 54$	$\text{TH} > 54$
Qualificatif de l'eau	Douce	Modérément douce	Assez douce	dure	Très dure

Tableau n°21 : Conductivité de la source Anatra

La dureté totale ( $^{\circ}\text{F}$ )	Max.	Moyen	Min.	Ecart-type
	41,00	37,67	32,00	3,61

Sur la base de la classification du tableau n°20 (Théobald et Gama, 1969), les valeurs de la dureté totale mesurée au niveau de la source sont comprises entre 32 et 41  $^{\circ}\text{F}$ , ce qui les classe parmi les eaux dures (tableau n°21).

### 3.5. Indice de déséquilibres Chloro-alkalin (I.D.C)

L'indice de déséquilibre Chloro-alkalin (I.D.C) permet de mettre en évidence les modifications du chimisme de l'eau au cours de son trajet souterrain. Par définition, l'I.D.C. est le rapport entre les ions échangés et les ions de même nature primitivement existants dans l'eau (In Bouselsal B., 2016). Schöeller l'a exprimé par la relation suivante:

$$\text{I. D. C} = \frac{[\text{rCl} - \text{r}(\text{Na} + \text{K})]}{\text{rCl}}$$

- I.D.C. est négatif alors les ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau sont échangés contre les ions  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  des formations encaissantes.
- I.D.C. est positif, alors les ions  $\text{Na}^+$  et  $\text{K}^+$  de l'eau sont remplacés par les ions  $\text{Mg}^{2+}$  et  $\text{Ca}^{2+}$  des formations encaissantes.
- I.D.C. = 0, alors il y a un équilibre entre les compositions chimiques de l'eau et celle du terrain encaissant.

Tableau n°22 : Valeur de l'indice déséquilibre Chloro-alkalin (I.D.C)

Elément	$r\text{Cl}^-$	$r\text{Na}^+$	$\text{K}^+$	I.D.C
Valeur	2,82	2,88	0,07	-0,04

Les calculs ont donné une valeur I.D.C négative, qui reste proche de l'équilibre. Cela pourrait suggérer un faible échange cationique des ions  $\text{Ca}^{2+}$  et  $\text{Mg}^{2+}$  de l'eau avec les ions  $\text{K}^+$  et  $\text{Na}^+$  des formations aquifères.

### 3.6. Indice de saturation (I.S)

Cet indice indique les tendances des phases à se dissoudre ou précipiter. Il permet de suivre l'évolution géochimique de l'eau dans l'aquifère, en traduisant les différents processus réactionnels, dont le siège est l'interaction de l'eau avec les matériaux aquifères.

$$I.S = \text{Log}\left(\frac{\text{PAI}}{\text{Kps}}\right)$$

On distingue à travers les valeurs d'indice de saturation les cas suivants :

- $I.S > 0$ , il signifie que l'eau est saturée ou sursaturée à l'égard du minéral qui a tendance à la précipitation.
- $I.S < 0$ , il signifie que l'eau est sous-saturée vis-à-vis du minéral qui a tendance à la dissolution.
- $I.S = 0$ , l'eau est à état d'équilibre.

Dans le but d'interpréter les mécanismes d'acquisition de la minéralisation, nous avons utilisé le programme Phreeq pour calculer les indices de saturation de quelques minéraux.

Tableau n°23 : Valeurs moyenne de l'indice de saturation

Minéraux carbonatés			Minéraux évaporitiques		
Aragonite	Calcite	Dolomite	Anhydrite	Gypse	Halite
0,38	0,50	1,19	-2,08	-1,86	-6,74

Les minéraux carbonatés présentent des degrés de saturation différents (Tableau n°23). En effet, ils ont tous des valeurs positives (annexe n°5), cela signifie que les eaux de la source sont saturées par rapport à ces minéraux.

Les minéraux évaporitiques montrent des degrés de saturation plus faibles que les minéraux carbonatés, puisqu'ils sont tous négatifs. Les eaux de la source Anatra sont sous saturées par rapport à ces minéraux.

### 3.7.Pression partielle de gaz carbonique pCO<sub>2</sub>

Les valeurs de la pCO<sub>2</sub> nous permettent d'avoir des informations sur la nature de la nappe d'où l'eau provient, en comparant ces valeurs avec celles des sols qui atteignent couramment des valeurs de 10<sup>-2</sup> et même 10<sup>-1</sup> atmosphères (Dever, L., 1985), ou avec celles de l'atmosphère, qui sont d'environ 10<sup>-3,5</sup> atmosphères (*In Amroune A., 2018*).

Dans notre cas, les valeurs de pCO<sub>2</sub> (annexe n°5) évoluent dans un intervalle de 10<sup>-1,77</sup> à 10<sup>-2,78</sup> atm. Ces valeurs restent compatibles avec les pCO<sub>2</sub> en milieu ouvert défini par Dever L. (1985), ce qui suggère un contact de la nappe avec l'air, soit une nappe libre ou partiellement libre.

### 3.8.Rapport d'adsorption du sodium SAR

Les eaux de la source Anatra sont utilisées pour l'irrigation des terrains cultivés, se trouvant sur les rives d'oued Zeneta. Sachant que le sodium est l'un des éléments les plus indésirables dans l'eau d'irrigation, nous avons calculé l'indice SAR, qui est donné par la formule suivante :

$$SAR = \frac{rNa}{\sqrt{((rCa + rMg)/2)}}$$

- SAR >9 méq/l, cette eau ne devrait pas être utilisée même si le contenu total en sels est relativement bas. Une irrigation continue avec un SAR élevé provoque une déstructuration du sol.
- SAR se situant entre 0 et 3 méq/l, cette eau peut être généralement utilisée sur tout type de sol.
- SAR se situe entre 3 et 9 méq/l, 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 (*In Couture I., 2006*).

