

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

Université des frères Mentouri Constantine 1

Faculté des Sciences de la terre, de la géographie et de l'aménagement

Département des sciences géologiques

Mémoire Présenté pour l'obtention d'un diplôme de Magister

Option : Hydrogéologie

Thème de recherche :

***RELATION BARRAGE- NAPPES.
ETUDE DE CAS: BARRAGE BENI-HAROUN,
WILAYA DE MILA***

Présenté par :

Benchabane Nour el Imane

Devant le jury :

<i>-M^e Benaïssa Abdelkader</i>	<i>Président</i>	<i>Université de Constantine 1</i>
<i>- M^e Chabour Nabil</i>	<i>Rapporteur</i>	<i>Université de Constantine 1</i>
<i>-M^{me} Dib Hénia</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université de Constantine 1</i>
<i>- M^e Demdoug Abdesslame</i>	<i>Examineur</i>	<i>Université de Setif</i>

Juillet 2015

Remerciements

الحمد لله رب العالمين

Je tiens en premier à remercier ma mère et mon père pour l'éducation qu'ils m'ont prodiguée, avec tous les moyens et au prix de toutes les sacrifices qu'ils ont consentis à mon égard, pour le sens du devoir qu'ils m'ont enseigné depuis mon enfance.

Je tiens à remercier mon mari Abd Erraouf qui m'a guidé mes pas tout au long de cette recherche, ses encouragements

Je tiens à remercier ma deuxième famille Ami Mourad et khalti Malika.

Je tiens mes remerciements à mes frères : Nabil, Nessrine et Nour El Houda.

J'adresse un grand merci à mes enseignants :

M^{lle} Djebbar.M, M^{me} Dib.H, M. Ghebouli. S, M. Bennacef. N,

M. Boularak. M, M. Kassir. A, et M. Benabbas. Ch .

Je remercie également l'équipe de l'agence nationale des barrages et de transfert (A.N.B.T) de la wilaya de Mila et plus particulièrement

M. Meghzili Mounir.

Je remercie également les ingénieurs de bet HMMEX :

Berkane Sana et Tachi Mokhtar.

Mes sincères remerciements vont également à tous mes amis et collègues :

Assia, Madiha, Lamia, Imene.

Merci enfin à tous ceux qui ont lu et liront cette thèse.



Table des matières

Introduction général

CHAPITRE I : Géographie

I. Situation géographique	11
II. Climat et végétations	12
III. Réseau hydrographique	12
IV. Orographie	13
V. Relief	13
IV. Caractéristiques hydrotechniques du barrage de Beni Haroun	14
V. Objectif de l'aménagement	15

CHAPITRE II : Géologie

I. Introduction	17
II. Géologie régionale de la zone de Barrage Beni Haroun	17
II.1 Zones internes	18
II.1.1 Flyschs	18
II.2 Zones externes	18
II.3 Série Numidienne	19
II.4 Formations néogènes	19
III. Les Différentes Phases Tectoniques	20
IV. Synthèse litho stratigraphique	22
IV.1 Trias	22
IV.2 Lias	22
IV.3 Crétacé inférieur	22
IV.4 Crétacé moyen à supérieur	23
IV.5 Paléocène	23
IV.6 Eocène	23
IV.7 Oligocène-Miocène inférieur	23
IV.8 Miocène moyen à supérieur	23
V. Géologie de la région de béni Haroun	25
V.1 Lithologie	27

CHAPITRE III : Hydroclimatologie

I. Etude du bassin versant	31
I.1 Contexte hydrographique du bassin	31
I.1.1 Caractéristiques morpho métriques du bassin versant	32
I.1.1.1 Périmètre	32
I.1.1.2 Surface du bassin versant	32
I.1.1.3 Indice de compacité ou de Gravelus	32
I.1.1.4 Relief	32
I.1.1.5 Réseau hydrographique	36
I.1.1.5.1 Oued Rhumel	38
I.2 Climat du bassin	39
I.2.1 Introduction	39
I.2.2 Les facteurs climatiques	39
I.2.2.1 Précipitations	39
I.2.2.2 Température	41
I.2.2.2.1 diagramme Ombro-thermique	43
I.2.2.3 Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte)	44
I.2.2.4 Détermination de l'aridité (indice de "De Martonne")	44
I.2.2.5 Climagramme d'Emberger	45
I.2.2.6 Evaporation	46
I.3 Bilan hydrologique	47
I.3.1 Estimation de l'évapotranspiration	47
I.3.1.1 Evaluation de l'évapotranspiration potentielle	48
I.3.1.2 Evaluation de l'évapotranspiration réelle	48
I.4 Ruissellement	50
I.4.1 Estimation de ruissellement superficielle R	51
I.5 Infiltration	51
Conclusion	52
CHAPITRE IV : Hydrogéologie	
Introduction	54

I. Présentation des aquifères existants	55
II. L'aquifère Karstique	55
II.1 Généralité sur le Karst	55
II.1.1 Définition	55
II.1.2 Structure et fonctionnement des aquifères karstiques	56
II.1.3 Circulation souterraines et développement du réseau karstique	57
II.1.4 Type de recharge	58
II.2 Caractérisation de l'aquifère karstique avant la construction du barrage	60
II.2.1 Structure et géométrie du réservoir	60
II.2.2. Relation fracture- alimentation et recharge d'aquifère	61
II.2.3. Piézométrie de l'aquifère	62
II.2.4. Gradient hydraulique	63
II.3 Caractérisation de l'aquifère karstique après la construction du barrage	63
II.3.1 Circulation d'eau dans l'aquifère	63
II.3.2 Mesures de perméabilité en forage	65
III. Relation barrage- nappe	66
III.1Piézométrie de la nappe	66
III.2 Gradient hydraulique	69
III.3 Infiltrations à travers la fondation du barrage	70
III.3.1 Le sonar latéral	70
III.3.2 La polarisation spontanée	71
III.4 Les températures dans le lac de retenue	72
III.5 Les températures des effluents des drains du barrage	73
III.6 Les exutoires	74
IV. La nappe alluviale d'oued Ennedja	76
IV.1 Définition	76
IV.2 Caractéristiques hydrodynamique de la nappe	76
IV.3 Piézométrie de la nappe avant la construction du barrage	76
IV.4 Piézométrie de la nappe après la construction du barrage	77
IV.5 Coupe hydrogéologique	78

Conclusion	79
CHAPITRE V : Hydrochimique	
I. Introduction	81
II. Différentes sources des ions de l'eau souterraine	81
II.1 Les ions majeurs	81
III. Analyses chimiques	82
III.1 Paramètres physico-chimiques	82
III.1.1 Paramètres physiques	82
III.1.1.1 Température	82
III.1.1.2 Potentiel hydrogène pH	84
III.1.1.3 Conductivité électrique	84
III.1.2 Paramètres chimiques	85
III.1.2.1 Minéralisations	85
III.1.2.2 Alcalinité ou basicité	85
III.1.2.3 Dureté totale (DHT)	85
III.1.2.4 Les ions chimiques	86
III.1.2.4.1 Les cations	86
III.1.2.4.2 Les anions	87
IV. Classification géochimique des eaux	90
IV.1 Diagramme de piper	90
IV.2 Diagramme de Schöeller-Berkaloff	93
IV.3 Diagramme de Stabler	94
V. Rapports caractéristiques	95
V.1 Le rapport $r_{Mg^{2+}}/r_{Ca^{2+}}$	95
V.2 Le rapport $r_{SO_4^{2-}}/r_{Cl^-}$	95
V.3 Le rapport $(r_{Na^{++}K^+})/r_{Cl^-}$	96
VI. Évolution chimique de l'eau souterraine	96
VII. Chimisme de la source de Hammam Beni Haroun avant et après le barrage	96
VIII. Chimisme de l'eau de la plaine d'oued Endja avant et après le barrage	99
Conclusion	100

Conclusion général	101
Résumé	103
Bibliographie	106

Liste des figures

Figure I.1 : Situation géographique de terrain d'étude	11
Figure I.2 : carte simplifié des zones bioclimatiques de l'Est algérien	12
Figure I.3 : Réseau hydrographique de la zone d'étude	13
Figure I.4: Carte toponymique du secteur étudié	14
Figure II.1 : Situation de la zone d'étude dans le cadre maghrebin	17
Figure II.2 : Extrait du carte structurale au 1/500 000 de la chaine alpine d'Algérie	19
Figure II.3: Dépôts des terrains épi-telliens (à partir du Crétacé supérieur)	21
Figure II.4: Déformations des terrains épi-telliens	21
Figure II.5 : Continuation de la phase de déformation post-éocène	21
Figure II.6 : Situation actuelle le long de l'Oued El Kébir	21
Figure II.7 : Colonne stratigraphique des dépôts néogènes du bassin de Mila	24
Figure II.8 : Géologie locale du barrage de Beni Haroun	25
Figure II.9 : Coupe géologique	25
Figure II.10 : log litho stratigraphique du site du barrage de Beni Haroun	29
Figure III.1 : Bassin versant kébir rhumel	31
Figure III.2 : carte hypsométrique du bassin versant	33
Figure III.3 : courbe hypsométrique de la zone d'étude	34
Figure III.4 : bassin versant et réseau hydrographique de terrain d'étude d'étude	37
Figure III.5 : Profil en long de l'oued Kébir –Rhumel	38
Figure III.6 : valeurs moyennes mensuelles des pluviométries (2003-2012)	40
Figure III.7 : valeurs annuelle des pluviométries (2003-2012)	40
Figure III.8 : précipitation saisonnière	41
Figure III.9 : Température moyennes mensuelles (2003-2013)	42
Figure III.10 : Température mensuelles (2003-2012)	42
Figure III. 11: Diagramme Ombro-thermique	43
Figure III.12 : classification de climat d'emberger	46
Figure III.13 : Evaporation dans le barrage de Beni Haroun durant la période (2003-2013)	47
Figure IV.1 : Carte de situation présentant les aquifères existants	55
Figure IV.2 : Aquifère Karstique	56

Figure IV.3 : Types de systèmes karstiques, d'après leur impluvium	59
Figure IV.4: localisation des terrains présentant l'aquifère karstique	60
Figure IV.5 : Coupe hydrogéologique	62
Figure IV. 6 : Situation de certains forages réalisés	63
Figure IV.7 : Circulation des eaux souterraines dans la nappe calcaire	64
Figure IV.8 : Résultat d'essai de la perméabilité dans les calcaires	65
Figure IV.9 : Résultat d'essai de la perméabilité dans les marnes	66
Figure IV.10 : situation des Piézomètres installées dans le site du barrage	67
Figure IV.11: Piézométrie de la nappe rive droite et le niveau d'eau de la retenue	68
Figure IV. 12 : Piézométrie de la nappe rive gauche et le niveau d'eau de la retenue	69
Figure IV.13: Piézométrie de la nappe et le niveau d'eau de la retenue	70
Figure IV.14 : Température des drains en aval et de retenue 2004-2009	72
Figure IV.15 : Température des drains en aval et de retenue 2004-2009	73
Figure IV.16: Carte schématique des quelques sources existant dans la région du barrage avant la construction du l'ouvrage	74
Figure IV.17: Carte schématique des quelques sources existant dans la région du barrage après la construction du l'ouvrage	75
Figure IV.18 : carte piézométrique de la plaine d'oued Enndja Juin1997	77
Figure IV.19 : carte piézométrique de la plaine d'oued Enndja Mai 2013	77
Figure IV.20 : Carte de positionnement des forages et coupe hydrogéologique	78
Figure IV.21 : Coupe hydrogéologique de la nappe alluviale d'oued Enndja	78
Figure V.1 : Situation des points d'eau analysée	82
Figure.V.2 : Variations de la Température des eaux des sources	83
Figure V.3 : Diagramme de Piper en aval du barrage	90
Figure V.4 : Diagramme de Piper en amont du barrage	91
Figure V.5 : Diagramme de Piper en amont du barrage	91
Figure V.6 : Diagramme de Piper de la plaine d'oued Endja	92
Figure V.7 : Diagramme de Piper d'eau du barrage	92
Figure V.8 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff en aval du barrage	93
Figure V.9 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff en amont du barrage (côté Est)	93
Figure V.10 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff en amont du barrage (côté Sud)	93
Figure V.11 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff de la plaine d'oued Enndja	93

Figure V.12 : Rapport rMg/rCa	95
Figure V.13 : Rapport r SO₄ /rCl	95
Figure V.14 : Rapport r (Na+K)/rCl	96
Figure V.15 : Variation de la Conductivité (ms/cm)	97
Figure V.16 : Variation de la Température (°C)	97
Figure V.17 : Variation du pH	97
Figure V.18 : Variation du HCO⁻³ (mé /l)	98
Figure V.19 : Variation du Cl⁻ (mé /l)	98
Figure V.20 : Variation du SO⁻⁴ (mé /l)	98
Figure V.21 : Variation du Ca⁺⁺ (mé /l)	98
Figure V.22 : Variation du Na⁺ (mé /l)	98
Figure V.23 : Variation du Mg⁺⁺ (mé /l)	98

Liste des tableaux

Tableau III.1 : détermination de la courbe hypsométrique	34
Tableau III.2 : valeurs moyennes mensuelles des pluviométries (2003-2012)	39
Tableau III.3 : valeurs des précipitations saisonnières (2003-2012)	41
Tableau III.4 : Températures moyennes mensuelles (2003-2012)	42
Tableau III.5 : précipitation et température moyenne mensuelle (2003-2012)	43
Tableau III.6 : classification de "D'Euverte"	44
Tableau III.7 : Résultat de calcul d'après la classification de D'Euverte"	44
Tableau III.8: Classification de "De Martonne"	44
Tableau III.9 : calcul de l'ETP selon THORNTHWAITE	48
Tableau III.10 : Calcule de l'ETR par le résultat de Thornthwaite	50
Tableau VI.1 : récapitulatifs des résultats des essais de pompage réalisés de la plaine	76
Tableau V.1 : Tableau des analyses des sources et l'eau du Barrage 2013	89
Tableau V.2 : Tableau des analyses de l'eau de la plaine d'oued Enedja2013	90
Tableau V.3 : Classification de stabler pour les eaux de source	95
Tableau V.4 :Classification de stabler pour les eaux de la plaine.	95
Tableau V.5: Variation des moyennes des concentrations des éléments chimiques.	99

Introduction générale :

Pour la satisfaction des besoins, le gouvernement algérien a axé sur les ressources superficielles les captages, les retenues collinaires et les barrages. Ces réserves le plus souvent à ciel ouvert sont soumises à une évaporation intense et/ou à une pollution.

De ce fait pour parvenir à qualifier et quantifier les potentialités hydriques et concevoir une politique de la gestion de l'eau, des recherches sont axées sur les ressources souterraines .

La surface du sol ne constitue pas un écran séparant deux domaines de recherches et surtout, ce qui est plus grave du point de vue de la rentabilité, deux modes d'exploitation distincts des ressources, l'un excluant trop souvent l'autre. Elle apparaît, au contraire, comme un lieu d'échanges permanents.

Toutes les ressources artificielles construit et opérationnels ou projetés, auront un impact et une influence directe sur les réserves hydriques et les débits exploitables des nappes voisines.

Parmi ces ressources, on a choisi le barrage de Beni Haroun ; le grand projet hydraulique en Algérie, pour essayer de présenter une vision sur la relation entre ce barrage et les nappes voisines (nappe des calcaires et la nappe alluvial).

A partir d'une recherche bibliographique et des données principalement des études faites par l'agence nationale des barrages et de transfert (ANBT), on a mis le barrage dans son contexte géographique, le relief remarquable puis le réseau hydrographique qui présente un élément essentiel.

Au plan morpho-géologique, le barrage est localisé dans une zone complexe qui engendre des contraintes d'implantation des ouvrages hydrauliques.

Pour le climat et le bassin versant, on a fait l'étude hydro climatologie pour déterminer les composantes du bilan hydrique, afin d'en déduire les valeurs de ruissellement y compris l'infiltration.

L'étude hydrogéologique est l'étape suivante, menée par une caractérisation des aquifères avant la construction du barrage, puis l'impact ou l'influence du barrage sur ces aquifères à partir d'un suivi de l'évolution piézométrique, ainsi que l'infiltration de l'eau du barrage dans l'aquifère karstique.

Enfin le dernier chapitre présente l'étude hydrochimique des eaux après un échantillonnage fait pour les sources autour du cuvette et les puits existant au niveau d'oued Enedja.

CHAPITRE I

Géographie

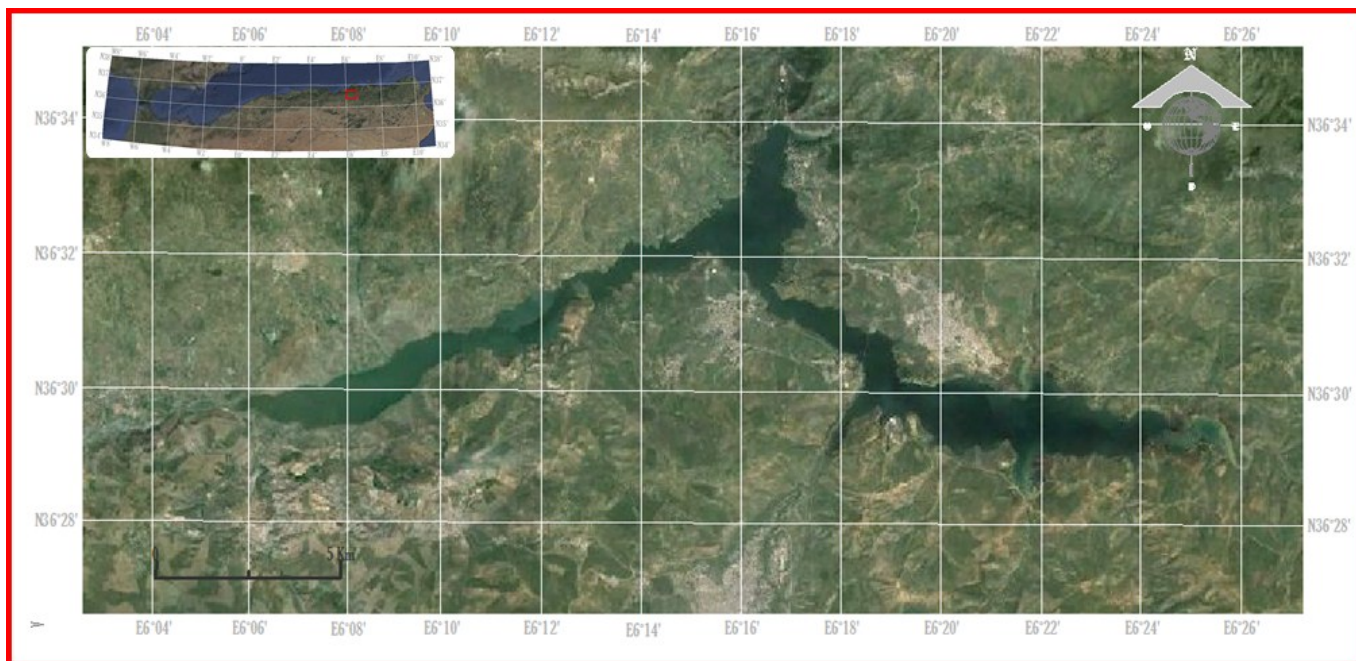
I. Situation géographique :

Le terrain d'étude fait partie du bassin versant Rhumel-Kébir qui appartient à la zone septentrionale du bassin néogène post-nappes Contantine-Mila.

Le barrage de Beni Haroun, situé à une quarantaine de km au Nord de Constantine (Fig.I.1), contrôle les eaux du bassin de l'oued Kébir-Rhumel. Il est le plus grand barrage du pays, érigé dans la région bien arrosée du Tell oriental, au Sud de laquelle se situent de grands centres urbains (Constantine, Batna, Khenchela...) et de vastes terres irrigables (Hautes Plaines semi-arides).

Le lac du barrage se développe en deux branches, l'une alimentée par l'oued Endja vers l'ouest sud-ouest, l'autre par l'oued Rhumel vers le sud-est. Ces deux oueds se rejoignent à environ 3,5 kilomètres en amont du barrage pour former l'oued El kébir qui progresse alors pendant environ 50 kilomètres vers le nord nord-ouest à travers le massif de la petite Kabylie avant de rejoindre la mer méditerranée à mi-chemin entre les villes de Jijel et Collo.