Le SAR des eaux de la source Anatra est de 1,51 méq/. Cette valeur est très faible, donc les eaux de cette source peuvent être utilisées pour l'irrigation de tout type de sol sans aucun risque d'accumulation de sodium.

### 3.9. Classification des eaux de la source

On peut distinguer selon la composition chimique le faciès hydrochimique de l'eau, en tenant compte de la concentration prédominante de tel ou tel anion, puis de celui des cations. Les quantités en réaction calculées (Annexe n°1 et 2) pour les sept prélèvements répartis sur les années 2019, 2020 et 2021, donnent un faciès bicarbonaté calcique et /ou magnésien (Annexe n°3) :

$$\left\{ \begin{array}{l} r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{NO}_3 \\ r\text{Ca} > r\text{Mg} > r\text{Na} > r\text{K} \text{ ou} \end{array} \right.$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r\text{HCO}_3 > r\text{Cl} > r\text{SO}_4 > r\text{NO}_3 \\ r\text{Mg} > r\text{Ca} > r\text{Na} > r\text{K} \end{array} \right.$$

#### 3.9.1. Représentations graphiques

La représentation graphique des analyses chimiques de l'eau permettent de déterminer directement le faciès hydrochimique. Nous avons utilisé les diagrammes de Piper et de Schöeller-Berkaloff.

### 3.9.1.1. Diagramme de Piper

Cette méthode consiste à représenter sur deux triangles les pourcentages des quantités en réactions (r %) de chaque cation et anion. Les deux points sont reportés sur un losange en un seul point qui représente la famille chimique de l'eau. Ce diagramme présente l'avantage de pouvoir regrouper un grand nombre d'analyses.

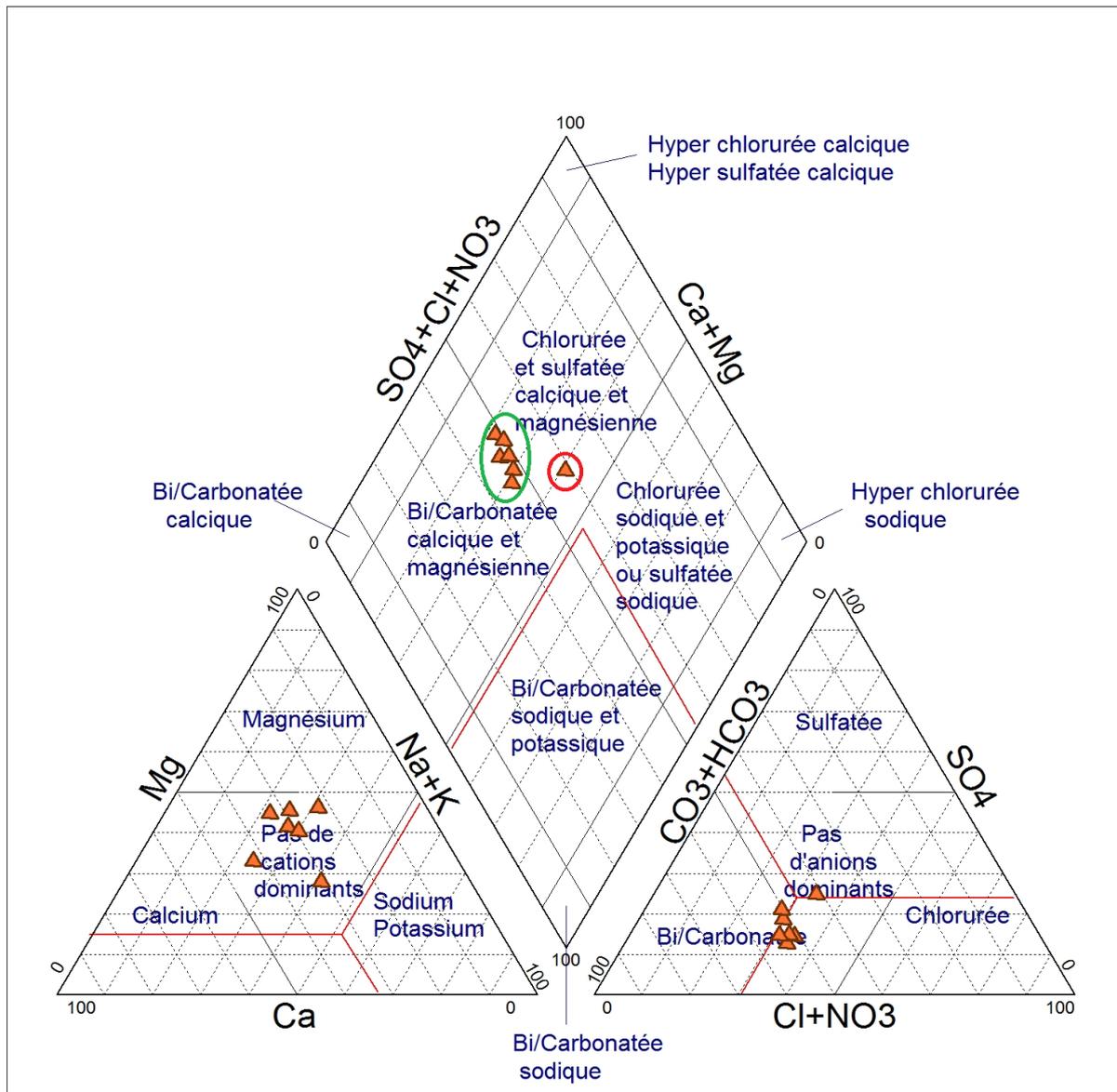


Fig. n°34 : Classification des eaux de la source Anatra (Diagramme de Piper)

La représentation graphique de Piper confirme les résultats précédentes, le faciès des eaux de la source Anatra est bicarbonaté calcique et magnésien.

Le point présentant en cercle rouge, concernant l'échantillon prélevé le 12/01/2021, sa formule caractéristique donne un faciès bicarbonaté sodique (Annexe n°3) et chlorurée et

sulfatée calcique et magnésienne par le diagramme de Piper, cette différence nous permet de dire qu'il y a une erreur d'analyses.