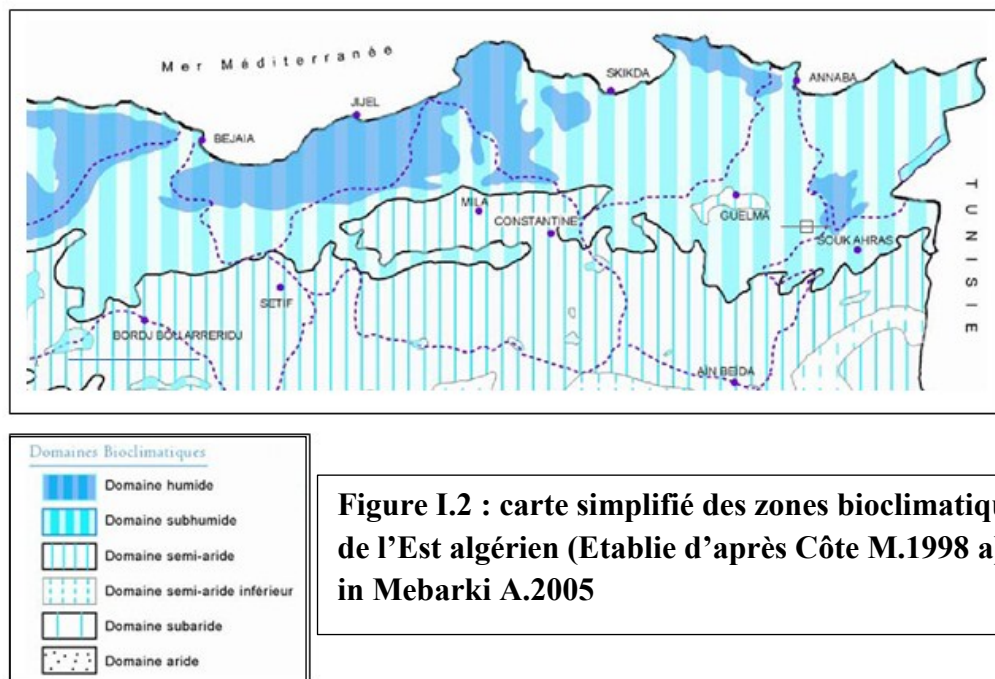
Un affluent est, l'oued Dib, rejoint l'oued kébir juste à l'amont du barrage. La mise en eau du barrage a commencé en août 2003.



**Figure I.1 : Situation géographique de terrain d'étude
(Extrait d'image satellite de Google earth Avril 2013)**

II. Climat et végétations :

Le secteur étudié se trouve à la jonction de deux domaines climatiques différents (Fig I.2) : un climat tempéré et humide au Nord, caractérisé par un été sec et chaud et un hiver doux et humide. L'étude climatologique de la région montre que le climat prédominant est de nature continentale avec des influences orographiques appréciables dans les secteurs sud et ouest. L'humidité de l'air est toujours plus élevée en hiver et plus faible en été. Les précipitations sont minimums en été et maximums en hiver.



Le couvert végétal de la région d'étude est très réduit. Il se résume à des surfaces recouvertes majoritairement d'herbes et quelques arbres d'eucalyptus, ce faible couvert végétal a considérablement favorisé le phénomène d'érosion de sol.

III. Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique de la région est représenté par un certain nombre de chaâbats qui collectent et drainent les eaux de surface vers Oued El Kébir située au pied du versant, ce dernier s'écoule du Sud vers le Nord en parallèle à l'axe de la RN 27 et reçoit de nombreux affluents représentés essentiellement par Oued Dib au Nord de la région d'étude, Oued Rhumel au Sud Est et Oued Endja au Sud-Ouest (Fig.I.3).

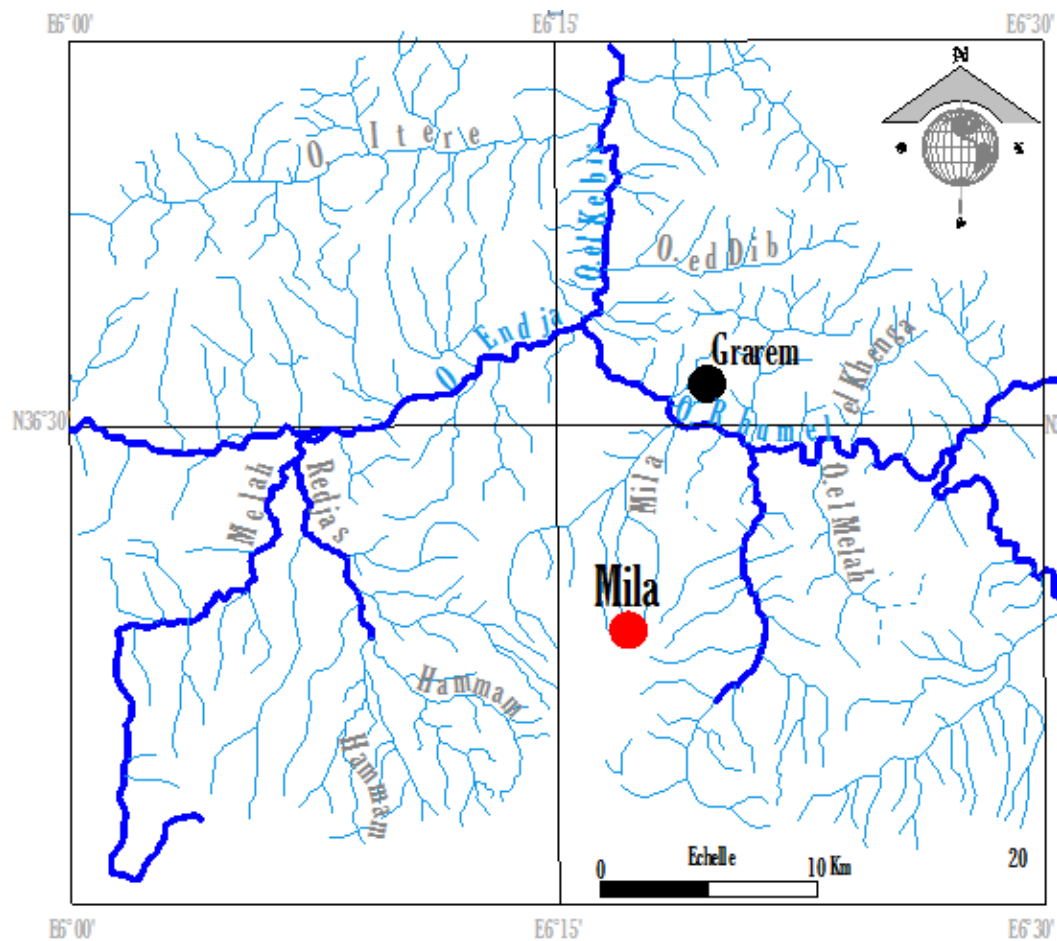


Figure I.3 : Réseau hydrographique de la zone d'étude

IV. Relief :

On remarque un aspect orographique important dans la région d'étude. En effet, on remarque un relief très accidenté montrant des contrastes topographiques remarquables, avec des massifs culminants à des hauteurs très élevés et des vallées profondes. Par ailleurs, elle montre des pentes variant entre 35 à 60 %. Cette zone est limitée au Nord par un ensemble de reliefs formant une imposante barrière rocheuse (la chaîne Numidique) qui partage la petite Kabylie d'El Milia au Nord et le Nord Constantinois au Sud.

Cette chaîne, d'orientation sensiblement WSW-ENE, est composée essentiellement de massifs calcaires jurassique (M'sid Aicha : 1462m ; Sidi Driss : 1364m), recouvert par endroits par le Charriage du socle Kabyle (portion du Djebel Sidi Driss) et de massifs gréseux oligocènes (chainons des Zouarha : 1292m ; Les massifs gréseux (ou gréseux argileux) sont plaqué sur un complexe marneux senonien-éocène assez tectonisé. (Fig.I.4)

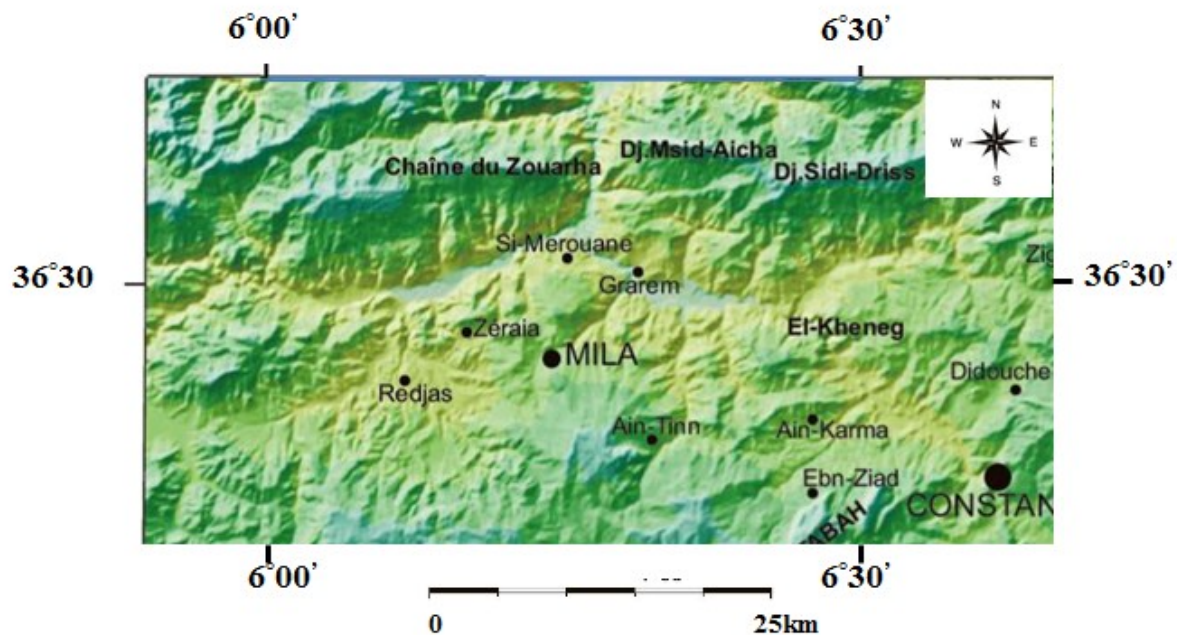


Figure I.4: Carte toponymique du secteur étudié
(Bouedja.F, 2010)

V. Caractéristiques hydrotechniques du barrage de Beni Haroun :

La digue, construite en béton compacté roulé (BCR), a un volume de 17 00 000 m³ environ. Elle se dresse sur une hauteur totale de 107 m au-dessus du lit de l'oued Kébir et possède une hauteur maximale au-dessus des fondations de 118 m.

L'ouvrage de type poids rectiligne a une longueur en crête de 710 m. La section non déversante a une crête d'une largeur de 8 m, arasée à la cote 216,30 m.

L'évacuateur de crue, de type « à seuil libre » est obtenu en aménageant en déversoir la partie centrale du barrage d'une longueur de 124 m, il est prolongé par un coursier raccordé à un saut de ski.

Le débit maximum pouvant transité par ce déversoir atteint 13 700 m³/s, ce qui correspond au laminage de la crue maximum probable de 16 640 m³/s, d'une période de retour de 10 000 ans. La surélévation de crue, c'est à dire la charge maximale exercée sur le déversoir en correspondance avec la crue de projet, atteint 14,8 m et la revanche est de 1,5 m au-dessus du niveau des plus hautes eaux (P.H.E. : 214, 8 m).

La vidange de fond (ou plutôt de demi-fond) est implantée sur la rive droite de la digue, au niveau 140 m. Elle est constituée de deux ouvertures, contrôlée par des vannes, pouvant évacuer, sous le niveau de retenue normale, un débit total de 700 m³/s (350 m³/s x 2). La vidange permet de contrôler la montée du plan d'eau lors du remplissage du réservoir, de faire descendre dans un délai de 2 à 4 semaines le plan d'eau jusqu'aux environs de la cote 140 m

et enfin, de lutter contre l'envasement de la retenue à proximité de la digue, en effectuant des chasses de vase.

Le système de galeries (trois galeries réparties sur 3 niveaux : 100, 140 et 175,1 m), aménagé à proximité du parement amont du barrage, permet de collecter les eaux de drainage provenant du corps du barrage, de la fondation et des versants. Il permet le contrôle du comportement de l'ouvrage et également d'entreprendre des opérations de maintenance et d'éventuels travaux de réparation.

A la côte normale de 200 m, le lac de retenue épouse l'oued Kébir et les deux vallées du Rhumel et de Endja, sur une surface de 39,29 km², soit près de 4 000 ha. La retenue permet d'emmagasiner 963 hm³ d'eau. D'un volume utile de 732 hm³, entre les cotes 172 et 200 m, elle permet de régulariser un apport annuel de 435 hm³.

Le rapport entre la capacité de la retenue et sa surface donne une lame d'eau moyenne de 24 m. Le bilan pluie-évaporation sur le réservoir permet de déterminer un déstockage net par évaporation équivalent à une tranche annuelle moyenne de 350 mm.

Les pertes en terres agricoles du fait de la submersion, jusqu'à la cote de retenue normale, avoisinent les 3 632 ha. A celles-ci, s'ajoutent les terres susceptibles d'être inondées lors des crues exceptionnelles (cotes 205 à 217 m) représentant une superficie totale de 819 ha. Par ailleurs, d'importants équipements et infrastructures (routes, lignes électriques, habitations ...) ont fait l'objet d'abandon ou de transfert car situées dans la zone d'emprise du barrage (Mebarki.2005)

VI. Objectif de l'aménagement :

L'objectif de l'aménagement du Barrage de Béni-Haroun est:

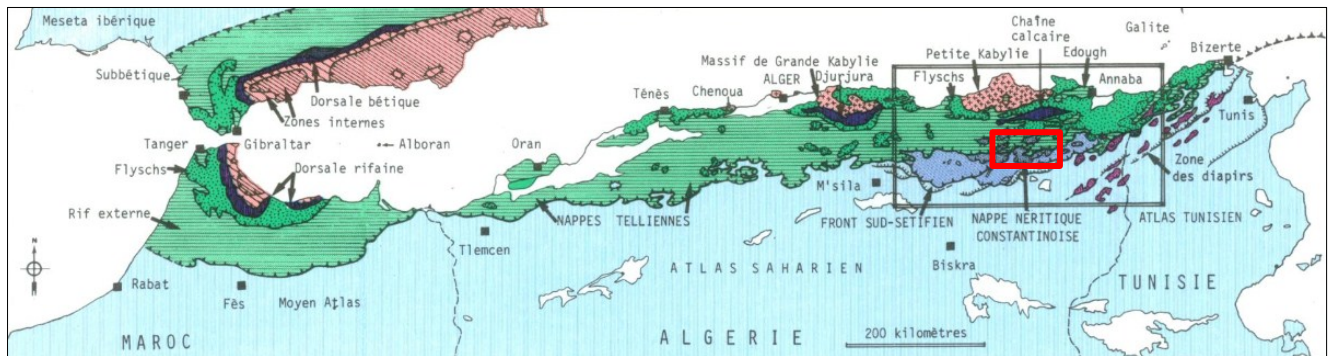
- L'alimentation en eau potable de cinq wilayates : Mila, Constantine, Batna, Khenchela et Oum el Bouaghi à raison de 204 millions de mètre cubes.
- L'irrigation d'environ 30.000 hectares dans les plaines de Teleghma, Chemoura et Tafouna à raison de 228 millions de mètres cube.
- Le laminage des crues de l'Oued Kébir pour la protection des infrastructures à l'aval.

CHAPITRE II

Géologie

I. Introduction :

Une région fait partie de la chaîne alpine d'Afrique du nord, dont le cadre et l'histoire géologique sont extrêmement complexe. Les études géologiques antérieures par Durand-Delga, Villa, et d'autres ont conduit au morcellement de la région en plusieurs groupes, chacun d'entre eux étant caractérisé par une histoire tectonique particulière de déformations, ces groupes incluent plusieurs nappes d'étendue régionale. (Fig.II.1)



**Figure II.1 : Situation de la zone d'étude dans le cadre maghrebin
d'après M.DURAND.DELGA. Modifié**

II. Géologie régionale de la zone de Barrage Beni Haroun :

Les nappes de charriage constituent de vastes ensembles de terrains d'âge antécambrien à Miocène inférieur qui se sont déplacés à l'horizontale sur des distances de plusieurs dizaines de Kilomètres et qui se sont superposés mécaniquement suivant des modalités variées et complexes. (Fig.II.2)

A partir du Miocène moyen, des formations post-nappes issues de l'érosion du socle se sont déposées sur cet ensemble. Elles sont plus ou moins plissées mais n'ont pas subi de déplacements importants. D'ultimes réajustements isostatiques ont provoqué l'effondrement des zones côtières et des surrections locales donnant à la région sa physionomie actuelle.

Cette activité tectonique relativement faible est confirmée par le petit nombre de foyers sismiques observés aux environs du site (Harza.1986).

Dans cette partie de l'Algérie du Nord, on peut identifier les zones suivantes de la chaîne Alpine, du Nord au Sud :

II.1. Zones internes :

La partie Nord de la région est occupée par le socle de la petite Kabylie constitué de terrains cristallophylliens anciens (gneiss, phyllades, calcaires métamorphiques). Ce socle forme une écaille épaisse de 2 à 3 Km entièrement charriée vers le sud sur des terrains sédimentaires plus ou moins métamorphisés d'âge Jurassique à Eocène présente sur une frange étroite qui constitue "la chaîne calcaire".

Au niveau de la bordure sud de ce socle de la petite Kabylie, reposent en discordance des terrains conglomératiques et grésos-micacés d'âge Oligocène supérieur et Miocène inférieur appelés Oligo-Miocène Kabyle (OMK).

II.1.1 Flyschs :

Sur les zones internes sont charriées des nappes d'écoulement de flyschs Crétacé et Eocène appartenant à plusieurs séries distinctes dont les deux suivantes sont présentes dans la zone du projet :

- le flysch Massylien
- le flysch de Ziane

Ces nappes se sont mises en place par écoulement sur le fond de la mer, d'ancien flyschs plus ou moins plastiques. Il en résulte une fragmentation importante de ces flyschs bréchifiés ou diacérés en lambeaux de dimensions variées : métriques à kilométriques. On appelle olisostrome l'ensemble des flyschs ainsi dissociés et mis en place.

II.2 Zones externes :

Les zones externes sont formées de nombreuses unités qui forment les nappes telliennes dont les rapports structuraux et stratigraphiques sont également fort complexes. On peut y identifier :

- a) Le mol néritique du Constantinois composé d'une séquence carbonatée d'âge Jurassique à Crétacé supérieur ;
- b) La zone épi-tellienne formée d'une séquence carbonatée et détritique allant du Crétacé à l'Eocène ;
- c) Les séries ultra-telliennes à faciès bathyaux allant du Crétacé à l'Eocène.

II.3 Série Numidienne

La série Numidienne de l'Oligocène, argileuse à la base et gréseuse au sommet, se trouve toujours située au-dessus des unités plus anciennes décrites ci-avant.

II.4 Formations néogènes :

Ces formations se sont déposées en discordance sur toutes les autres unités précédentes.

Dans le Nord, il s'agit de formations marines d'âge Burdigalien. Vers le Sud, dans la cuvette structurale de Constantine, on trouve des dépôts continentaux allant du Miocène moyen au Pliocène, voir plus récent.

D'un point de vue tectonique, il faut signaler qu'au cours du Miocène, des granites et des micro-granites traversent le socle Kabyle et tous les terrains sédimentaires décrits ci-dessus.

Postérieurement à la mise en place de ces micro-granites, la tectonique donne au Nord Constantinois sa physionomie actuelle.

Des grandes failles délimitent d'une part des bassins effondrés dans lesquels les formations sédimentaires ont été préservées de l'érosion et d'autre part, des zones surélevées où affleure le socle de la petite Kabylie ainsi que plus au Nord des formations sédimentaires sur lesquelles ce socle a été charrié.

Le long de plusieurs accidents tectoniques, des remontées de lambeaux du Trias, auxquels sont associés des amas de gypse et des grès sont observés au voisinage du site (vallées de l'oued El Dib et de l'oued Endja).

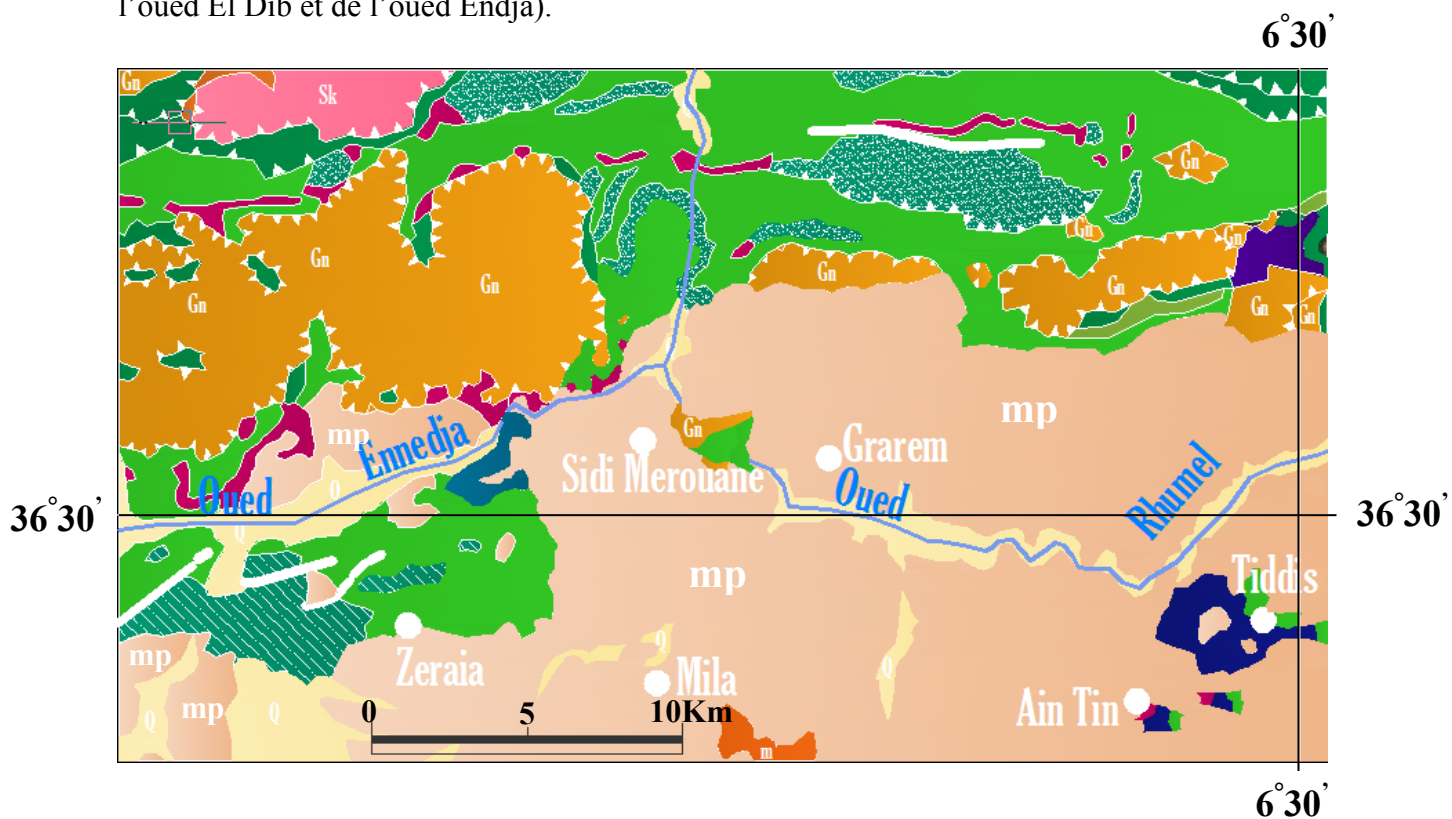


Figure II.2 : Extrait du carte structurale au 1/500 000 de la chaîne alpine d'Algérie orientale



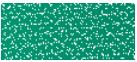
Roches récentes et cycles postérieurs au Burdigalien inférieur

Q	Quaternaire indifférencié (villafranchien à actuel)
mp	mio-pliocène continental
m'	Burdigalien supérieur- langhien de la marge littorale


Nappe Numidienne

Gn	Grès numidiens et séries mixtes
-----------	---------------------------------

Nappe telliennes s.s

	Yprésien à priabonien basal
	Crétacé inférieur
	Crétacé moyen à paléocène

Nappe de flysches Kabyles

	Flysches mauritanien et flysches massilien
---	--


Socle Kabyles, chaîne calcaire

Sk	Socle métamorphique de petite kabylie et du Bouhatem (phyllades micaschistes, porphyroïdes, gneis et marbres)
-----------	---


Trias exotique du extrusif

t	Argiles, gypse broyés et glaçons calcaro-dolomitiques, trias résédimenté
----------	--



Nappe ultra- tellienne

	Séries typique (néocomien à lutétien Supérieur) marneuses et marno- calcaire à crétacé claire
--	---

Nappe péni- tellienne et unité méridionales à nummulites

	Cénomaniens à sénonien
--	------------------------

Nappe néritique constantinoise

	Série entièrement carbonatées à sénonien transgressif réduit
	Cénomaniens, turonien et sénonien transgressif

III. Les Différentes Phases Tectoniques

L'évolution des Maghrébides au Mésozoïque et au Tertiaire s'intègre plus largement dans l'évolution géodynamique de la Méditerranée occidentale, caractérisée par l'affrontement des grandes plaques européenne et africaine, d'abord par coulissage sénestre, puis en régime de collision, à partir de dates diverses dans le crétacé en fonction des dispositifs locaux, la collision devenant générale au crétacé supérieur.

Les travaux réalisés du Harza 1986 jusqu' à présent s'accordent sur les événements suivants : (les esquisses ne sont pas à l'échelle) :

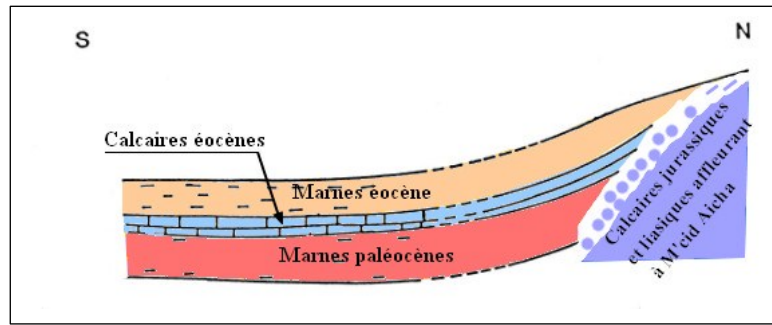


Figure II.3: Dépôts des terrains épi-telliens (à partir du Crétacé supérieur) (Harza.1986) (Modifié)

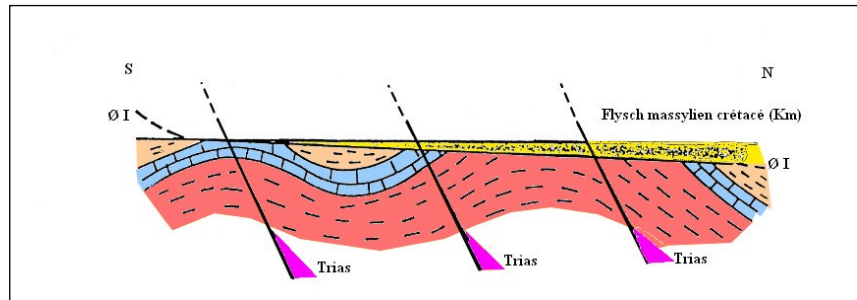


Figure II.4: Déformations des terrains épi-telliens (Harza.1986) (Modifié)

Mise en place des nappes ultra-telliennes et des flyschs au cours d'une phase fini-lutétienne, ainsi déformation et fracturation de l'ensemble à partir de cette phase, avec possibilité de remontée de trias gypseux à la faveur de ces accidents.

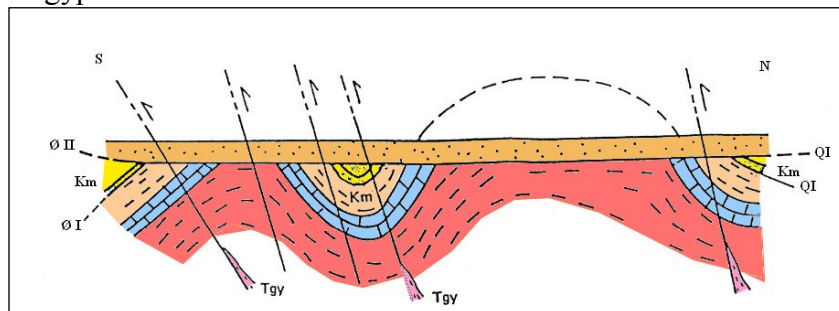


Figure II.5 : Continuation de la phase de déformation post-éocène (Harza.1986) (Modifié)

Mise en place de la nappe numidienne au miocène inférieur qui amplifie le processus précédent.

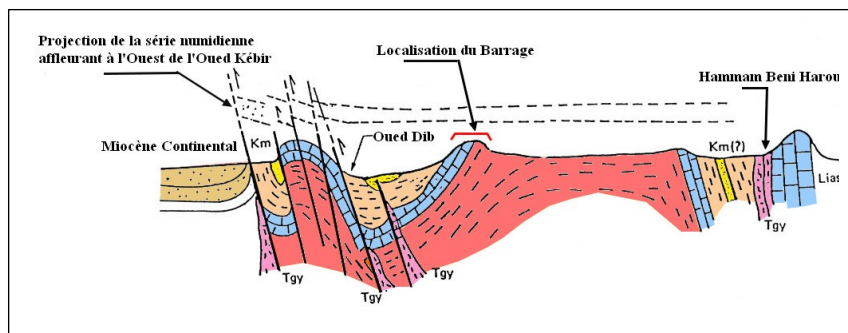


Figure II.6 : Situation actuelle le long de l'Oued El Kébir (Harza.1986) (Modifié)

IV. Synthèse litho stratigraphique :

La zone de la cuvette se situe en bordure Nord d'une province géomorphologique que l'on peut appeler dépression Miocène de Constantine (Fig.II.7)

Les terrains meubles sont constituées principalement de dépôts alluviaux sablo-graveleux dans le lit des oueds et sur plusieurs niveaux de terrasses, de colluvions provenant en grande partie de l'érosion des argiles miocène assez répandues et d'éboulements au pied des formations rocheuses

Les colluvions de par leur origine, sont riches en argile, mal drainées, gypseuses par endroit, quelque peu plastique et très peu résistantes ; elles montrent des phénomènes de fluage et de glissements en nombreux endroits.

Les éboulis, plus localisées, sont principalement constitués de fragments de grés numidiens dans une matrice de sable argileux.

Le substratum est principalement constitué de dépôts continentaux d'âge miocène moyen à supérieur et plus localement, de formations allant du trias à l'oligocène.

On retrouve dans la retenue :

IV.1 Trias :

Rive gauche de l'oued Endja : Composé de gypse avec des argiles bariolées et un peu de grés. On estime que ces affleurements suivent le chevauchement régional de sidi Merouane situé en amont du barrage et auraient pu être mis en place sous forme de diapirs ou injectés pendant des périodes d'activité tectonique principalement au Miocène.

Ces matériaux sont très déformés et sujets à une altération et une dissolution relativement rapide.

IV.2 Lias :

Petits affleurements de calcaire jurassique inférieur et de dolomie à l'ouest de sidi merouane

Sur la rive droite de l'oued Endja.

IV.3 Crétacé inférieur :

Fenêtres de marnes et calcaires marneux clairs sur la rive droite de l'oued Endja à l'ouest de sidi Merouane.

IV.4 Crétacé moyen à supérieur :

Comprenant des micro-brèches, des marnes, des argilites en lentilles tectoniques discontinues côté gauche de la vallée de l'oued Endja, sur les pentes occidentales de l'oued El kebir, sur sa rive droite et dans plusieurs zones de l'oued El Dib.

IV.5 Paléocène :

Marnes noires affleurant le long des deux rives de l'oued El Kebir et sur le versant nord de la vallée de l'oued Endja.

IV.6 Eocène :

-Calcaires de l'Eocène inférieur (yprésien) formant la barre calcaire utilisée comme appui au barrage. Ils affleurent de façon isolée à l'intérieur de la zone de la retenue, notamment en aval du confluent de l'oued El Dib, dans la fenêtre de la gorge du Rhumel et dans une petite zone sur la rive gauche de l'oued Enndja, à l'ouest de Sidi Merouane.

-Marnes de l'Eocène moyen affleurant dans la vallée de l'oued El Dib et pouvant se trouver plus en amont dans la fenêtre de la gorge du Rhumel près du pont de Mila-Grarem

IV.7 Oligocène-Miocène inférieur :

Série numidienne constituée principalement de grès quartzitiques à intercalations schisteuses, répandue le long des pentes Nord-ouest mais surtout au-dessus de la cote de retenue. Quelques affleurements dans la partie aval de la fenêtre de la gorge du Rhumel.

IV.8 Miocène moyen à supérieur :

Dépôts recouvrant en discordance les unités plus anciennes comprenant :

- Des lits de conglomérats, de poudingue et de grés
- Des couches épaisses d'argilites rouges et grises très répandues ;
- Des unités de marne gypseuse grise avec des zones de gypse stratifié caractérisé par des structures sédimentaires
- Du gypse saccharoïde en couches épaisses seulement par endroits et en quantités assez restreintes
- Des calcaires lacustres bien stratifiés

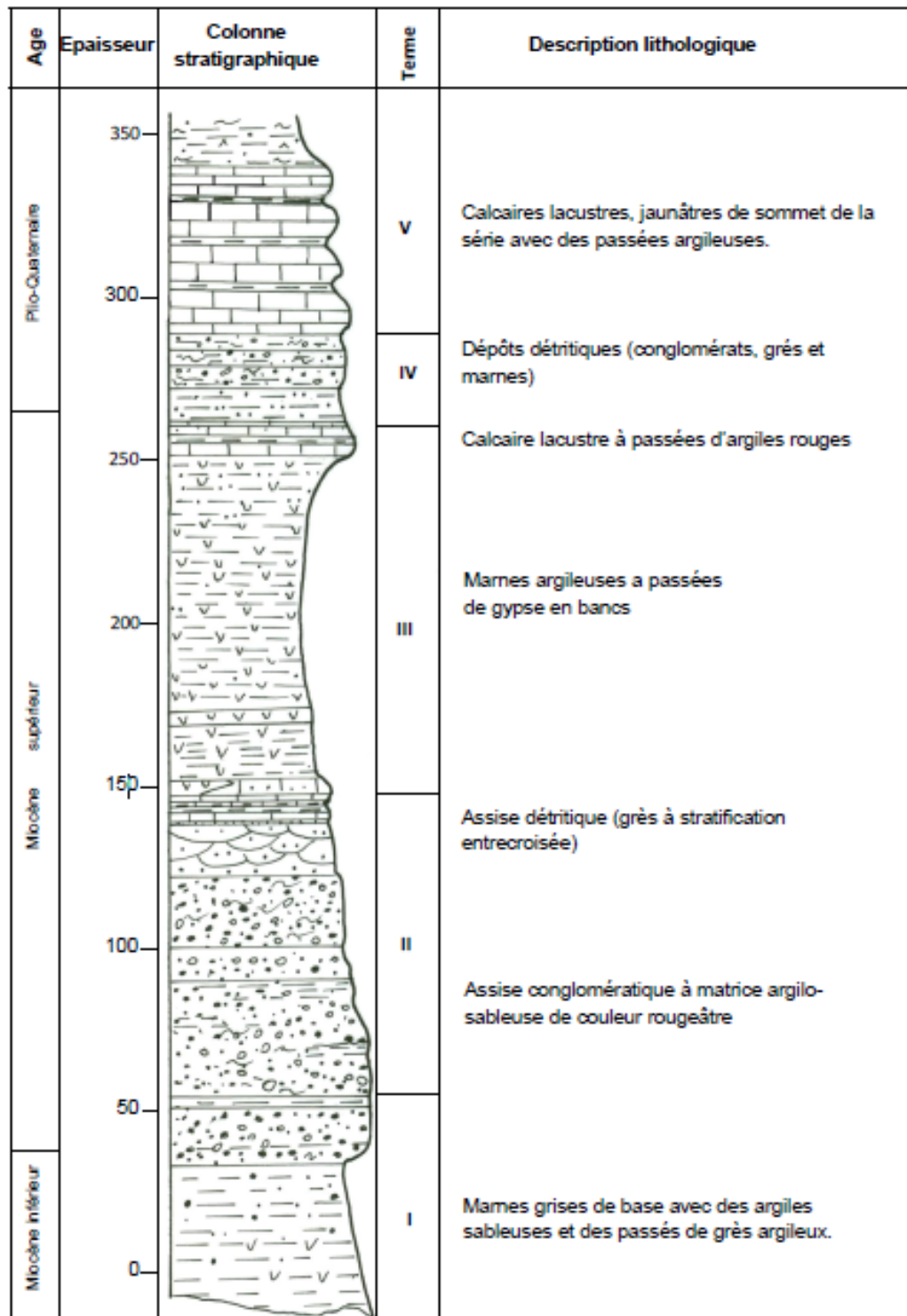


Figure II.7 : Colonne stratigraphique des dépôts néogènes du bassin de Mila (P.E.Coiffait, 1992)

V. Géologie de la région de béni Haroun :

La zone du barrage est constituée par un banc calcaire redressé d'âge éocène (yprésien) de direction E-W, quasi perpendiculaire au cours d'eau de l'oued El Kébir. (Fig II.8)

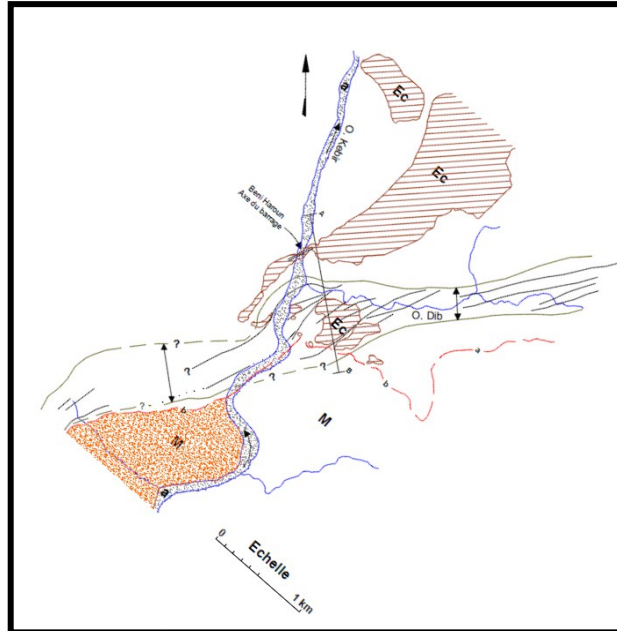


Figure II.8 : Géologie locale du barrage de Beni Haroun (d'après Harza, 1986)

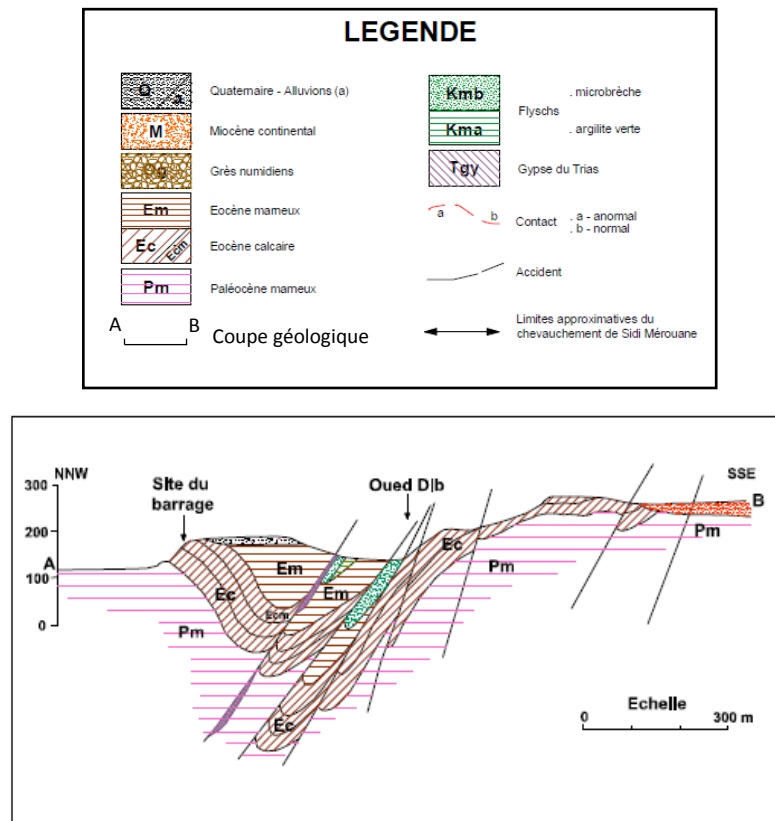


Figure II.9 : Coupe géologique

Cette barre calcaire est partiellement bréchifiée et repose immédiatement en aval du barrage sur des marnes noires du paléocène fracturées à leur toit et contenant du gypse.

Sur la rive droite, les pendages sont amont et se redressent progressivement de 32° à l'extrémité de l'appui jusqu'à 72° au droit de l'oued.