### 3.9.1.2. Diagramme de Schöeller-Berkaloff

Ce diagramme a pour objectif de représenter les éléments chimiques de l'eau en mg/l sur des colonnes semi logarithmique (Fig. n°35), en liant les points correspondants aux teneurs des éléments chimiques. Le faciès chimique est donné par l'anion et le cation prédominant.

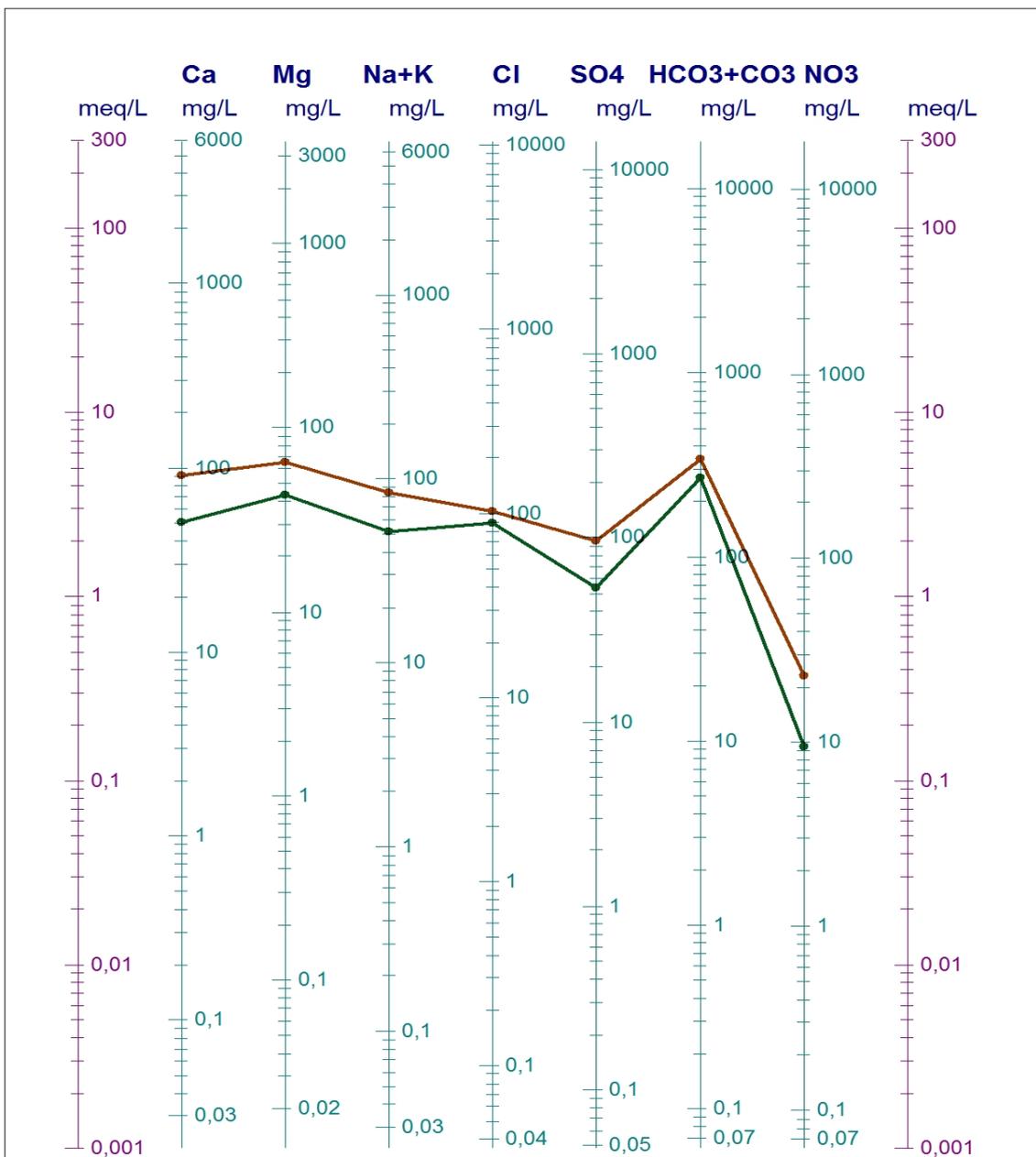


Fig. n°35 : Classification des eaux de la source Anatra  
(Diagramme de Schöeller-Berkaloff)

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff confirme le faciès bicarbonaté calcique de l'eau de la source Anatra.

### **3.10. Les rapports caractéristiques**

L'étude des rapports caractéristiques entre certains éléments chimiques permet de déterminer l'origine géologique et les éléments chimiques prédominants responsables de la minéralisation des eaux souterraines.

#### **Le rapport $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$**

Ce rapport représente une approche de la connaissance de variations des teneurs en chlorures dans le sous-sol. Il permet de distinguer les eaux souterraines qui dissolvent les sels sulfatés, de celles qui dissolvent les sels chlorurés : dans le premier cas, la valeur obtenue doit-être supérieure à 1 et dans la deuxième inférieure à 1 (El Morabiti et al., 2008).

Les rapports  $\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-$  (annexe n°4) ont donnés des valeurs positives inférieure à 1, donc l'eau de la source dissolvent les sels chlorurés (la halite).

#### **Le rapport $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$**

Il permet d'apprécier la part du Magnésium (provenant des roches dolomitiques) par rapport au Calcium. Une valeur élevée serait liée à la présence des dolomies et/ou à un temps de séjour long (Barbieri M. et al., 2005). Si les valeurs de ce rapport sont faibles, ceci est dû à leur enrichissement en ion calcium, qui aurait pour origine l'échange cationique inverse entre l'eau et le substratum marneux (In Mekebret I., 2017).