Sur la rive gauche, les couches se redressent progressivement jusqu'à être verticales et même se renverser avec un pendage aval 80° , ce redressement du banc calcaire a pour conséquence de diminuer sa surface d'affleurement et d'entraîner de très fortes pentes en rive gauche.

La direction de la stratification pivote de $N80^\circ$ à $90^\circ E$ sur la rive droite, à $N35^\circ E$ sur la rive gauche.

Au sud, le calcaire éocène est plissé en synclinal à cœur marneux et affecté par un accident EW à pendage vers le Nord présentant des écailles de trias gypseux.

En rive gauche cet accident s'incurve vers le sud en même temps que l'affleurement calcaire pour devenir parallèle au cours de l'oued El kébir (terminaison synclinal). Cette structure synclinale asymétrique pourrait s'expliquer par un dédoublement des séries calcaires au niveau de cet accident (volet sud du synclinal) qui aurait donc une composante chevauchante probablement associée à un décrochement senestre apparent.

En amont de cette zone, les séries de l'oligo-miocène inférieur présentent des faciès gréseux et schisteux, recouverts par des produits d'altération en place ou glissé (colluvions, Eboulis). Le miocène moyen et supérieur gypsifère et calcaire recouvre les unités antérieures en discordance.

Le pendage en aval se dirige vers le Nord, sauf au nord de la retenue où ils se redressent sous l'effet de la tectonique chevauchante de la faille de Sidi Merouane en formant une gouttière EW. Les structures EW sont recoupées par une fracturation méridienne accompagnée d'un maillage de diaclases et joints :

Direction $N100^\circ$ -pendage $50^\circ N$ et $N15^\circ - 80^\circ$ en rive droite

Direction $N350^\circ$ - pendage 12 à $60^\circ W$ et $N110^\circ - 60$ à 75° en rive gauche

Ce maillage est de 0.4m à 1m d'espacement moyen, la plupart des joints sont fermés ou remplis de calcite, mais certains autres peuvent être ouverts ou remplis de matériaux meubles,

V.1 Lithologie :

Les différents terrains observés dans la zone du barrage sont, du plus ancien au plus récent :

Marnes du paléocène :

Elles affleurent sur les versants et dans les excavations en aval du site, Ce sont des schistes de compaction, gris foncé à noirs avec des lentilles et des couches minces de calcaires aphanitique noir (épaisseur de 10à 45 cm)

De telles marnes s'altèrent aisément pour former des colluvions argilo-silteuses. Ces marnes sont plus ou moins calcaires et légèrement pyriteuses et contiennent aussi des traces de gypse et de la calcite en remplissage de joints.

Dans leur partie supérieure, on trouve sur 5 m une alternance de marnes et de bancs calcaires constituant la transition progressive avec les couches supérieures.

Calcaires de l'Eocène attribués à l'Yprésien :

La cartographie géologique détaillée du site a permis de différencier 3 subdivisions du banc de calcaires représentant l'appui du barrage de base en haut:

- Calcaires de base (Ecb)
- Calcaires à silex (Ecs)
- Calcaires marneux (Ecm)

Ce sont en général des couches minces à épaisses de calcaire à grain fin, gris foncé à noir, dur et résistant. Certains lits calcaires sont très durs car dolomitiques siliceux, alors que d'autres contiennent du silex noir. Ce silex prend la forme de petits nodules (de diamètres 1-3 cm) et de bandes minces (épaisses de 2 à 15 cm). On trouve également des couches intercalaires minces de schiste calcaire (jusqu'à 30 cm).

Les roches plus cassantes, comme par exemple les unités à silex, ont tendance à être plus fracturées que les unités plus marneuses.

Ces calcaires présentent de nombreux joints remplis de calcite. Certain joints, en général oxydés, sont fermés mais ils peuvent être également ouverts ou remplis de matériaux meubles. Dans quelques forages de petites cavités de dissolution (max 30 cm) ont été observées.

Les calcaires présentent localement en forage de zones de remaniement et de bréchification à mettre éventuellement en relation avec le passage de petites failles. Ce type de phénomène est visible également dans les marnes.

La formation calcaire est relativement résistante à l'altération et à l'érosion mais elle présente toutefois localement des indices de dissolution, principalement dans la partie supérieure de la rive gauche. Les calcaires en s'altérant deviennent typiquement gris pâle à beiges.

Marnes de l'Eocène (d'âge Lutétien) :

Les affleurements limités de cette formation se présentent sous forme de schistes gris foncé à noirs de compaction dont la lithologie semble presque identique à celle du faciès des marnes du paléocène. De petites caractéristiques comme la présence de septarias permettent de les différencier.

Dans la plupart des affleurements la marne est hautement déformée par la tectonique et a ensuite, été altérée.

Colluvions et E- Eboulis :

Sur l'appui droit, on détecte des dépôts de versant ou colluvions formés par des pierres anguleuses de calcaire, parfois légèrement cimentées ou comportant une matrice argileuse, leur épaisseur peut atteindre 20 m.

Sur la rive gauche, on détecte des dépôts colluviaux de pierre, de blocs calcaires et de marnes.

De manière générale, les marnes amont et aval de calcaires sont en de nombreux endroits recouvertes de ces produits d'altération en place ou glissés.

Terrasse alluviale :

Dans la partie basse de la rive droite, en amont immédiat de l'axe du barrage, on trouve une terrasse alluviale dont la base se situe vers les côtes 138-140. Elle est formée de graviers et gros blocs dans une matrice sableuse passant à des galets dans une matrice plus argileuse vers l'intérieur du versant. L'épaisseur peut atteindre 20 m et diminuer vers l'aval et vers la culée droite.

Alluvions récentes :

Ce sont principalement des graviers, gros blocs et sables alluviaux du lit de l'oued. Elles ont été excavées en partie et des remblais artificiels.

Remblais :

Les principaux remblais outre ceux des digues et des ouvrages du lit de l'oued sont ceux qui recouvrent l'ancien thalweg de l'oued El Dib et de la culée droite ; ils ont plus de 20 m d'épaisseur entre l'axe du barrage et la culée du viaduc.

Les différentes formations lithologiques du secteur étudié sont résumées sur le log litho stratigraphique (Fig.II.10)

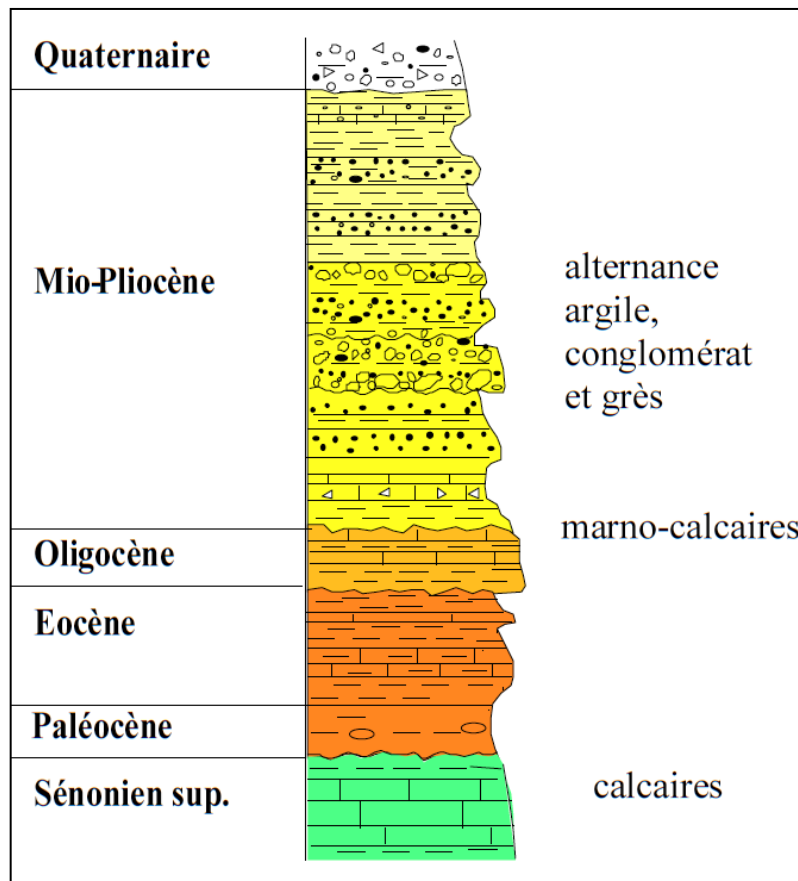


Figure II.10 : log litho stratigraphique du site du barrage de Beni Haroun

(D'après R. marmi¹, M. kacimi², M. boularak¹)

CHAPITRE III
Hydro climatologie

I. Etude du bassin versant :

I.1 Contexte hydrographique du bassin :

Le bassin à l'amont de Beni Haroun constitue une partie prédominante (87,6 %) du bassin du Kébir-Rhumel dont l'étendue jusqu'à son embouchure, la mer Méditerranée, est de 8815 km² (Fig.III.1). Il se départage, selon le contexte physiographique et climatique très différencié de la région, en trois grandes zones hydrographiques distinctes :

- une zone méridionale « les Hautes Plaines » correspondant au bassin de l'oued Rhumel supérieur et son principal affluent, l'oued Boumerzoug code : 10-05 (au total : 4 247 km²) ;
- une zone septentrionale Est ou « Piémont Sud-tellien oriental » assimilée par souci de simplification au bassin inférieur du Rhumel avec son affluent l'oued Smendou, jusqu'à sa confluence avec l'oued Endja code : 10-06 (sous-bassin du Rhumel-Smendou : 1 085 km²) ;
- une zone septentrionale Ouest « Piémont Sud-tellien occidental » épousant le bassin de l'oued Endja jusqu'à sa confluence avec l'oued Rhumel (sous-bassins de Dehamcha-Kébir amont (code : 10-01) et Kébir-Endja (code : 10-02) : 2 146 km²)

A l'aval de la confluence Rhumel-Endja, jusqu'au site du barrage sur l'oued El Kébir, la zone des « massifs telliens du Nord » se limite à une surface de 247 km². (Mebarki, 2005)



Figure III.1 : Bassin versant kébir rhumel (ANRH.2005)

10

Grand Bassin kébir rhumel

Les caractéristiques d'un bassin hydrographique ou bassin versant, en particulier, sa taille et sa forme, mesurées et analysées quantitativement par une étude morpho-métrique, sont généralement déterminées par la structure géologique comprenant la nature des terrains (perméables, imperméables) et leur disposition, le relief (orographie), le climat, la végétation et les sols. De plus en plus, l'exploitation des cours d'eau perturbe leur régime, ce qui a un impact sur l'ensemble du bassin. Il apparaît que le bassin, espace drainé par un cours d'eau, est aussi un espace qui agit sur l'écoulement : c'est un hydro système.

I.1.1 Caractéristiques morpho métriques du bassin versant :

I.1.1.1 Périmètre :

On a mesuré le périmètre de notre bassin afin de délimiter le contour du bassin sur une carte topographique extraite de Google Maps à une échelle réelle

On a trouvé le périmètre réel de l'ordre de **458 km**

I.1.1.2 Surface du bassin versant :

Par la même méthode on a estimé la surface (A), **A= 7672 km²**

I.1.1.3 Indice de compacité ou de Gravelus :

L'indice de compacité K_c , s'établit en comparant le périmètre du bassin versant à celui d'un cercle qui aurait la même surface (A) soit :

$$K_c = 0.28 * P / \sqrt{A} \quad \longleftrightarrow \quad K_c = 0.28 * 458 / \sqrt{7672}$$

D'où : **$K_c = 1.46$**

La valeur de l'indice de compacité dans le cas d'un bassin circulaire est égale à 1, pour notre bassin d'étude, l'indice de compacité calculé est supérieur à 1, la forme du bassin est donc allongée favorise, pour une même pluie, les faibles débits de pointe de crue, ceci en raison des temps d'acheminement de l'eau à l'exutoire plus importants. Ce phénomène est lié à la notion de temps de concentration

I.1.1.4 Relief :

L'influence du relief sur l'écoulement se conçoit aisément, car de nombreux paramètres hydrométéorologiques varient avec l'altitude (précipitations, températures, etc.) et la morphologie du bassin. En outre, la pente influe sur la vitesse d'écoulement.

Pour avoir une idée générale sur le relief de notre région, nous avons établi la courbe hypsométrique à partir d'une carte hypsométrique (Fig.III.2)

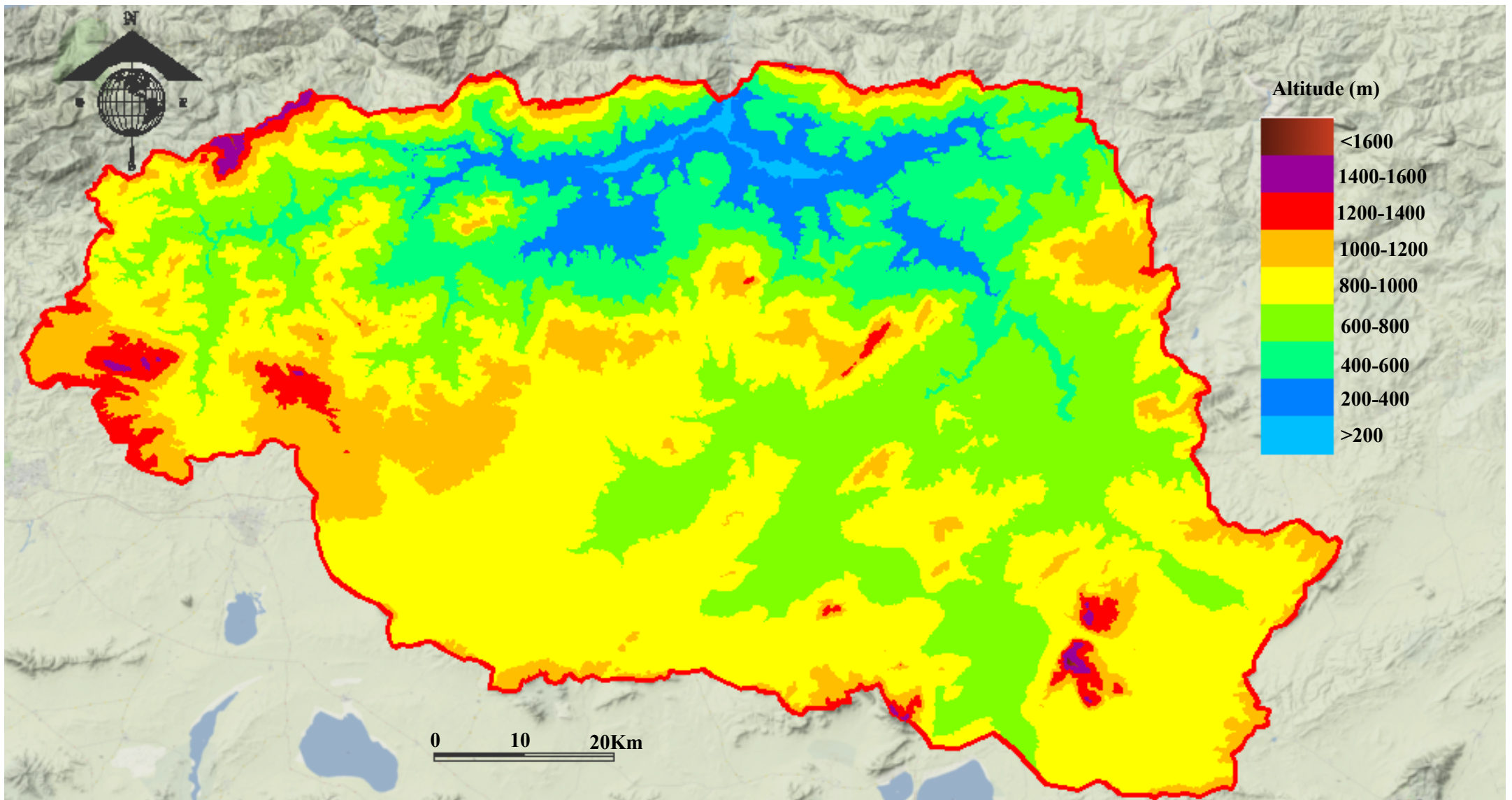


Figure III.2 : carte hypsométrique du bassin versant

La courbe (Fig.III.3) est obtenue en portant :

-en abscisses, l'altitude considérée

-en ordonnées, la surface partielle du bassin versant qui correspond aux surfaces comprises entre les différentes courbes de niveau et qu'est donnée dans le tableau 01 et dans lequel on calcule les surfaces cumulées et leurs pourcentages respectifs.

Tableau III.1 : détermination de la courbe hypsométrique

Altitude	S (Km2)	S cumulée (km2)	S(%)
>120	0	0	0
120-200	41.22385395	41.22385395	0.537328649
200-400	443.7969665	485.0208204	6.321960641
400-600	1136.725123	1621.745944	21.13850292
600-800	2496.763765	4118.509709	53.68234761
800-1000	2366.872319	6485.382028	84.53313384
1000-1200	552.9025747	7038.284603	91.73989315
1200-1400	386.818142	7425.102745	96.78183974
1400-1600	244.9062538	7670.008999	99.97404847
1600-1650	1.991001552	7672	100

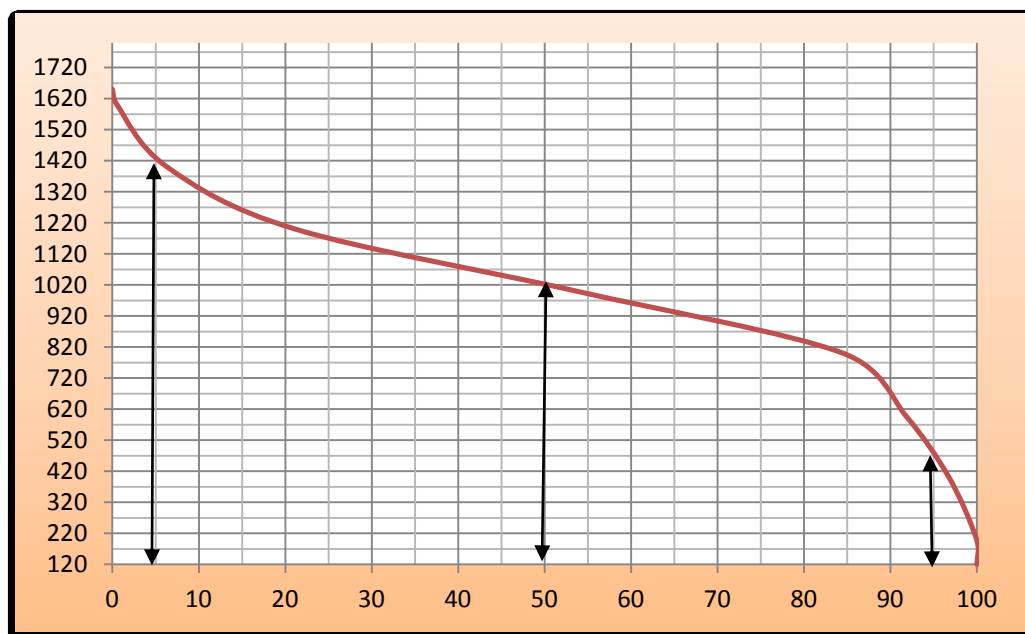


Figure III.3 : courbe hypsométrique de la zone d'étude

-L'altitude à95% de la surface, **H95%=435m**

-L'altitude à50% de la surface, **H50%=1020m**

-L'altitude à5% de la surface, **H5%=1420m**

- **Altitude moyenne :**

L'altitude moyenne H est calculée à partir de la courbe hypsométrique par la formule :

$$H = \frac{\sum S_i \cdot H_i}{S}$$

Avec :

S_i : surface partielle entre les courbes de niveau

H_i : altitude moyenne de deux courbes de niveau

S : surface totale du bassin versant

$$H_{moy} = 790.884 \text{ m}$$

- **Indice de pente :**

Le relief joue un grand rôle dans l'aptitude au ruissellement des eaux de surface sur le terrain, son évaluation ou son appréhension peut être traduite à l'aide de l'indice de pente globale I_g ,

avec : $I_g = D/L$

Où : D : dénivelée simple ou la distance verticale (en m) qui sépare les altitudes ayant 5% et 95% de la surface du bassin versant au-dessous et au-dessus de ces valeurs limites. Donc

$$D = H_{5\%} - H_{95\%}$$

La dénivelée peut être assimilée à la distance séparant les deux courbes de niveau maîtresse extrêmes qui délimitent le bassin versant. Elle est calculée comme suit : $D = 1420 - 435 =$

$$985 \text{ m}$$

L : longueur du rectangle équivalent

La notion du rectangle équivalent introduite par M. Roche (1962) permet de comparer aisément les bassins entre eux, tout en tenant compte de l'influence de leurs caractéristiques sur l'écoulement.

$$L = \frac{Kc \times \sqrt{S}}{1.12} \times \left[1 + \sqrt{1 - \left(\frac{1.12}{Kc} \right)^2} \right]$$

Où :

S : Surface du bassin versant

Kc : indice de compacité

$$L = 187.425 \text{ km}$$

$$I_g = D(\text{m})/L(\text{km}) = 985/187.425 = 5.25 \text{ m/km}$$

$$I_g = 5.25 \text{ m/km}$$

- **Dénivelé spécifique :**

$$D_s = I_g \times \sqrt{S}$$

$$D_s = 459.84 \text{ m}$$

La dénivelée spécifique permet d'utiliser la classification de L'O.R.S.T.O.M qui permet définir les différents types de relief des bassins quel que soit leurs superficies,

On trouve $D_s=459.84\text{m}$ d'après la classification de L'O.R.S.T.O.M, notre bassin versant présente **un relief fort** car : $250\text{m} > D_s(\text{m}) > 500 (\text{m})$

I.1.1.5 Réseau hydrographique :

Le réseau hydrographique est défini comme l'ensemble des cours d'eau naturels ou artificiels, permanents ou temporaires, qui participent à l'écoulement (Fig.III.4). Le réseau hydrographique est sans doute une des caractéristiques les plus importantes du bassin.