L'eau de la source Anatra a un rapport  $\text{Ca}^{2+}/\text{Mg}^{2+}$  proche de 1 (annexe n°4), donc il y a pas une grande prédominance des dolomies par rapport aux calcaires. Ceci confirme le faciès chimique de cette eau.

#### **Le rapport $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$ et $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$**

Ces deux rapports sont utilisés pour connaitre la prédominance des formations carbonatées par rapport à celles des évaporites. Le rapport  $\text{Na}^+/\text{Mg}^{2+}$  est inférieur à 1, de même pour le rapport  $\text{Na}^+/\text{Ca}^{2+}$  (annexe n°4). Cela signifie que les formations carbonatées sont prédominantes dans la région de la source Anatra par rapport aux évaporites.

## 4. Conclusion

L'étude hydrochimique nous a permis une meilleure connaissance de la qualité des eaux de la source d'Anatra. En effet, c'est une eau à minéralisation moyenne, voire faible comparée à celle de la majorité des eaux souterraines algériennes. Elle est essentiellement due à la nature lithologique des formations géologiques de la région, ainsi qu'aux phénomènes de lessivage, de précipitation et de dissolution.

Le faciès chimique d'après les diagrammes de Piper et Schöeller et les formules caractéristiques est bicarbonaté calcique et magnésien. Les résultats d'analyse montrent que les eaux de la source sont saturées par les minéraux carbonatés, suggérant un contact assez long avec les roches carbonatées formant l'aquifère, ce qui confirme le faciès chimique défini.

Les valeurs de la  $p\text{CO}_2$  nous permettent de dire que ces eaux proviennent d'une nappe libre ou partiellement libre, ou d'une nappe profonde qui devient libre avant d'arriver à l'exutoire de la source.

L'indice de déséquilibres chloro-alcalin montre que les ions alcalins sont presque en équilibre avec les alcalino-terreux des eaux de la source. Ces dernières sont de bonne qualité pour l'irrigation, sans aucun risque de destruction du sol par l'accumulation de sodium.

Les formations carbonatées sont prédominantes par rapport aux évaporites, et les calcaires prédominent par rapport aux dolomies. Les eaux de la source Anatra continuent de ce fait à dissoudre la halite, en circulant dans le sous sol.

Ces résultats et interprétations, basés sur le peu de données que nous avons-nous même réalisé, méritent d'être complétés par d'autres méthodes géochimiques et analyses isotopiques, pour mieux comprendre le fonctionnement et l'hydrochimisme de cette source.

## **CONCLUSION GENERALE**

## Conclusion générale

Cette étude a permis une meilleure connaissance du fonctionnement de la source Anatra, qui émerge dans la vallée faisant partie du sous bassin versant d'oued Mabtough qui, à son tour, appartient au bassin versant de la Macta.

La zone d'étude fait partie des zones semi-arides, caractérisée par une faible et une irrégularité des précipitations, de l'ordre de 338 mm annuellement, avec une baisse notable dans le temps, de 49% environ si l'on compare l'année 2011 et celle de 2020.

La reconnaissance des différents affleurements sur le terrain et la synthèse de quelques travaux géologiques effectués sur la région nous ont permis de constater que le massif drainé par la source est un terrain constitué généralement par des formations gréseuses et carbonatées du Miocène supérieur, affecté d'une tectonique compressive qui se traduit par des structures synclinales et anticlinales.

Les débits de la source ont été mesurés par une méthode volumétrique, à pas de temps constant hebdomadaire sur un cycle hydrologique pendant les périodes de 2020 et 2021. En tenant compte de la précipitation efficace et du volume total de l'eau écoulée au cours de ce cycle hydrologique, la surface d'alimentation de la source est ainsi calculée, elle est estimée à 11 km<sup>2</sup> environ.

L'analyse de ces débits par différentes méthodes a donné des résultats, qui nous ont permis de mieux comprendre le fonctionnement hydrodynamique de la source Anatra :

Les paramètres de la courbe de récession montrent que la vidange de l'aquifère est lente, elle se traduit par une capacité d'emmagasinement importante.

La représentation de la source sur le diagramme de Mangin montre que la source fait partie du domaine n° 5 correspondant aux domaines non karstiques, ceci est confirmé par la superposition des formations carbonatées sur les formations gréseuses à travers lesquelles la source émerge. Les analyses corrélatives et spectrales confirment les résultats précédents.

L'analyse des données hydrochimiques disponibles nous a permis de déterminer les résultats suivantes :

Les eaux de la source acquièrent les ions  $K^+$  et  $Na^+$  de la formation aquifère en les échangeant par les ions  $Ca^{2+}$  et  $Mg^{2+}$ , sans pour autant qu'ils soient prédominants.

La source provient d'une nappe libre dont les eaux sont de bonne qualité pour l'irrigation de n'importe quel type de sol, sans aucun risque d'accumulation de sodium.

Au vu des connaissances précédentes, on a pu la définir comme une source de type exsurgence.

La classification des eaux selon la méthode de Piper et Schöeller-Berkaloff montre un faciès bicarbonaté calcique et magnésien, confirmé par les rapports caractéristiques. L'indice de saturation vient corroborer ces résultats, puisque les eaux de cette source sont sursaturées en calcite, aragonite et dolomite, et sous-saturées en gypse, anhydrite et halite.

**REFERENCES**  
**BIBLIOGRAPHIQUES**

## Références bibliographiques

**Ablaoui H., 2007.** Structure et fonctionnement de trois émergences karstiques des monts de Tlemcen à partir des réponses hydrologiques et hydrochimiques. Mémoire de Magister. Univ. Oran, 169 p.

**Aggab Ch., 2014.** Caractéristiques physico-chimiques des eaux de la station de dessalement de Souk Tleta (NW, Algérie). Mémoire d'ingénieur d'Etat en hydrogéologie. Université Aboubekr Belkaid, Tlemcen, pp. 27-35.