Le réseau hydrographique du bassin d'étude est représenté par deux oueds importants : Oued Rhumel et Oued Enndja, avec les affluents de chaque oued ; et des chaabats plus dense au Sud et à l'Ouest. Cette densité des cours d'eaux joue le rôle d'un exutoire et drainent une superficie importantes,

Le réseau a été influencé par les mouvements tectoniques affectant la région.

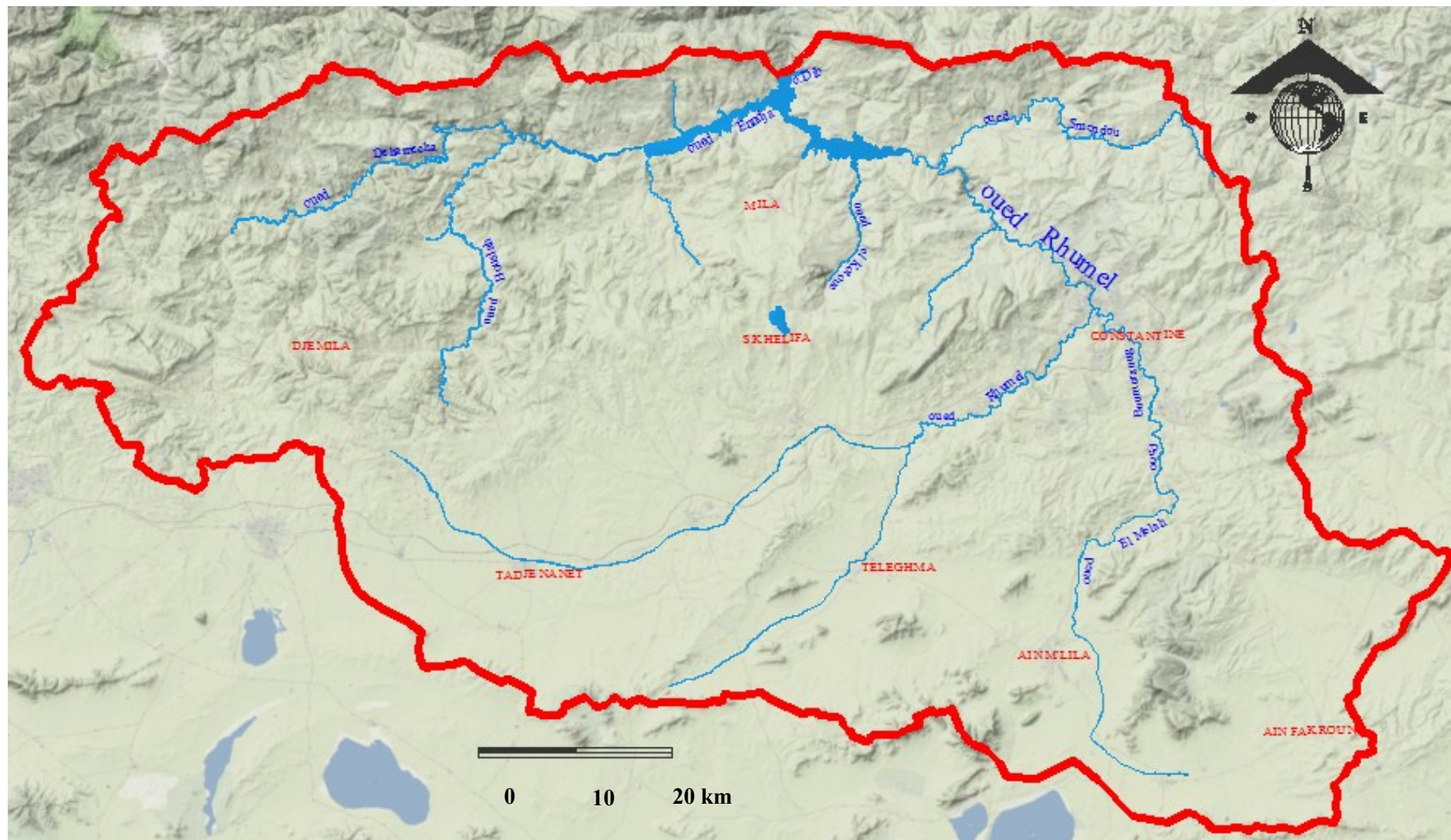


Figure III.4 : Bassin versant et réseau hydrographique de terrain d'étude

I.1.1.5.1 Oued Rhumel :

Oued Rhumel prend sa source vers 1 160 m dans les marges méridionales du Tell, au Nord-Ouest de Belaa. Il draine, suivant une orientation Sud-Ouest–Nord-Est, les sous-bassins semi-arides des Hautes Plaines (Tadjenamet, Chelghoum Laid) puis franchit le Rocher de Constantine en s'encaissant profondément (200 m de dénivellation) dans des gorges calcaires (Fig.III.5). Depuis, il s'écoule en direction Nord-Ouest et plus au Nord, aux environs de Sidi Merouane, il conflue avec l'oued Endja qui draine la partie occidentale du bassin.

L'oued Kébir résultant de la jonction des deux cours d'eau (Rhumel et Endja), franchit vigoureusement la chaîne numidique, bien exposée aux vents pluvieux en provenance de la Méditerranée. Puis, il traverse les massifs très arrosés de la Petite Kabylie d'El Milia, avant de s'écouler dans une large vallée vers la mer.

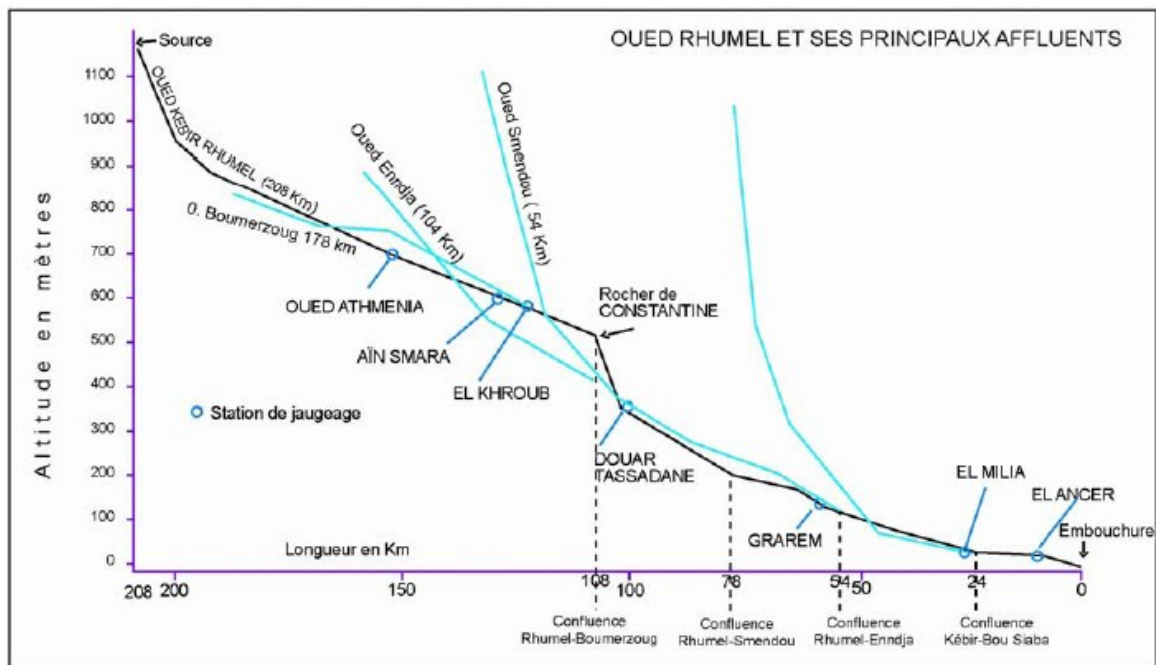


Figure III.5 : Profil en long de l'oued Kébir-Rhumel (in Mebarki A, 2005)

I.2 Climat du bassin :

I.2.1 Introduction :

En plus des facteurs lithologiques, morphologiques et orohydrographiques des cours d'eau ainsi que le comportement hydrogéologique des différents aquifères.

On a pris alors les données de la station météorologique de Beni Haroun qui est installée dans le versant Est du barrage. A partir des données de période 2003-2012 (les précipitations et les températures), nous avons présenté le climat et le bilan hydrique de notre région d'étude.

I.2.2 Les facteurs climatiques :

I.2.2.1 Précipitations : Ce sont les précipitations atmosphériques qui constituent le facteur essentiel intervenant surtout par :

-Leur hauteur totale annuelle

-Leur répartition mensuelle ou saisonnière qui influence directement les régimes hydrologiques du secteur étudié et participent à la réalimentation des différents aquifères

- **Précipitations mensuelles:**

Le tableau III.2 donne les valeurs moyennes mensuelles des pluviométries mesurées dans la période (2003-2012),

Tableau III.2 : valeurs moyennes mensuelles des pluviométries (2003-2012)

Mois	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mar	Avr	Mai	Juin	Juil	Aou	Annuel
moyenne	42,99	49,99	78,63	119,83	77,49	91,01	72,86	65,48	37,31	14,83	1,68	2,70	654,80

La représentation graphique de ces valeurs (Fig.III.6) constate que la précipitation maximale est marquée au mois de décembre avec 119.83mm, alors que le mois le plus sec est juillet avec 1.68 mm

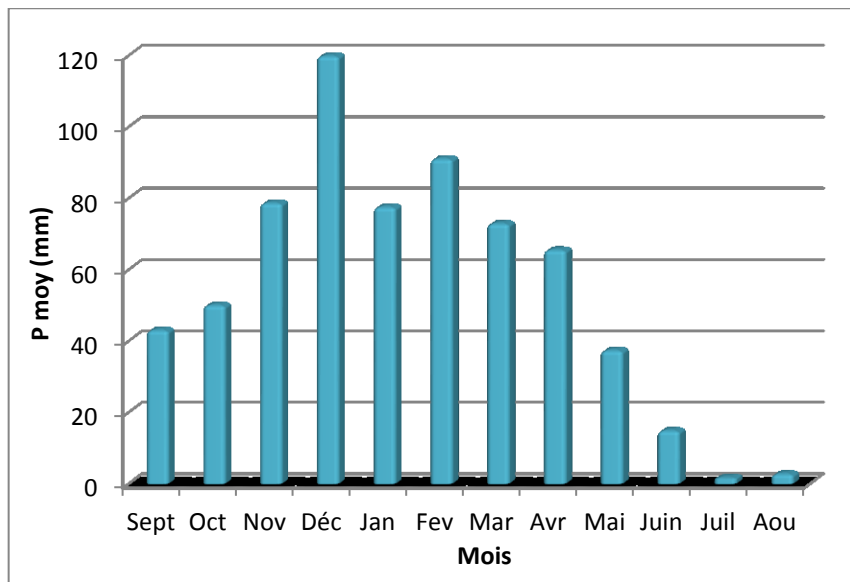


Figure III.6 : valeurs moyennes mensuelles des pluviométries (2003-2012)

- **Précipitations annuelles** : La répartition annuelle (Fig.III.7) montre une irrégularité interannuelle des précipitations, où on a enregistré un maximum de précipitations à 2004 avec 924.60 mm et le minimum à 2005 avec 479.60 mm.

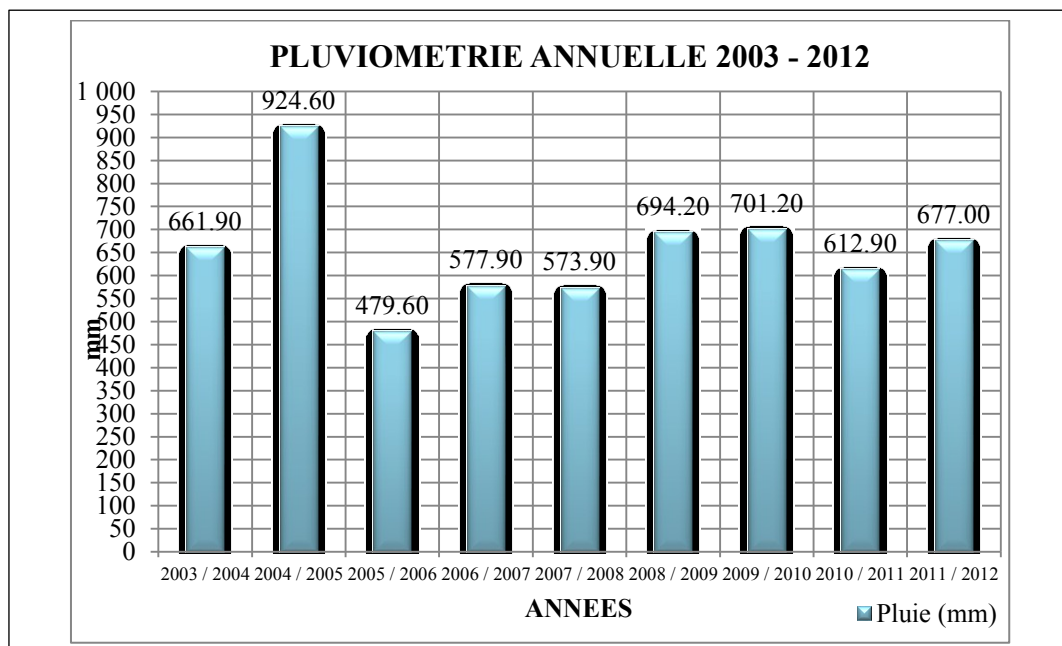


Figure III.7 : valeurs annuelle des pluviométries (2003-2012)

- **Précipitations saisonnières :**

Tableau III.3 : valeurs des précipitations saisonnières (2003-2012)

Saison	Automne	Hiver	Printemps	Eté
mm	171,61	288,33	175,64	19,21
%	26,21	44,03	26,82	2,93

Les résultats montrent que l'hiver est la saison la plus pluvieuse (ou humide) avec un pourcentage 44,03%, l'été correspond la saison la plus sèche avec un pourcentage de $\approx 3\%$. (Fig.III.8)

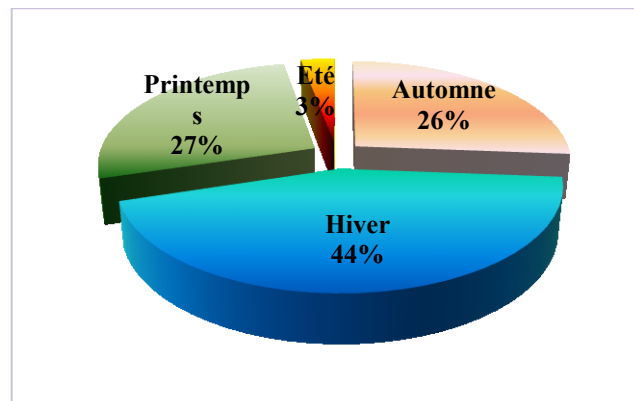


Figure III.8 : précipitation saisonnière

I.2.2.2 Température:

Les températures moyennes, mensuelles et annuelles régissent directement, en interaction avec les autres facteurs météorologique (précipitations, insolation,etc) le phénomène d'évaporation et par là même le déficit d'écoulement annuel et saisonnier. Les températures sont donc l'un des éléments majeurs influençant le climat d'une région. C'est aussi cet effet caractéristique du régime thermique qui nous intéresse spécialement d'autant plus que l'évapotranspiration atteint des valeurs importantes dans notre bassin notamment en saison chaude.

Le tableau III.4 donne les températures moyennes mensuelles pour une période de 10 ans (2003-2013). On note que la température moyenne mensuelle la plus élevée est celle du mois de juillet et Aout avec 26.56 et 26.93°C respectivement, donc ils sont les plus chauds, alors que les mois de Janvier et Février sont caractérisés par 8.10 et 8.12°C de température et qu'ils sont les plus froids. (Fig III.9)

Tableau III.4 : Températures moyennes mensuelles (2003-2012)

Mois	Sep	Oct	Nov	Déc	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Aoû	Annuel
Tmoy(°C)	22,46	18,20	12,42	8,87	8,12	8,10	10,61	14,35	17,54	23,00	26,56	26,92	16,43

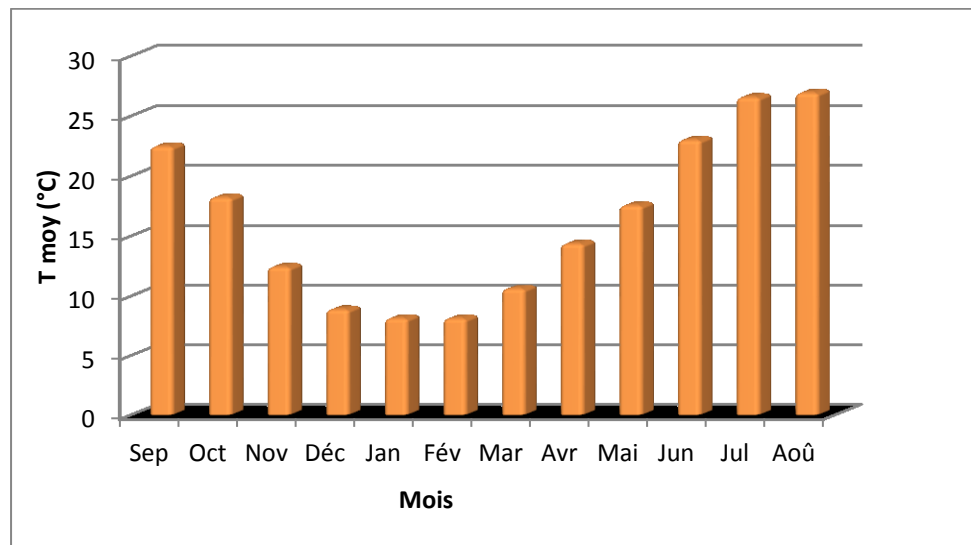


Figure III.9 : Température moyennes mensuelles (2003-2013)

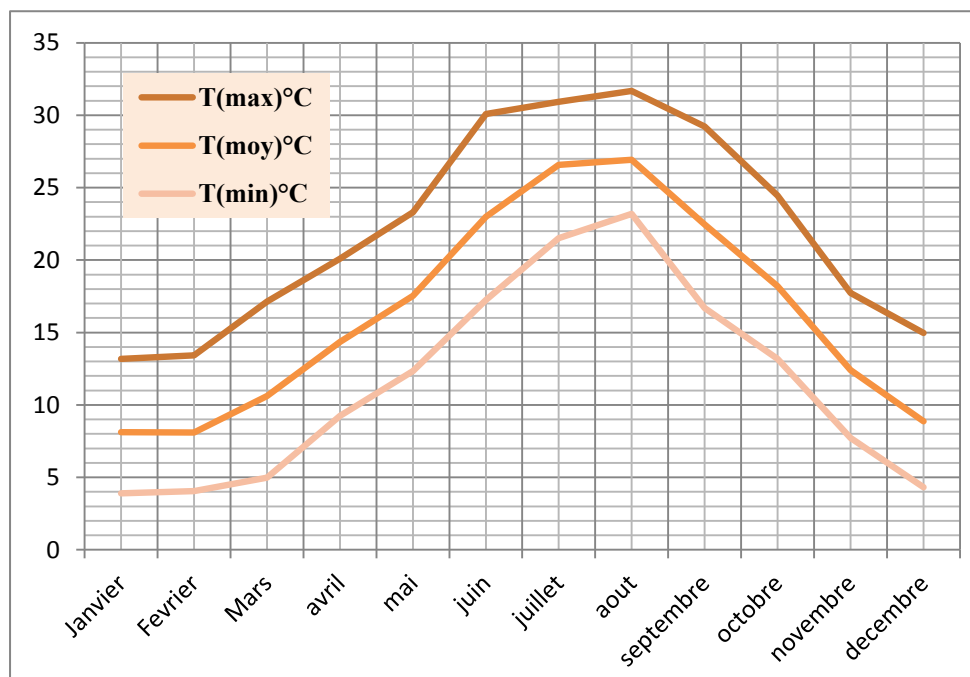


Figure III.10 : Température mensuelles (2003-2012)

I.2.2.2.1 diagramme Ombro-thermique :

Le diagramme Ombro-thermique est établi selon la méthode de Gausson et Bagnouls.

Les températures sont reportées à l'échelle double des précipitations. Cela permet de déterminer la période sèche durant laquelle la moyenne mensuelle des précipitations du mois est inférieure ou égale au double de la température ($P \leq 2T$).

Tableau III.5 : précipitation et température moyenne mensuelle (2003-2012)

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
P moy (mm)	77,49	91,01	72,86	65,48	37,31	14,83	1,68	2,70	42,99	49,99	78,63	119,83	654,80
T moy (°C)	8,12	8,10	10,61	14,35	17,54	23,00	26,56	26,92	22,46	18,20	12,42	8,87	16,43
2xT moy (°C)	16,24	16,21	21,21	28,69	35,07	46,00	53,12	53,85	44,92	36,40	24,83	17,73	32,86

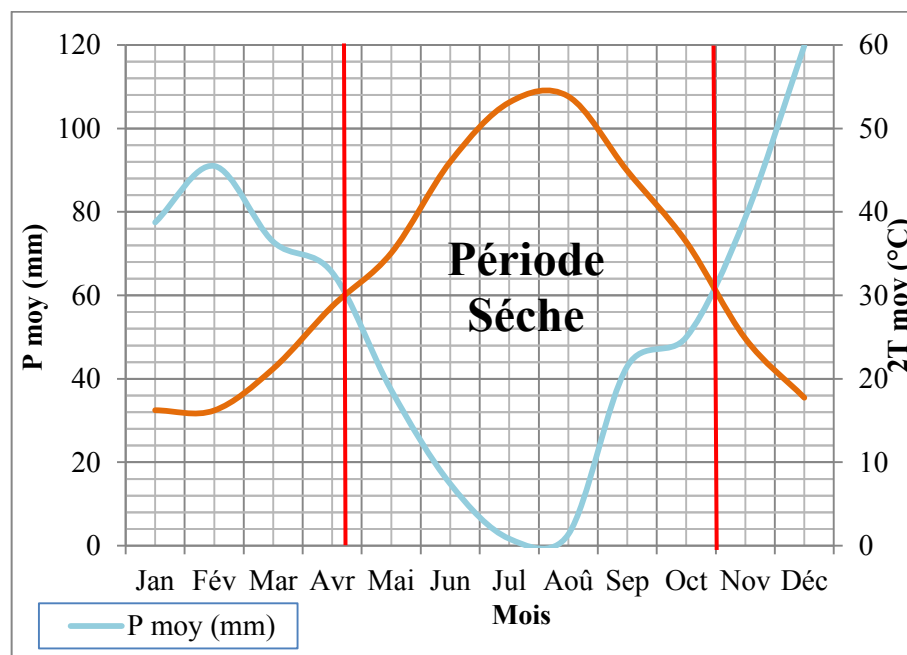


Figure III.11: Diagramme Ombro-thermique

D'après le Diagramme Ombro-Thermique la période sèche s'étale depuis la dernière semaine du mois d'avril jusqu'à la dernière semaine du mois d'Octobre avec une durée de six mois et une semaine.

I.2.2.3 Détermination de l'humidité du sol (méthode d'Euverte) :

Cette méthode est basée sur l'établissement d'un rapport entre les précipitations et les températures moyennes mensuelles (P/T) d'une même période.

Le rapport (P/T) donne la valeur de l'humidité du sol et permet de définir 4 types de régimes (Tab.III.6).

Tableau III.6 : classification d'Euverte

Rapport (P/T)	P/T < 1	1 < P/T < 2	2 < P/T < 3	P/T > 3
Le régime	Très sec	sec	Subhumide	humide

Tableau III.7 : Résultat de calcul d'après la classification d'Euverte"

Mois	Jan	Fév	Mar	Avr	Mai	Jun	Jul	Août	Sep	Oct	Nov	Déc	Annuel
P moy (mm)	77,49	91,01	72,86	65,48	37,31	14,83	1,68	2,70	42,99	49,99	78,63	119,83	654,80
T moy (°C)	8,12	8,10	10,61	14,35	17,54	23,00	26,56	26,92	22,46	18,20	12,42	8,87	16,43
P/T	9,55	11,23	6,87	4,56	2,13	0,64	0,06	0,10	1,91	2,75	6,33	13,51	4,97

Les valeurs du rapport P/T représentées dans le Tableau N°III.7 permettent de connaître l'évolution de l'humidité du sol pendant l'année :

- ✓ Un régime **très sec** durant les mois de Juin, Juillet et Aout.
- ✓ Un régime **sec** durant le mois de Septembre.
- ✓ Un régime **subhumide** durant le mois d'Octobre et Mai.
- ✓ Le régime est **humide** pendant le reste de l'année.

I.2.2.4 Détermination de l'aridité (indice de "De Martonne") :

L'indice de l'aridité est un indicateur quantitatif du degré du manque d'eau présente à un endroit donné . On va calculer cet indice (A) par la formule de De Martonne:

$$A = P / (T + 10)$$

Avec : P : précipitations moyennes annuelles (mm).
T : température moyenne annuelle (°C).
A : indice de "De Martonne".

Tableau III.8 : Classification de "De Martonne"

	A < 5	5 < A < 7.5	7.5 < A < 10	10 < A < 20	A > 20
Type de climat	hyperbolique	désertique	steppique	Semi-aride	tempéré

Pour le cas de la région de Beni Haroun :

$$\left\{ \begin{array}{l} P = 654,80 \text{ mm} \\ \Gamma = 16,43 \text{ }^{\circ}\text{C} \end{array} \right. \longrightarrow A = 24,77$$

Selon "De Martonne", une valeur de A supérieur à 20 caractérise un milieu tempéré.

I.2.2.5 Climagramme d'Emberger :

Le Climagramme d'Emberger est un abaque comportant en ordonnées les valeurs du quotidien pluviométrique d'Emberger (Q2), et en abscisses les valeurs des moyennes des minimums de la saison froide (T°C) ou :

$$Q2 = 1000 * P / (M + m/2) * (M - m)$$

$$M = T^{\circ}\text{C} + 273.2 = 304.88$$

$$m = T^{\circ}\text{C} + 273.2 = 277.08$$

$$Q2 = 80.95$$

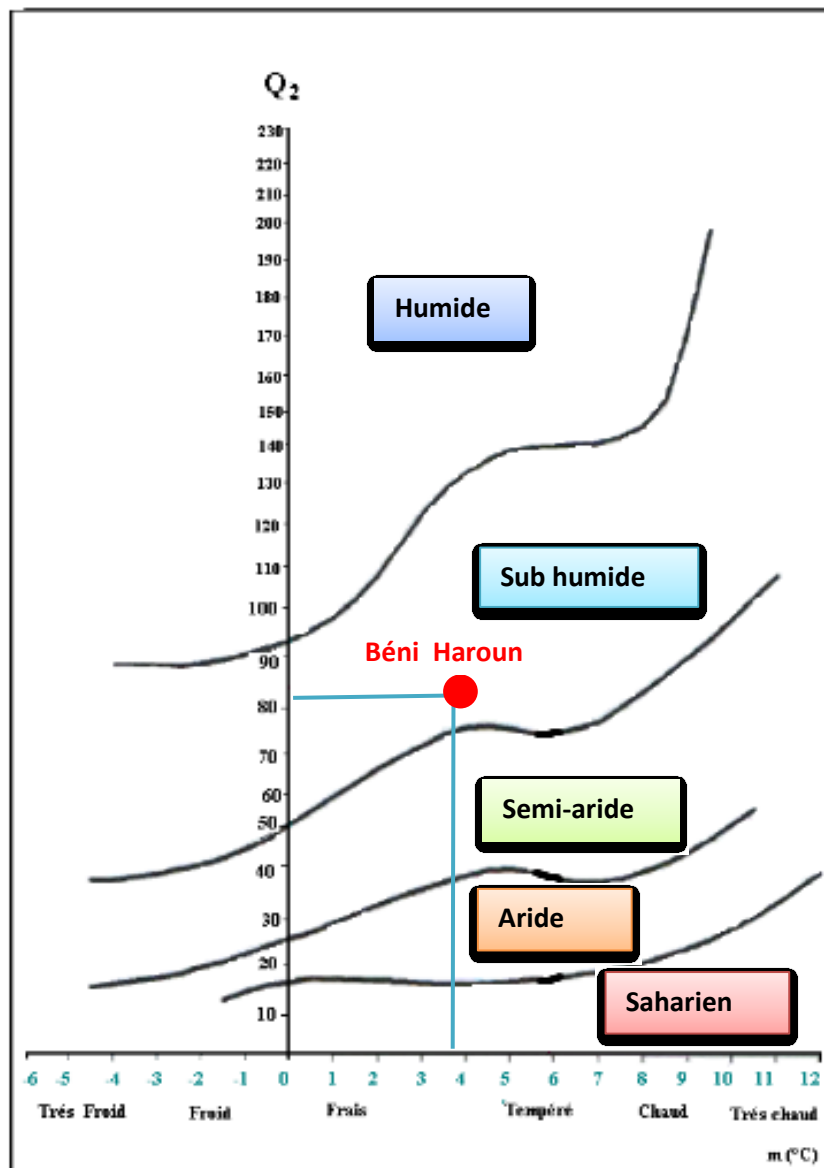


Figure III.12 : classification de climat d'Emberger

I.2.2.6 Evaporation :

Le phénomène de l'évaporation des lacs des barrages en Algérie est considérable ; une perte de volume très élevée est enregistrée annuellement dans les barrages. Les mesures de l'évaporation se font à l'aide d'un bac Colorado installé à proximité de la retenue.

Le graphe (Fig.III.13), présente l'évolution du volume évaporé dans la retenue de Béni Haroun, durant la période:2003-2013. La capacité du réservoir au mois d'Août 2012 a atteint un volume total de 10.48 Hm³.

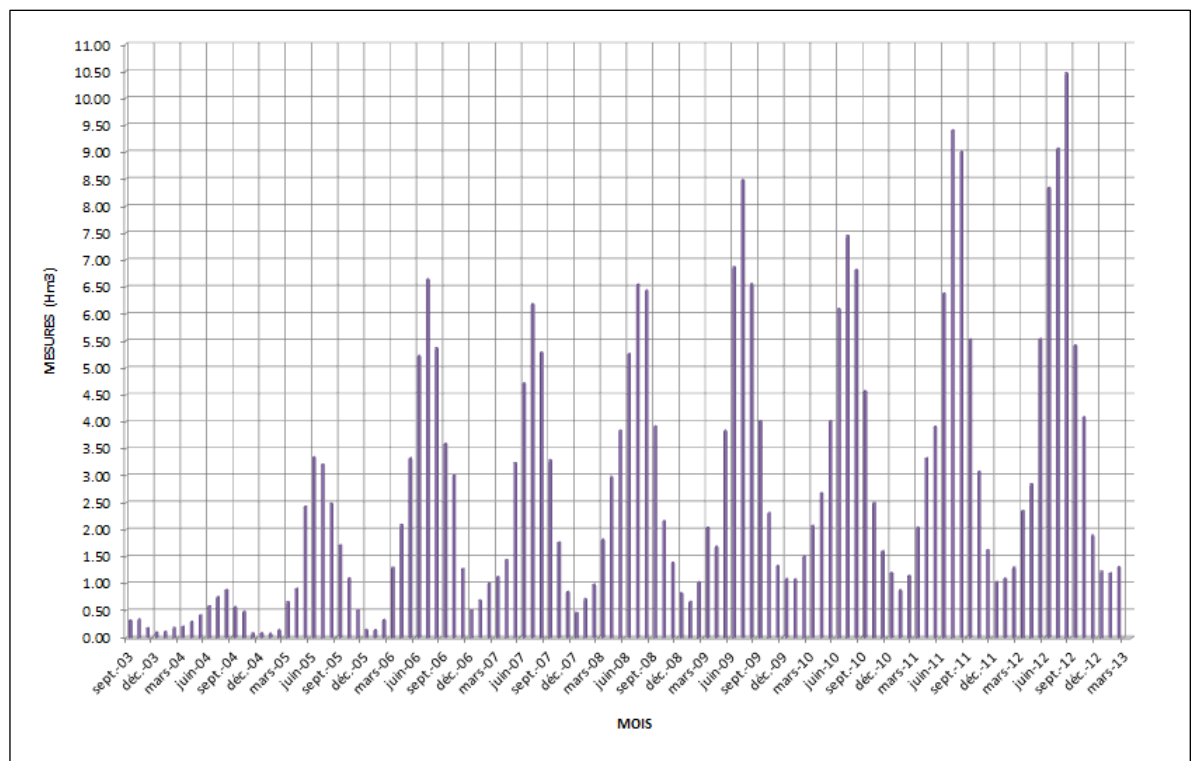


Figure III.13 : Evaporation dans le barrage de Beni Haroun durant la période (2003-2013) (ANBT.2013)

I.3 Bilan hydrologique :

L'étude hydrologique d'un bassin versant suppose la détermination de son bilan hydrique pour une année moyenne.

L'équation du bilan s'écrit : $P=E+R+I$

P : Précipitation en mm

R: ruissèlement de surface en mm

I : infiltration en mm

E: évapotranspiration en mm

La connaissance de la précipitation et de l'évapotranspiration nous permet d'évaluer ce bilan

I.3.1 Estimation de l'évapotranspiration : On appelle évapotranspiration potentielle (notée par la suite ETP) est la quantité d'eau qui serait évaporée ou transpirée à partir d'un bassin versant si l'eau disponible pour l'évapotranspiration n'était pas un facteur limitant.

L'évapotranspiration réelle (notée par la suite ETR), la quantité d'eau, généralement exprimée en millimètres, évaporée ou transpirée par le sol, les végétaux et les surfaces libres d'un bassin versant.

I.3.1.1 Evaluation de l'évapotranspiration potentielle: Plusieurs formules

permettent d'évaluer l'ETP à partir de différentes mesures climatologiques

La plus utilisée est de THORNTHWAITE

Formule de THORNTHWAITE :

THORNTHWAITE a proposé également une formule basée essentiellement sur les températures de l'air :

$$ETP=16X (10/I)^a \times t^a \times f$$

$$a=\frac{1.6}{100} \times I+0.5 \text{ et } I=\sum_{i=1}^N i \text{ avec } i=\left(\frac{t}{5}\right)^{1.514}$$

t : température moyenne mensuelle, °C

f : Facteur de correction

N: durée astronomique du jour pendant le mois considérée (h/jour)

φ : paramètre dépend du nombre de jour par mois

jour	28	29	30	31
φ	0,0778	0,0806	0,0833	0,0861

Tableau III.9 : calcul de l'ETP selon THORNTHWAITE

	Jan	Fév	Mars	Avr	Mai	Juin	Juill	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	
t (°c)	8.12	8.10	10.61	14.35	17.54	23.00	26.56	26.92	22.46	18.20	12.42	8.87	
N	10.10	11.00	11.90	13.10	14.00	14.50	14.30	13.50	12.40	11.30	10.30	9.80	
φ	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	0.09	0.08	0.09	0.08	0.09	
f	0.87	0.89	1.02	1.09	1.21	1.21	1.23	1.16	1.03	0.97	0.86	0.84	
i	2.08	2.08	3.12	4.93	6.68	10.08	12.53	12.79	9.72	7.07	3.96	2.38	
a	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	1.74	
ETP (mm)	15.10	15.35	28.33	51.01	79.90	128.3	168.01	162.39	105.29	68.80	31.20	17.08	870.785

I.3.1.2 Evaluation de l'évapotranspiration réelle:

a)Selon Turc : Turc présente la formule suivante :
$$ETR = \frac{P}{\sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}}$$

L= coefficient de température =300+25×T+0.05T³ = 932.5097

P= Précipitation moyenne annuelle =654.80mm \longrightarrow **ETR= 554.78mm**

b)Selon Coutagne : $ETR = P - \lambda P^2$ si $\frac{1}{8\lambda} < P < \frac{1}{2\lambda}$

Avec : $\lambda = \frac{1}{0.8+0.14 \times t} = 0.3226$

$0.38 < P < 1.428$ Donc : $ETR=516.49\text{mm}$

c)Selon THORNTHWAITE :

Cette méthode est basée sur la notion de réserve en eau facilement utilisable (notée par la suite RFU). On admet que le sol est capable de stocker une certaine quantité d'eau (la RFU) ; cette eau peut être reprise pour l'évaporation par l'intermédiaire des plantes.

La quantité d'eau stockée dans la RFU est bornée par 0 (la RFU vide) et RFU max (capacité maximale de la RFU qui est de l'ordre de 0 à 200 mm suivant les sols et sous-sols considérés, avec une moyenne de l'ordre de 100 mm).

On admet que la satisfaction de l'ETP a priorité sur l'écoulement, c'est-à-dire qu'avant qu'il n'y ait d'écoulement.

Il faut avoir satisfait le pouvoir évaporant (ETP= ETR). Par ailleurs, la complétion de la RFU est également prioritaire sur l'écoulement

On établit ainsi un bilan à l'échelle mensuelle, à partir de la pluie du mois P, de l'ETP et de la RFU.

Si $P > ETP$, alors : il reste un excédent ($P - ETP$) qui est affecté en premier lieu à la RFU, et, si la RFU est complète, à l'écoulement Q

Si $P < ETP$: on évapore toute la pluie et on prend à la RFU (jusqu'à la vider) l'eau nécessaire pour satisfaire l'ETR soit :

$$ETR = P + (RFU, ETP-P)$$

$$RFU = 0 \text{ ou } RFU + P - ETP$$

Si $RFU = 0$, la quantité ($Da = ETP - ETR$) représente le déficit agricole, c'est-à-dire sensiblement la quantité d'eau qu'il faudrait apporter aux plantes pour qu'elles ne souffrent pas de la sécheresse.

Tableau III.10 : Bilan hydrique selon la méthode de Thornthwaite pour la station de Beni Haroun pour la période 2003/2012:

	<i>Jan</i>	<i>Fév</i>	<i>Mars</i>	<i>Avr</i>	<i>Mai</i>	<i>Juin</i>	<i>Juill</i>	<i>Aout</i>	<i>Sept</i>	<i>Oct</i>	<i>Nov</i>	<i>Dec</i>	
P	77.49	91.01	72.86	65.48	37.31	14.83	1.68	2.70	42.99	49.99	78.63	119.83	654.80
ETP	15.10	15.35	28.33	51.01	79.90	128.33	168.01	162.39	105.29	68.80	31.20	17.08	870.79
ETR	15.10	15.35	28.33	51.01	79.90	72.25	1.68	2.70	42.99	49.99	31.20	17.08	407.58
RFU	100.00	100.00	100.00	100.00	57.42	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	47.44	100.00	
EXC	62.39	75.66	44.53	14.47	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	50.19	
DA	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	56.08	166.33	159.69	62.30	18.81	0.00	0.00	

A partir des résultats précédents nous constatons qu'à partir du mois de Novembre jusqu'à Avril les précipitations deviennent supérieures à l'ETP et on a une reconstitution d'une partie des réserves du sol. Ces réserves atteignent leurs maximums au mois de Décembre jusqu'à la fin d'Avril.

A partir du mois de Mai les réserves commencent à s'épuiser jusqu'à devenir nulles au mois de Juin à Octobre et le déficit agricole atteint par conséquent son maximum au mois de juillet avec une valeur de 166.33mm.

La valeur de l'ETR est de l'ordre de 407.58 mm soit 59.97% des précipitations moyennes annuelles.

Le déficit agricole est de 463.21mm qui nous montre que la période de sèche commence au mois de Juin se poursuit jusqu'au la fin d'Octobre.

Tandis que l'excédent(EXC) qu'est de 247.23mm est enregistré sur une période courte allant du mois de Décembre jusqu'au mois d'Avril.

Les valeurs de l'ETR calculées selon les différentes méthodes sont assez proche sauf que l'ETR de Thornthwaite qu'il est petit que les autres et que celle calculée selon Coutagne est légèrement en deçà de la moyenne qu'il est de l'ordre de 516.49 mm et qui présente 78.87% de précipitation.

Ceci nous renseigne sur l'importance de l'évapotranspiration dans la région.