**Amroune A., 2018.** Etude de l'apport hydrochimique dans la connaissance du fonctionnement de la nappe alluviale de la région nord du Hodna (Sud-Est algérien). Th. Doct. Univ. Mustapha Benboulaïd Batna 2, 206 p.

**Anctil, F., 2008.** L'eau et ses enjeux. *Les presses de l'université Laval, éditions de Boeck université*, 228 p.

**Bakalowicz M., 1979.** Contribution de la géochimie des eaux à la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification. Th. Doct. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6 et laboratoire souterraine CNRS, 269 p.

**Bakalowicz M., El Hakim M., 2007.** Karst groundwater resources in the countries of eastern Mediterranean : the example of Lebanon. *Environ. Geol.* 54, 597–604 (2008), pp. 597-604.

**Barbieri M. & al., 2005.** Stable isotope ( $^2\text{H}$ ,  $^{18}\text{O}$  and  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, central Italy). In « *Appl. Geochem. vol.20* », pp. 2063–2081.

**Bekkoussa B. & al., 2013.** Origine de la salinité et des principaux éléments majeurs des eaux de la nappe phréatique de la plaine de Ghriss, Nord-Ouest Algérien. *Hydrol. Sci. J.*, vol. 58, n°5, pp. 1-17.

**Belghiti M.L. & al., 2013.** Étude de la qualité physico-chimique et bactériologique des eaux souterraines de la nappe Plio-quadernaire dans la région de Meknès (Maroc). *Larhyss Journal* n°14 (2013), pp. 21-36.

**Belkercha M., 2011.** Les Echinides moi-pliocène de l'Oranie, systématique et intérêt paleogéologique. Mémoire de Magister. Univ. Oran Es-Sénia, pp. 31-33.

**Bouselsal B., 2016.** Etude hydrogéologique et hydrochimique de l'aquifère libre d'El Oued Souf (SE Algérie). Th. Doct. Univ. Badji Mokhtar, Annaba, pp. 91-137.

**Castany G., Margat J., 1977.** Dictionnaire français d'hydrogéologie, éditions du BRGM, 251 p.

**Castany G., 1998.** Hydrogéologie : Principes et Méthodes. Livre, 2 Cycle. DUNOD, Paris, 238 p.

**Chabbar Ameer R. & al., 1976.** Radiometric age of early Hipparion fauna in northwest Africa, *Nature*, vol. 261, pp. 38-39.

**Couture I., 2006.** Principaux critères pour évaluer la qualité de l'eau en micro-irrigation. *Rapport de CRAAQ (Canada) conférence 2006*, 13 p.

**Dalloni M., 1939.** Géologie appliquée de l'Algérie : Métallogénie-Hydrogéologie-Agrogéologie, p214-862.

**Daum J.R., 1994.** Méthodes du jaugeage des sources. *Rapport BRGM R 38193, décembre 1994*, 68 p.

**Debileche T.H., 2002.** Évolution de la qualité des eaux (salinité, azote et métaux lourds) sous l'effet de la pollution saline, agricole et industrielle. Application à la basse plaine de la Seybouse (Nord-est Algérien). Th. Doct. Univ. Constantine, pp. 37-71.

**Delfaud J. & al., 1973.** Un modèle paléogéographique de la bordure méditerranéenne : évolution de la région oranaise (Algérie) au Miocène supérieur. Conséquences stratigraphiques. *Bull. Soc. Hist. Nat. Afr. N., Alger 64 (1-2)*.

**Dever, L., 1985.** Approches chimiques et isotopiques des inter-réactions fluide-matrice en zone non saturée carbonatée. Th. Doct. Univ. Paris 11, 196 p.

**Dörfliger N. & al., 2010.** Guide méthodologique. Les outils de l'hydrogéologie karstique pour la caractérisation de la structure et du fonctionnement des systèmes karstiques et l'évaluation de leur ressource. *Rapport BRGM/RP-58237-FR (2010)*, pp. 19-105.

**Dubois E. & al., 2019.** Calibration of a lumped karst system model and application to the Qachqouch karst spring (Lebanon) under climate change conditions. *Hydrol. Earth Syst. Sci. vol.24, issue 9 (2020). American university of Beirut (Lebanon)*, 27 p.

**Duran L., 2015.** Approche physique, conceptuelle et statistique du fonctionnement hydrologique d'un karst sous couverture. Th. Doct. Univ. Roune (2015), pp. 170-182.

**El Hakim M., 2005.** Les aquifères karstiques de l'anti-liban et du nord de la plaine de la Bekaa : caractéristiques, fonctionnement, évolution et modélisation, d'après l'exemple du système karstique Anjar-Chamsine (Liban). Th. Doct. Univ. Montpellier 2, Univ. Saint Joseph Beyrouth, 215 p.

**El Morabiti K. & al., 2008.** Hydrogéochimie des sources thermales du couloir sud-rifain (Maroc). *Bull. Hydro. n°22. Centre d'Hydrogéologie, université de Neuchâtel (Suisse)*.

**Fabre, J. P., 1983.** Etude hydrogéologique de la partie sud-est du causse de Martel (Quercy). Th. 3<sup>e</sup> cycle. Univ. Toulouse.

**Fenet B., 1975.** Recherche sur l'alpinisation de la bordure septentrionale du Bouclier africain à partir de l'étude d'un élément de l'Orogène Nord-maghrébin: les Monts du Djebel Tessala et les Massifs du littoral oranais. Th. Doct. Univ. Nice, 301 p.

**Foucault A., 2009.** Climatologie et paléoclimatologie. Livre cours de Master, CAPES, Agrégation. DUNOD, Paris, 308 p.

**Gilli É., Mangan Ch., Mudry J., 2008.** Hydrogéologie : Objets, méthodes, applications. Livre, 2<sup>e</sup> édition. DUNOD, Paris, 339 p.