I.4 Ruissellement :

L'écoulement par gravité à la surface du sol suivant la pente du terrain et dans le réseau hydrographique des eaux météoriques présente le ruissellement superficiel, ensuite une infime partie d'eau sera soumise à l'infiltration qui alimentera les nappes souterraines.

I.4.1 Estimation de ruissellement superficielle R :

L'estimation du ruissellement R est évaluée par la méthode approchée de Tixeront-Berkaloff,

Elle s'écrit : $R = P^3 / 3(ETP^2)$ avec : R : ruissellement (mm)

P : précipitation moyenne annuelle (mm)

ETP : évapotranspiration potentiel (mm)

R=123.42mm ou **18.85%** de précipitation

I.5 Infiltration :

La formule du bilan s'écrit : $P = ETR + R + I$

P: précipitation moyenne annuelle en mm/an=654.80mm

R: Ruissèlement moyenne en mm

I : Infiltration en mm

$I = P - ETR - R$

I= 123.75mm

I= 123.75 mm ce qui présente **18.89%** de précipitation

Cette valeur favorise l'alimentation des nappes.

Conclusion :

L'objectif de cette étude est d'identifier les caractéristiques morphologiques de notre bassin versant ainsi que leur relation avec les conditions climatiques concernant la période 2003-2012. Pour ça on a obtenu les informations suivantes :

- ✓ Le bassin versant est classé dans le régime sub humide avec une précipitation et température moyennes annuelles 654.80 mm et 16.43°C successivement.
- ✓ Le facteur le plus important est l'évapotranspiration avec une valeur de l'évaporation potentielle de 870.79 mm et l'évaporation réelle de l'ordre de 59.97 % de précipitation.
- ✓ Ainsi ; nous constatons que 18.89% comme valeur d'infiltration est un facteur qui favorise l'alimentation des nappes et qu'il est expliqué par d'autres phénomènes morphologiques ou tectonique.

CHAPITRE IV

Hydrogéologie

Introduction :

La relation eaux de surface - eaux souterraines a fait l'objet de nombreuses études dans des domaines très variés qui regroupent les problématiques hydrologiques, hydrogéologiques, ou encore hydrogéochimiques,

D'autre part, du point de vue de la ressource en eau, les eaux souterraines d'accompagnement des cours d'eau constituent des réservoirs aquifères ayant souvent de bonnes propriétés hydrodynamiques.

Notre région d'étude est caractérisée par un comportement riche de ressource en eau soit eau de surface (oueds, barrage) soit eaux souterraines (nappes alluviales, nappe karstique).

Dans ce chapitre, on va aborder les points suivants :

- ✓ La présentation des aquifères existants.
- ✓ Les caractéristiques hydrogéologiques des aquifères avant le barrage.
- ✓ La relation barrage–nappes suivant l'évolution piézométrique.

I. Présentation des aquifères existants :

Les études géologiques et hydrogéologiques de l'ANBT ont montré la présence d'une nappe de fissure dans les formations calcaires sur lesquelles s'appuie le barrage. Les formations calcaires sont encadrées, tant à l'amont qu'à l'aval du barrage par des formations marneuses moins perméables constituant une nappe perchée.

Dans un autre côté du barrage au niveau de l'affluent d'oued Endja, les formations de Mio plio quaternaire constituent une nappe alluviale. (Fig IV.1)

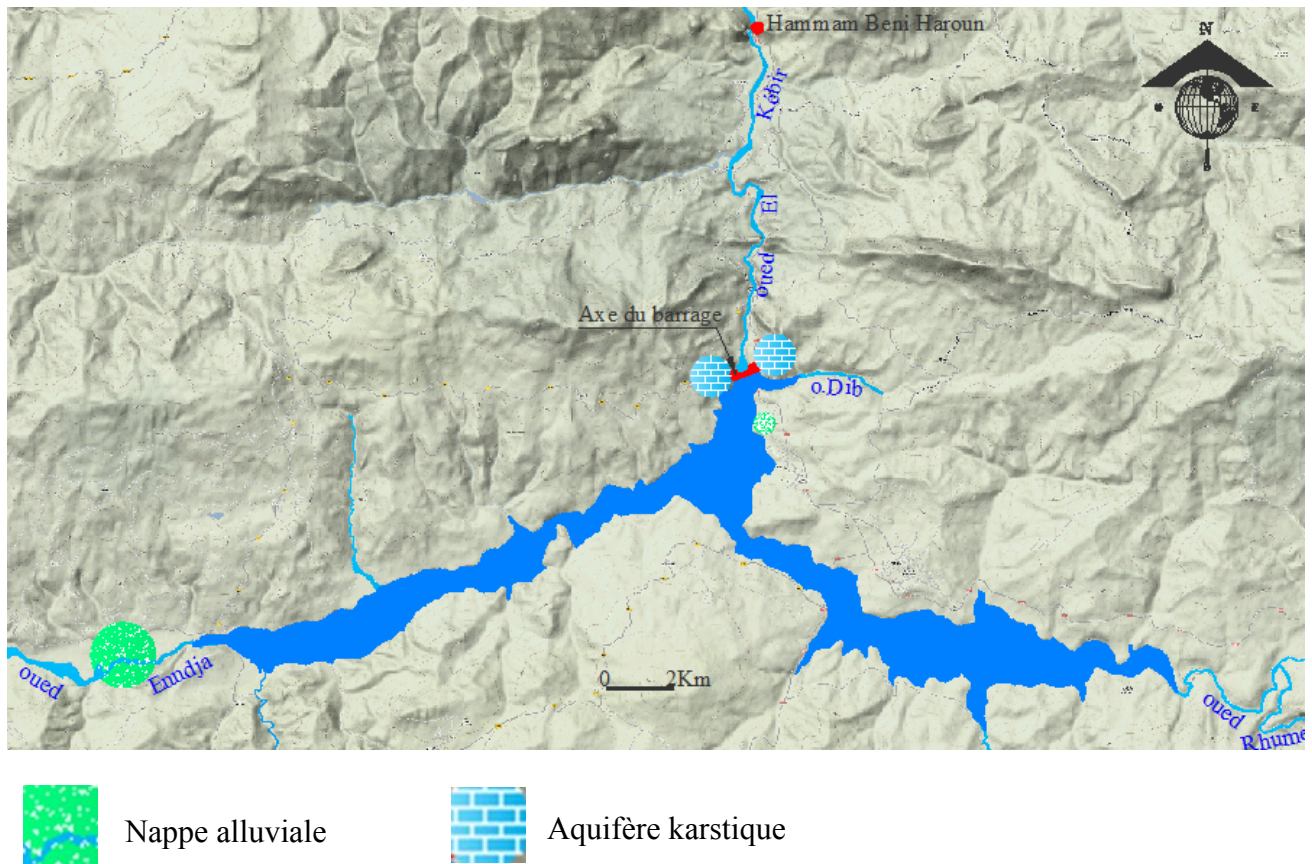


Figure IV.1 : Carte de situation présentant les aquifères existants

II. L'aquifère Karstique :

Les calcaires existant dans le barrage au niveau de la fondation et des appuis constituent l'aquifère karstique, Tout calcaire est, par définition, « karstifiable » puisqu'il présente une certaine solubilité, celle-ci variant avec la nature du calcaire.

II.1 Généralité sur le karst :

II.1.1 Définition:

Le karst (mot allemand) est un nom d'une région calcaire de Yougoslavie dont les formes souterraines et superficielles sont assez typiques. Le système karstique se caractérise par des phénomènes hydrauliques spécifiques tels que l'existence d'importantes sources, de pertes et de l'existence de réseaux à grande échelle (Chabour.2006)

II.1.2 Structure et fonctionnement des aquifères karstiques :

La karstification en générale est un processus d'altération chimique et d'érosion mécanique qui permet la formation des vides karstiques connectés et hiérarchisés constituant une unité de drainage karstique au sein de la roche originelle.

Les roches concernées sont celles qui pourront être dissoutes directement par l'eau de pluie et surtout celles qui peuvent être dissoutes par l'eau infiltrée à travers le sol, ce qui regroupe l'ensemble des formations carbonatées calcaires et dolomies. En effet, l'activité biologique au niveau du sol joue un rôle fondamental en augmentant la pression partielle de CO₂ (pCO₂) du milieu ; l'eau infiltrée va alors s'équilibrer avec ce milieu et s'enrichir en CO₂, ce qui lui confère un caractère acide qui favorise la dissolution des carbonates, Ces eaux infiltrées sont dites agressives vis-à-vis de la calcite compte tenu de leur fort pouvoir de dissolution. Néanmoins, la très faible minéralisation de l'eau de pluie qui s'équilibre avec la pCO₂ de l'atmosphère peut aussi présenter un pouvoir de dissolution élevé : C'est le cas des eaux de ruissellement direct sur un terrain non karstique qui atteignent plus en aval un aquifère karstique. De plus, l'oxydation de la matière organique qui est amenée en quantité importante par les pertes de rivière produit du CO₂ et favorise d'autant plus la dissolution de la calcite et le développement des réseaux de drainage karstique. Dans le cas d'une perte en rivière, le flux d'éléments dissous sera donc lié au débit de la rivière qui atteint le karst (Vincent Bailly-Comte.2008, p30).

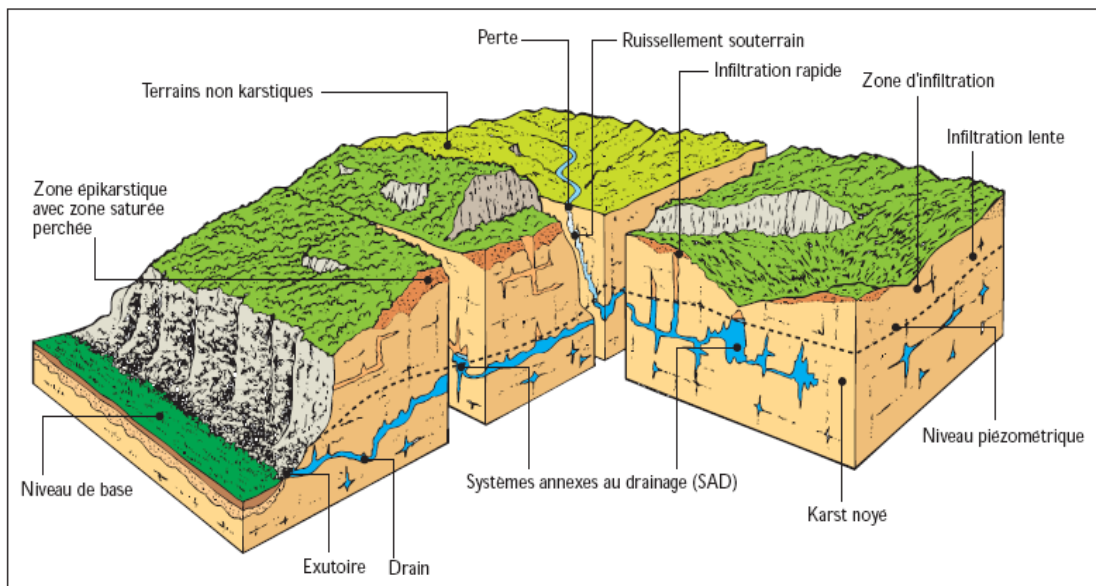


Figure IV.2 : Aquifère Karstique (Mangin, 1975)

II.1.3 Circulations souterraines et développement du réseau karstique

La circulation de l'eau au niveau des discontinuités préexistantes de la roche encaissante (micro fissure, fracture, joint de stratification) et dans certains cas à travers la porosité originelle de la roche (calcaire bioclastique, certaines craies) entraîne par un élargissement progressif le développement du réseau de drainage karstique, ce qui en retour favorise la circulation de l'eau. La genèse des réseaux de drainage karstique est donc un processus décrivant une boucle de rétroaction positive, ce qui est à l'origine de la hiérarchisation du réseau et de son adaptation rapide aux changements des conditions limites qui contrôlent les écoulements. Cette organisation du drainage confère aux aquifères karstiques un comportement hydrodynamique spécifique. L'énergie disponible pour l'écoulement et la karstification qui en dépend est matérialisée par le gradient hydraulique. Il est lié à la différence d'altitude entre la surface où s'effectue la recharge et la condition limite de décharge, appelée niveau de base, matérialisée par la position de l'exutoire karstique (Fig.2). Une variation relative du niveau de base entraîne un rééquilibrage des réseaux karstiques qui s'adaptent très rapidement aux nouvelles conditions d'écoulement. La position relative du niveau de base par rapport à la zone de recharge est donc un élément majeur qui explique le processus de karstification.

Ce rééquilibrage rapide permet d'expliquer le développement étagé des réseaux karstiques qui enregistrent les évolutions relatives passées du niveau de base, notamment en zone de montagne suite à l'enfoncement des cours d'eau et aux mouvements relatifs des masses rocheuses (mouvements tectoniques).

La karstification dépend aussi du faciès chimique de l'eau qui est véhiculée, et en particulier de son pouvoir de dissolution. Celui-ci diminue au fur et à mesure que l'eau s'éloigne de la zone de recharge et que l'eau s'équilibre avec la calcite.

La combinaison du pouvoir de dissolution, du degré de fracturation, de la structure tectonique préexistante et du gradient hydraulique définit le potentiel de karstification (Mangin, 1975; Mangin, 1978) du système étudié. L'évolution spatiale et temporelle de ce potentiel permet de comprendre la genèse du réseau karstique, notamment sous le niveau de l'exutoire. Si l'on considère que ce potentiel est constant, alors les grands vides karstiques seront situés soit en un point qui favorise l'altération chimique, soit en un point qui favorise l'altération mécanique.

L'altération chimique, sous réserve qu'il existe une circulation d'eau, est favorisée à proximité de la surface où elle est associée à une décompression des roches et à des facteurs climatiques favorisant l'érosion de la partie supérieure de l'aquifère.

L'érosion mécanique est favorisée lorsque la vitesse des écoulements devient importante, ce qui s'observe dans les drains principaux plus on se rapproche de l'exutoire (Mangin, 1975).

L'ensemble des processus de décompression et d'altération à la surface d'un karst au contact de l'atmosphère se traduit par une zone plus perméable pouvant atteindre quelques dizaines de mètres sous la surface du sol : l'épikarst (Comte.2008).

II.1.4 Type de recharge :

Les régions karstiques sont des milieux où l'eau est souvent absente en surface à cause de la grande perméabilité des terrains. On trouve classiquement 2 types d'alimentation, une alimentation par les précipitations sur la zone de recharge de l'aquifère et une alimentation par les pertes de rivières, c'est-à-dire les rivières qui drainent des terrains non karstiques avant de rejoindre l'aquifère karstique (Fig.IV.2)

a) Alimentation par les précipitations :

Sur la zone de recharge de l'aquifère, l'écoulement dans ce cas est caractérisé par une infiltration lente avec un stockage temporaire possible (aquifère épikarstique, Mangin, 1975) et une infiltration rapide et concentrée qui utilise et élargit les discontinuités subverticales de l'épikarst pour rejoindre rapidement la zone saturée (ou zone noyée) du karst sans nécessairement recharger de manière significative les volumes peu perméables de la zone non saturée. Ainsi, des phénomènes de court-circuit par des axes de drainage développés dans la zone d'infiltration permettent d'acheminer les eaux plus rapidement en profondeur (ruissellement souterrain). Ces écoulements rapides ont été mis en évidence par l'utilisation de traceurs géochimiques et de simulations numériques (Comte.2008). Ils permettent entre autre d'acheminer en profondeur une eau ayant un plus fort pouvoir de dissolution et donc de poursuivre la karstification.

L'infiltration peut aussi « pousser » de l'eau préalablement stockée depuis les dernières pluies (effet piston). En surface, des formes d'érosion spécifiques aux paysages karstiques témoignent du drainage des eaux vers le milieu souterrain (effondrement, dolines, gouffres) (Fig.IV.2). Il est de plus fréquent d'observer des vallées sèches qui témoignent d'un abandon des structures d'écoulement de surface au profit d'un drainage souterrain au fur et à mesure que la karstification s'est développée. L'orientation de ces vallées ainsi que la distribution spatiale des manifestations karstiques (dolines, poljés, cavités, etc...) sont des indices de l'organisation de la karstification passée ou actuelle qui peuvent donc être utilisées pour comprendre le fonctionnement du karst pour différentes conditions hydrogéologiques.

Enfin, l'approche systémique des aquifères karstiques permet de décrire l'ensemble de ces processus en définissant le système karstique (Mangin, 1975). Celui-ci reçoit un signal (pluie, température, etc.), le transforme (opérateur de transfert) puis renvoie un signal de sortie (débit, température, etc.). Lorsque les limites du système correspondent aux limites de

l'aquifère et qu'il n'est pas nécessaire de faire intervenir une autre surface de recharge, le système est qualifié de système karstique unaire (In Comte, 2008).

b) Alimentation par les pertes de rivière :

Le cas d'une recharge par une rivière s'apparente au cas d'une infiltration concentrée et rapide puisque les écoulements de surface provenant d'un bassin versant généralement non karstique (fort pouvoir de dissolution) vont s'infiltrer rapidement à la faveur de pertes diffuses ou ponctuelles en liaison directe avec le réseau karstique. Dans ce cas, le système karstique reçoit des eaux précipitées sur une autre surface et la notion de système karstique est étendue pour inclure cette surface : le système est alors qualifié de système karstique binaire (In Comte, 2008). (Fig.IV.3)

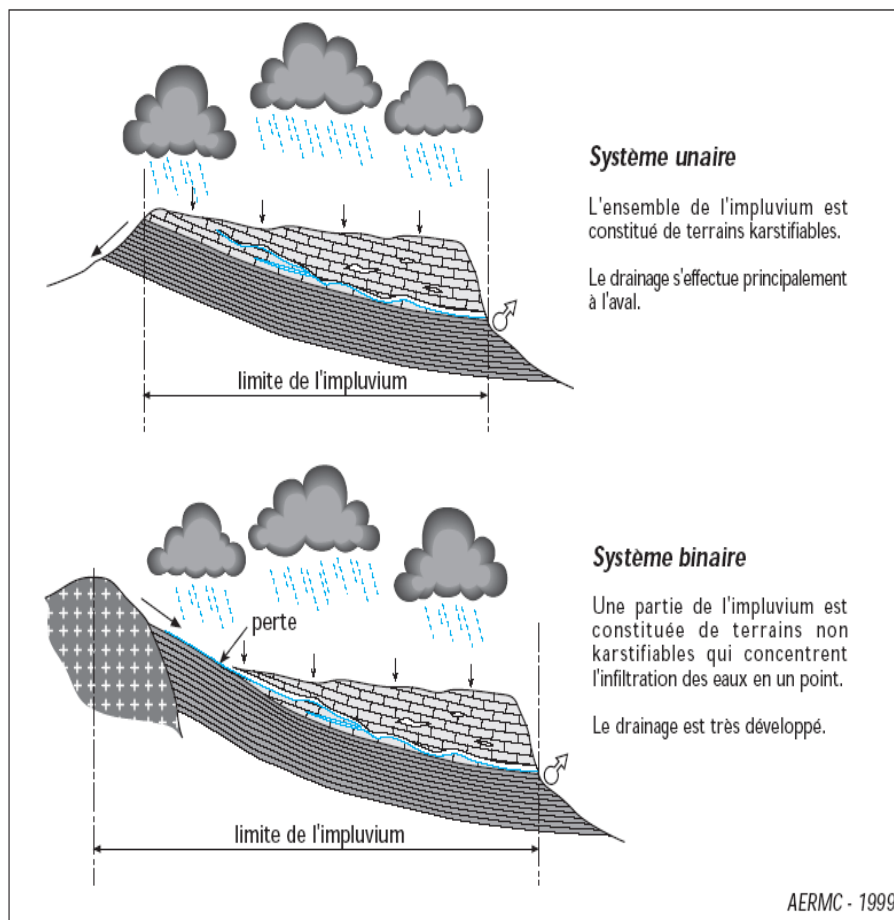


Figure.IV.3 : Types de systèmes karstiques, d'après leur impluvium (Marsaud, 1996)

II.2 Caractérisation de l'aquifère karstique avant la construction du barrage :

II.2.1 Structure et géométrie du réservoir :

La karstification débute par une dissolution naturelle des épontes de fractures de la roche, et se trouve généralement accentuée au voisinage de formations étanches contraignant les eaux du massif à se trouver un cheminement de décharge en direction de l'oued, dans le cas présent essentiellement ascendant. En l'occurrence, les marnes paléocènes et éocènes encadrant l'assise calcaire (Fig.IV.4) jouent sans doute ce rôle d'aquicludes favorisant la karstification. (ANBT.1999)