**Gizzi M. & al., 2020.** Geological and Hydrogeological Characterization of Springs in a DSGSD Context (Rodoretto Valley – NW Italian Alps). In « *E-book Appl. Geol. (2020). University of Turin, Torino (Italy)* », pp. 3-19.

**Haug E., 1911.** Traité de géologie. Paris.

**Hoffmann F., Pellegrin J. C., 1996.** Méthodologies hydrochimiques. *Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée, n°14, Bordeaux (France) Février 1996*, pp. 13-79.

**Imbeaux E., 1930.** Essai d'hydrogéologie. Paris.

**Jakada H. & al., 2019.** Watershed characterization and hydrograph recession analysis : A comparative look at a karst vs non-karst watershed and implications for groundwater resources in Gaolan river Basin, Southern China. *Water 2019, 11, 743. Univ. Geosci. Wuhan 430074 (China)*, 20 p.

**Kouadri S., Zegait R., 2018.** Étude de la qualité des eaux du Mio-pliocènes et vulnérabilité à la pollution dans la région d'El Merk (Sud-est algérien). *Rapport d'université de Kasdi Merbah(Ouargla) et d'université Zian Achor (Djelfa) in SMEEZA'1*, 5 p.

**Lo Russo S. & al., 2014.** Recession hydrographs and time series analysis of springs monitoring data : application on porous and shallow aquifers in mountain areas (Aosta Valley). *Hydrol. Earth Syst. Sci. 73:7415–7434 (2015)*, 20 p.

**Maillet E., 1905.** Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Hermann, Paris, 218 p.

**Mangin A., 1970.** Etude des débits classés d'exutoires karstiques portant sur un cycle hydrologique. *Ann. Spéléo. t.26, fasc. 2, 1971*, pp. 283-329.

**Mangin A., 1975.** Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. 3ème partie. Constitution et fonctionnement des aquifères karstiques. Th. Doct. Univ. Dijon (Français) 1975, pp. 24–114.

**Mangin A., 1984.** Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale. *J. hydrol. vol. 67, issues 1-4*, pp. 25-43.

**Marsaud B., 1997.** Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Th. Doct. Univ. Paris 11 Orsay, pp. 109-166.

**Mathevet T., 2002.** Analyse du fonctionnement du système karstique de Bange - l'eau- Morte (Bauges, Savoie & Haute-Savoie, France). *Rapport de laboratoire Souterrain de Moulis et laboratoire d'hydrogéologie 2002. Université Pierre et Marie Curie, Paris-Sud, école des mines de Paris et l'école nationale du génie rural des eaux et des forêts (France)*, 59 p.

**Mekebret I., 2017.** Synthèse hydrogéologique et origine de la salinité des eaux thermo-minérales du littoral oranais par les méthodes géochimiques et isotopiques. Mémoire de Magister. Univ. Oran 2, 156 p.

**Moussa K., 1993.** Le miocène de la bordure nord des Béni Chougrane : étude stratigraphique et sédimentologique du secteur de Bou Ziri - Oued El Hammam, Mémoire de Magister. Univ. Oran, 236 p.

- Moussu François M., 2011.** Prise en compte du fonctionnement hydrodynamique dans la modélisation pluie débit des systèmes karstiques. Th. Doct. Univ. Pierre et Marie Curie, Paris 6, 199 p.
- Muet, P., 1985.** Structure, fonctionnement et évolution de deux systèmes aquifères karstiques du Nord du causse de Martel (19). Th. 3<sup>e</sup> cycle. Univ. Toulouse.
- Neurdain-Trescartes J., 1992.** Le remplissage sédimentaire du bassin néogène du Chélif, modèle de référence de bassins intra-montagneux. Th. Doct. Univ. Pau, pp. 149 -198.
- Otmane A., 2015.** Prédétermination des valeurs de pluies et crues extrêmes dans le bassin versant de l'Oued Mekerra. Thèse de Magister. Univ. Oran 2 Mohamed Ben Ahmed, pp. 5-19.
- Perrodon A., 1957.** Etude géologique des bassins néogènes sublittoraux de l'Algérie occidentale. Publ. Serv. Carte Géol. Algérie, pp. 91-220.
- Potelon, J. L., Zysman, K., 1993.** Guide des analyses d'eau potable, 155 p.
- Refas S., 2019.** Evaluation of seismic hazard using tectonic fault data : Case of benichougrane mountains (western algeria). *J. Min. Sci., vol. 25, 2018, pp. 123–145.*
- Rodier J., Legube B., Merlet N., 2009.** L'analyse de l'eau, livre 9<sup>e</sup> édition, Dunod, Paris, 2009, pp. 23-134.
- Saint Martin J., 1990.** Les formations récifales coralliennes du miocène supérieur d'Algérie et du Maroc. Mém. Mus. natl. Hist. Nat., sér. C, Tome 56. Paris, pp. 94- 152.
- Schöeller H., 1955.** Hydrogéologie. Paris. Ec. nat. sup. pétrole, 1949, éd. Technip.
- Seguin J. J., 2015.** Méthodes d'évaluation de la recharge des nappes complément d'étude pour la caractérisation des perssions et impacte sur les eaux souterraines. *Rapport final, BRGM/PR-65635-FR, décembre 2015, pp. 75-90.*
- Sorel D., Vergely P., 2010.** Atlas initiation aux cartes et aux coupes géologiques, 2<sup>e</sup> édition, BRGM édition. DUNOD, Paris, 117 p.
- Thomas G., 1985.** Géodynamique d'un Bassin intra-Montagneux. Le Bassin du Bas Chélif Occidental durant le Mio – Plio – Quaternaire. Th. Doct. Univ. Pau, pp. 25-263.
- Tinthoin R., 1937.** Les monts des Ouled-Ali esquisse morphologique. *In « Annal. Géo., t. 46, n°262 », pp. 374-389.*

## **ANNEXES**

## ANNEXES

Annexe n°1: Quantités en réaction des éléments chimiques

Date de prélèvement	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	B. I.	Analyse
03/05/2019	2,52	3,95	2,18	0,04	4,70	2,80	1,12	0,17	1	Bonne
24/06/2019	3,06	4,09	2,63	0,06	4,40	2,80	1,23	0,15	7	Acceptable
11/02/2020	3,49	4,70	2,26	0,05	4,77	2,58	1,73	0,19	6	Acceptable
02/08/2020	3,06	4,21	3,04	0,08	5,10	2,89	1,46	0,34	3	Bonne
10/11/2020	2,60	5,32	3,54	0,07	5,58	2,83	1,53	0,37	6	Acceptable

Annexe n°2: Quantités en réaction des éléments chimiques

Date de prélèvement	Ca <sup>++</sup>	Mg <sup>++</sup>	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	B. I.	Analyse
12/01/2021	3,03	2,73	3,91	0,10	4,20	3,30	2,51	0,14	2	Bonne
04/02/2021	4,58	3,55	2,57	0,06	4,84	2,51	2,01	0,21	6	Acceptable

Annexe n°3 : Formules caractéristiques de chaque échantillon

N°	Date de prélèvement	Facies chimiques
1	03/05/2019	rHCO <sub>3</sub> > rCl > rSO <sub>4</sub> > rNO <sub>3</sub> rMg > rCa > rNa > rK
2	24/06/2019	rHCO <sub>3</sub> > rCl > rSO <sub>4</sub> > rNO <sub>3</sub> rMg > rCa > rNa > rK
3	11/02/2020	rHCO <sub>3</sub> > rCl > rSO <sub>4</sub> > rNO <sub>3</sub> rMg > rCa > rNa > rK
4	02/08/2020	rHCO <sub>3</sub> > rCl > rSO <sub>4</sub> > rNO <sub>3</sub> rMg > rCa > rNa > rK
5	10/11/2020	rHCO <sub>3</sub> > rCl > rSO <sub>4</sub> > rNO <sub>3</sub> rMg > rNa > rCa > rK
6	12/01/2021	rHCO <sub>3</sub> > rCl > rSO <sub>4</sub> > rNO <sub>3</sub> rNa > rCa > rMg > rK
7	04/02/2021	rHCO <sub>3</sub> > rCl > rSO <sub>4</sub> > rNO <sub>3</sub> rCar > rMg > rNa > rK

Annexe n°4: Rapports caractéristiques entre les éléments chimiques

N°	Date de prélèvement	Ca <sup>+2</sup> /Mg <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup> /K <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup> /Na <sup>+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>-2</sup> /Cl <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup> /Ca <sup>+2</sup>	Na <sup>+</sup> /Mg <sup>+2</sup>	Mg <sup>+2</sup> /Ca <sup>+2</sup>
1	03/05/2019	0,64	48,77	1,28	0,40	0,87	0,55	1,57
2	24/06/2019	0,75	42,57	1,06	0,44	0,86	0,64	1,34
3	11/02/2020	0,74	43,20	1,14	0,67	0,65	0,48	1,35
4	02/08/2020	0,73	39,09	0,95	0,50	0,99	0,72	1,38
5	10/11/2020	0,49	47,36	0,80	0,54	1,36	0,66	2,05
6	12/01/2021	1,11	41,15	0,84	0,76	1,29	1,44	0,90
7	04/02/2021	1,29	43,64	0,98	0,80	0,56	0,72	0,78
Max.		1,29	48,77	1,28	0,80	1,36	1,44	2,05
Moy.		0,82	43,68	1,01	0,59	0,94	0,75	1,34
Min.		0,49	39,09	0,80	0,40	0,56	0,48	0,78

Annexe n°5 : Indices de saturation

N°	Date de prélèvement	IsCalcite	IsAragonite	IsDolomite	pCO <sub>2</sub>	IsHalite	IsAnhydrite	IsGypse
1	03/05/2019	0.59	0.45	1.51	10 <sup>-2,47</sup>	-6.89	-2.31	-2.09
2	24/06/2019	0.90	0.76	2.07	10 <sup>-2,78</sup>	-6.81	-2.21	-1.99
3	11/02/2020	0.91	0.77	2.09	10 <sup>-2,68</sup>	-6.92	-2.03	-1.81
4	02/08/2020	0.69	0.55	1.65	10 <sup>-2,44</sup>	-6.74	-2.14	-1.92
5	10/11/2020	0.86	0.71	2.16	10 <sup>-2,62</sup>	-6.69	-2.22	-2.00
6	12/01/2021	0.08	-0.07	0.21	10 <sup>-2,05</sup>	-6.56	-1.90	-1.67
7	04/02/2021	0.12	-0.02	0.24	10 <sup>-1,77</sup>	-6.87	-1.84	-1.62





## Annexe n° 8 : Bilan hydrique de l'année 2020-2021

	Avril	Mai	Juin	Juillet	Août	Septembre	Octobre	Novembre	Décembre	Janvier	Février	Mars
T(C°)	12,58	13,90	17,13	21,50	21,07	16,29	11,68	12,12	6,21	5,31	5,21	12,05
i	4,04	4,70	6,45	9,10	8,83	5,98	3,61	3,82	1,39	1,10	1,06	3,79
I	53,86											
a	1,34											
ETP	49,66	56,78	75,06	101,68	98,97	70,15	44,97	47,28	19,33	15,70	15,30	46,91
k	1,03	0,97	0,86	0,85	0,87	0,85	1,03	1,09	1,21	1,21	1,23	1,16
ETPC	51,15	55,07	64,55	86,43	86,10	59,63	46,32	51,53	23,39	18,99	18,82	54,42
P (mm)	47,40	21,00	0,00	0,00	0,00	2,50	2,00	6,50	45,10	24,00	1,00	19,00
Bilan hydrique	-3,75	-34,07	-64,55	-86,43	-86,10	-57,13	-44,32	-45,03	21,71	5,01	-17,82	-35,42
ETPR	47,40	21,00	0,00	0,00	0,00	2,50	2,00	6,50	23,39	18,99	1,00	19,00

## Annexe n° 9 : Débits mesurés (2020-2021)

N°	Date	Débit (l/s)	Débit (m3/s)
1	27/03/2020	11,90	0,0119
2	04/04/2020	12,08	0,0121
3	12/04/2020	11,92	0,0119
4	19/04/2020	11,60	0,0116
5	26/04/2020	10,53	0,0105
6	03/05/2020	9,88	0,0099
7	10/05/2020	9,96	0,0100
8	17/05/2020	9,84	0,0098
9	24/05/2020	9,60	0,0096
10	31/05/2020	8,80	0,0088
11	07/06/2020	9,06	0,0091
12	14/06/2020	9,02	0,0090
13	21/06/2020	8,96	0,0090
14	28/06/2020	8,73	0,0087
15	05/07/2020	8,45	0,0085
16	12/07/2020	7,97	0,0080
17	19/07/2020	7,90	0,0079
18	26/07/2020	7,11	0,0071
19	02/08/2020	6,71	0,0067
20	09/08/2020	6,42	0,0064
21	16/08/2020	6,44	0,0064
22	23/08/2020	6,63	0,0066
23	30/08/2020	6,99	0,0070
24	06/09/2020	7,32	0,0073
25	13/09/2020	7,85	0,0079
26	24/09/2020	8,58	0,0086
27	02/10/2020	8,45	0,0085
28	09/10/2020	7,96	0,0080
29	22/10/2020	8,49	0,0085
30	30/10/2020	8,76	0,0088
31	07/11/2020	8,34	0,0083
32	13/11/2020	8,41	0,0084
33	21/11/2020	8,84	0,0088

34	28/11/2020	9,02	0,0090
35	05/12/2020	9,34	0,0093
36	11/12/2020	9,49	0,0095
37	22/12/2020	9,80	0,0098
38	31/12/2020	9,92	0,0099
39	07/01/2021	10,01	0,0100
40	14/01/2021	9,92	0,0099
41	21/01/2021	10,22	0,0102
42	28/01/2021	9,74	0,0097
43	04/02/2021	9,34	0,0093
44	11/02/2021	9,29	0,0093
45	18/02/2021	9,41	0,0094
46	25/02/2021	9,27	0,0093
47	04/03/2021	9,32	0,0093
48	14/03/2021	9,23	0,0092
49	27/03/2021	8,70	0,0087

Annexe n° 10 : Débits classés

Classes	Nombre	Fréquences	% F	% Cumulée
< 5,5	317	0,868	86,85	86,85
5,5-6	0	0,000	0,00	86,85
6-6,5	2	0,005	0,55	87,40
6,5-7	3	0,008	0,82	88,22
7-7,5	2	0,005	0,55	88,77
7,5-8	4	0,011	1,10	89,86
8-8,5	5	0,014	1,37	91,23
8,5-9	7	0,019	1,92	93,15
9-9,5	11	0,030	3,01	96,16
9,5-10	8	0,022	2,19	98,36
10-10,5	2	0,005	0,55	98,90
10,5-11	1	0,003	0,27	99,18
11-11,5	0	0,000	0,00	99,18
11,5-12	2	0,005	0,55	99,73
12-12,5	1	0,003	0,27	100,00

FIGURES HORS TEXTE



Fig. n° 1 : Les grès roux



Fig. n° 2 : Calcaires à algues



Fig. n° 3 : Drain Karstique ancien



Fig. n° 4 : Alternance grès-marnes



Fig. n° 5 : Clacaires fissurés



Fig. n° 6 : Grès à Clypéastres

## Résumé

La source d'Anatra, objet de notre présente étude, se situe à 1Km environ du village dont elle tire son nom, Ce village fait partie de la commune de Chorfa, Sig, wilaya de Mascara. Elle émerge à travers les grès dans une dépression topographique sur la rive droite d'Oued Zeneta. C'est une source avec un débit moyen de 9 l/s. L'étude géologique, hydrogéologique et hydrodynamique a mis en évidence une exsurgence. L'eau est relativement dure. Sa minéralisation reste moyenne voire faible, avec un faciès bicarbonaté calcique et magnésien. .

**Mots clef :** Source Anatra ; dépression topographique ; grès roux ; calcaires aux algues ; Débit.

## Abstract

The spring of Anatra, subject of our present study, is located about 1 km from the village, which it takes its name, this village is part of the municipal of Chorfa, Sig, wilaya of Mascara, it springs from the sandstones, in a topographic depression on the right bank of oued Zeneta, it is a spring with an average flow of 9 l/s. The geological, hydrogeological and hydrodynamic studies revealed an exsurgence. The water is relatively hard. Its mineralization medium to low, with the calcium and magnesian bicarbonate facies.

**Keywords :** Spring of Anatra ; Topographic depression ; Sandstones ; Limestones with algae ; flow.

## الملخص

منبع العناترة، موضوع الدراسة، يبعد حوالي كيلومتر عن قرية العناترة، التي اشتق منها اسمه، تنتمي إلى بلدية الشرفة ولاية معسكر، مياه المنبع تخرج من خلال الحجر الرملي في المنخفض الطبوغرافي المتواجد على الضفة اليمنى لواد الزناتة، متوسط التدفق بلغ تقريبا 9 لتر\الثانية. أبرزت الدراسات الجيولوجية، الهيدروجيولوجية إضافة إلى الجانب الهيدروديناميكي أن المنبع عبارة عن منبع مرتبط بطبقة مائية كارستية، ذو صنف مياه بيكربوناتية - كلسي - مغنيزي. ذو ملوحة متوسطة إلى ضعيفة نسبيا.

**كلمات المفتاحية :** منبع العناترة ; الحجر الرملي ; منخفض طبوغرافي ; الحجر الكلسي ; التدفق ; التدفق.