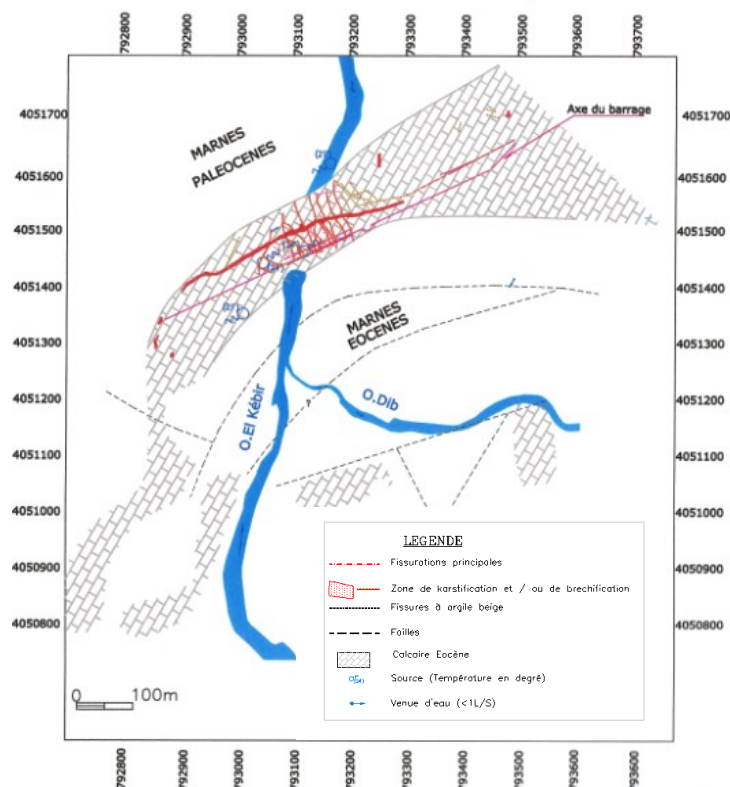


Figure IV.4: localisation des terrains présentant l'aquifère karstique (ANBT.1999)

La structure karstique rectiligne dans la fondation (apparemment sub-verticale) montre un parallélisme frappant non seulement avec la stratification, mais également avec les failles majeures supposées dans le secteur. Il est donc possible qu'on ait affaire non pas à un karst « stratigraphique » colmaté par des matériaux meubles, mais à un accident tectonique (faille), souligné par de la roche broyée et présentant des signes de karstification à ses épontes. (ANBT.1999)

Les forages de reconnaissance, de même que ceux des voiles d'injection divers, ont certes rencontré des vides, mais de manière dispersée dans le massif, et de volumes restreints (de quelque décimètre au plus). (ANBT.1999)

Sur l'appui gauche au-dessus de la cote +200m jusqu'aux cotes 400-500m. Les données de sondages montrent également la présence de petites cavités (de l'ordre de 10 à 30 cm) ouvertes ou remplies d'argile. Sur la base des sondages et des observations des affleurements, ce type de karstification se développerait surtout le long de diaclases pseudo verticales orientées nord-sud. On ne constate pas de karstification généralisée pouvant donner lieu à une circulation en grand à travers un réseau de cavités interconnectées. (ANBT.1999)

II.2.2 Relation fracture- alimentation et recharge d'aquifère :

La barre calcaire est affectée par un réseau complexe de discontinuités (Fig.IV.4) et de natures différentes : forte densité du maillage de diaclases, brèches, fractures et failles méridiennes, faille EW liée à un chevauchement

Ces discontinuités ont été exploitées par le processus de karstification qui répond ici à deux types de dynamique :

- Une karstification hypogène, profonde, qui se manifeste par le fonctionnement des sources thermo-minérales, alimentée par un bassin de réception qui peut être assez vaste vers l'Est le long du chevauchement (vallée de l'oued Dib).
- Une karstification de sub surface, dite gravifique corrélée aux stades successifs de creusement de la cluse par l'oued El Kébir, et alimentée de façon diffuse et gravitaire.

Cette alimentation plus locale s'effectue par les versants calcaires et ponctuellement par des pertes concentrées à chaque fois que des affleurements de calcaires fracturés sont recoupés par le réseau hydrographique. Ces phénomènes de pertes sont particulièrement actifs au niveau des contacts normaux et anormaux entre calcaires et marnes et déclenchent des évolutions très rapides en présence de gypse à l'affleurement ou en lentille prises dans les zones de faille. Ceci concerne notamment la faille EW à pendage vers le Nord, qui passe sous le barrage.

Cette double alimentation a un fonctionnement captif sous le cœur marneux du synclinal qui forme une gouttière EW, avec un seuil de débordement au Nord de la structure, vers le talweg naturel en aval de la cluse.

L'axe de drainage profond attire les infiltrations des volets synclinaux alimentés par les versants calcaires et par les pertes situées en amont dans le lit de l'oued.

Dans cette partie captive, les eaux de surface s'enfoncent en suivant le pendage et la fracturation méridienne vers la zone de sources, où elle résurgent mélangées aux venues profondes (ANBT.1999).

Donc l'aquifère karstique bénéficie de :

- Une alimentation profonde d'eaux chaudes drainant sans doute des terrains gypseux (ANBT.1999)
- Une alimentation de sub - surface alimentée par des pertes au niveau du lit de l'oued El Kébir et possiblement dans le bassin d'oued Dib.
- Une alimentation directe sur les affleurements des massifs calcaires.

II.2.3 Piézométrie de l'aquifère :

La cote de la nappe des calcaires varie de 105 à 120 m (Fig.IV.5), elle est liée au niveau de l'oued, on constate également que des variations de niveau de l'oued de 3 m à maximum 7.5m, induisent, dans certains forages réalisés dans la barre calcaire des variations de niveau de l'ordre de 3 à 4 mètres (ANBT.1999), ce qui peut être expliqué par un développement karstique.

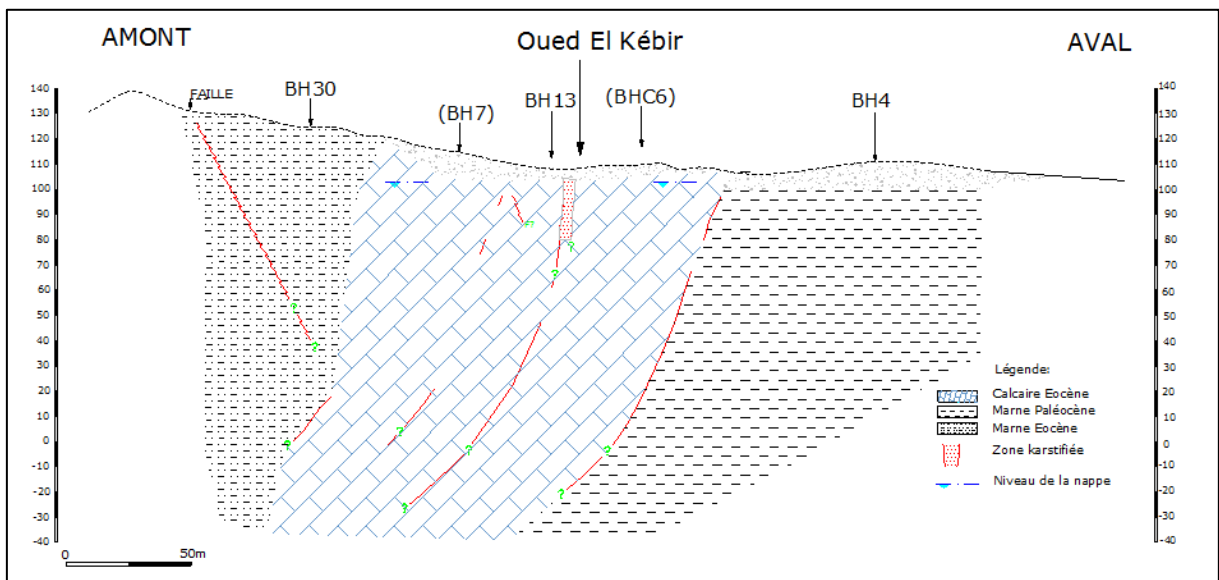


Figure IV.5 : Coupe hydrogéologique (rapport ANBT.1999). Modifié

Lors des crues de l'oued, le forage BH7, situé dans les calcaires non loin du contact avec les marnes amont (Fig.IV.6), a montré un caractère artésien (température 23°C et débit 6 l/s) qui pourrait être dû à un mélange entre la nappe des calcaires et une veine thermique plus profonde.

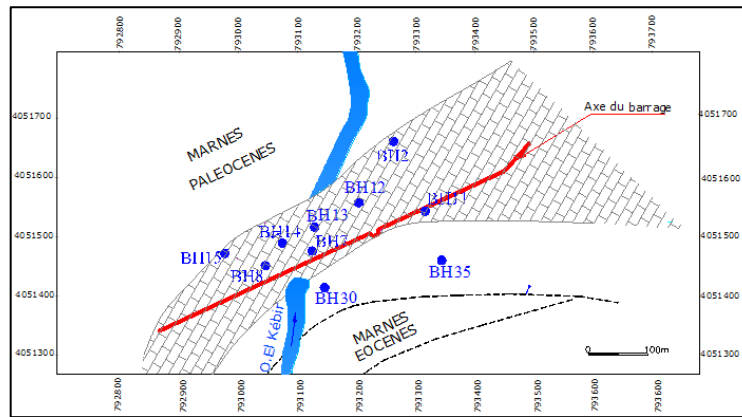


Figure IV.6 : Situation de certains forages réalisés (rapport ANBT.1999). Modifié

II.2.4 Gradient hydraulique :

Concernant les eaux souterraines elles-mêmes, et non plus seulement le milieu dans lequel elles circulent, il est relevé que la « nappe fissurale » dans les calcaires présentait, avant la construction du barrage, un gradient, certes relativement faible, mais logiquement dirigé vers l'oued Kébir. Cela signifie qu'avant modification des écoulements par suite de la construction du barrage, il n'existait pas de niveau de base hydrogéologique autre que l'oued, en d'autres termes qu'il n'y avait pas de pertes naturelles hors du bassin. (ANBT.1999)

II.3 Caractérisation de l'aquifère karstique après la construction du barrage :

II.3.1 Circulation d'eau dans l'aquifère :

La structure synclinale présente une terminaison occidentale raide, matérialisée par les affleurements calcaires de la rive gauche. Les circulations en écoulement gravitaire ont pu exploiter les discontinuités subméridiennes dans ces calcaires, pour contourner le cœur marneux du synclinal (Fig.IV.7). (ANBT.1999).

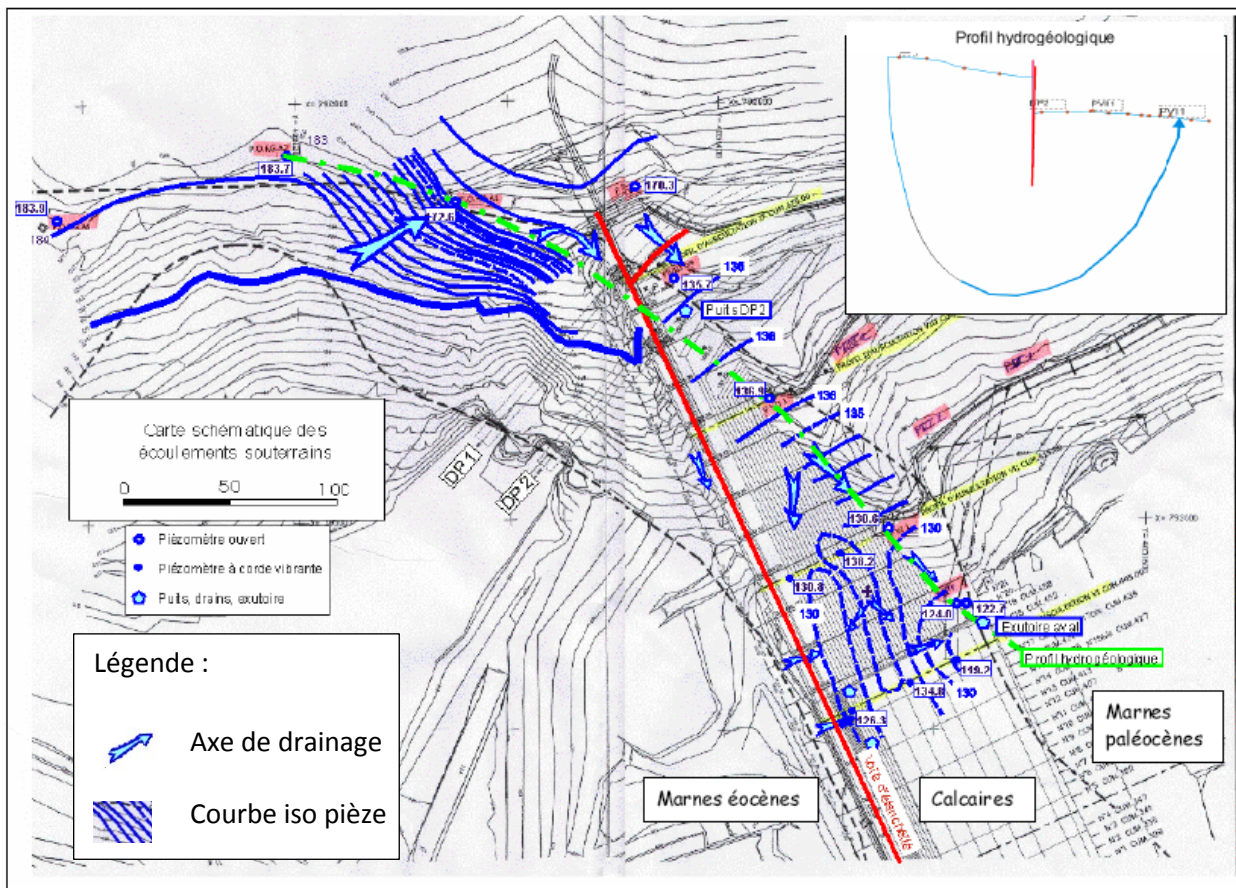


Figure IV.7 : Circulation des eaux souterraines dans la nappe calcaire (ANBT.1999)

Les circulations sont alimentées de façon concentrée sous les alluvions de rive gauche. Elles empruntent deux types d'axes de drainage :

- ✓ Le contact entre le mur des calcaires et les marnes noires du paléocène au NW.
- ✓ Le réseau de discontinuités de brèches et de fractures, qui dirigent conjointement les écoulements gravitaires en direction de la zone de sources du site du barrage (ANBT.2007).

La mise en place du barrage a provoqué le rehaussement du seuil de déversement de l'aquifère karstique de 105 m, altitude approximative du talweg, à plus de 200 m, altitude approximative des seuils écreteurs du barrage. (ANBT.2007)

Le gradient hydraulique a été porté à 60-70m et le seuil de déversement s'est vu déporté en rive gauche, sur le trajet naturel des circulations gravitaire qui contournent le cœur marneux du synclinal, et ce, en réutilisant des axes de drainage abandonnés au cours du creusement de la cluse. (ANBT.2007)

Le schéma d'écoulement dans les calcaires implique un long cheminement, confirmé par un retard d'au moins 50 jours, et en moyenne d'une centaine de jours, entre les cycles de températures de la retenue et ceux observés à l'aval en rive gauche.

L'adéquation entre les observations de débits du drainage actuel, et du temps de transit conduit à une valeur de la conductivité hydraulique du massif traversé de $0.8 \cdot 10^{-4} \text{ m/s}$ avec pour paramètres un cheminement de 800m donc 300m de profondeur et une porosité cinématique entre 3 et 10%.

Ces résultats ne traduisent pas des circulations rapides par conduits karstiques individualisés, mais un massif présentant une forte perméabilité par fissuration agrandie par corrosion/dissolution.

Le gradient est faible et la vitesse de circulation à l'intérieur du massif lente, le flux arrivant par le bas du barrage (ANBT.2007).

II.3.2 Mesures de perméabilité en forage :

Les essais de perméabilité type Lugeons ont été réalisés dans les forages au cours des 2 principales campagnes de reconnaissance (BH-Harza et BHC-Dragados).

Les perméabilités déterminées dans les calcaires (Fig.IV.8) et celles déterminées dans les marnes (Fig.IV.9) ont été reportées sur des diagrammes en fonction de leur cote ou de leur profondeur pour la campagne Harza, pour la campagne Dragados et pour l'ensemble des reconnaissances.

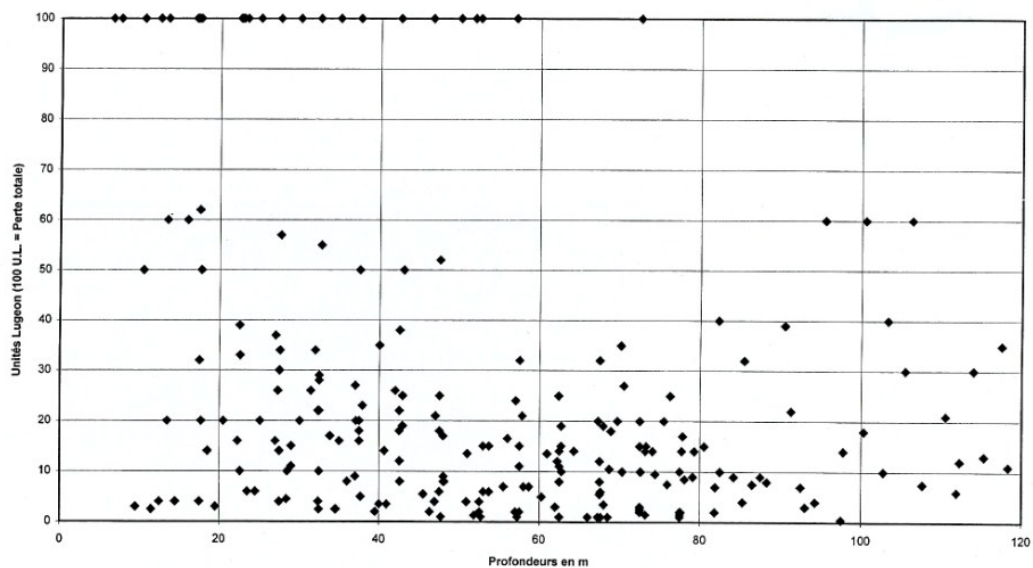


Figure IV.8 : Résultat d'essai de la perméabilité dans les calcaires (ANBT.1999)

Un nombre important d'essais n'ont pas pu être réalisés correctement, soit pour des raisons de contournement d'obturateur, soit à la suite de l'impossibilité de monter en pression. Dans les cas où les débits injectés étaient importants, nous avons interprété ces essais comme pertes totales (représentées par une perméabilité de 100 UL par convention sur les diagrammes). (ANBT.1999)

Les marnes principalement ont des perméabilités faibles <10 U.L et peuvent être considérées comme imperméables.

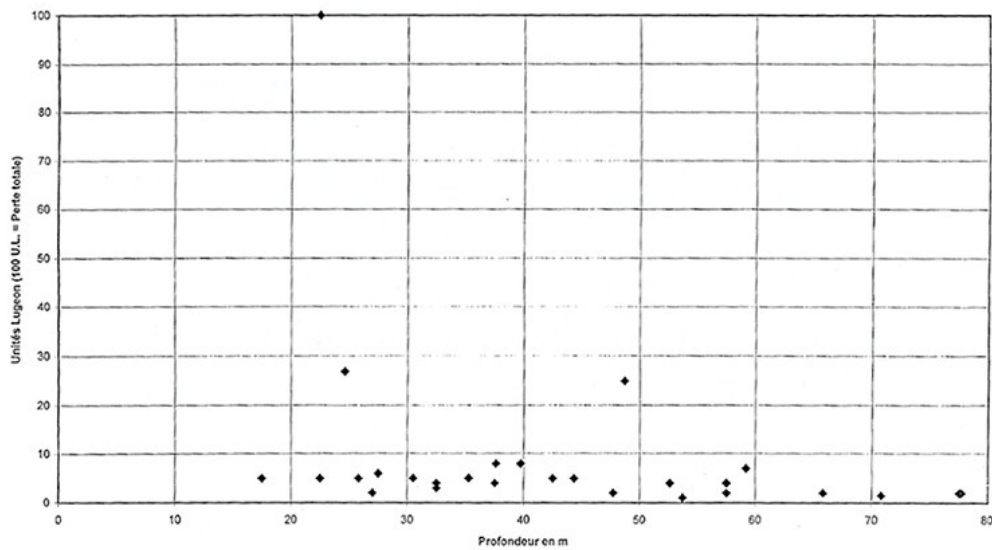


Figure IV.9 : Résultat d'essai de la perméabilité dans les marnes (ANBT.1999)

On constate une réduction relative des perméabilités en fonction de la profondeur, le plus grand nombre des absorptions supérieures à 30 U.L se situant entre la surface et 60 m de profondeur. Les zones karstifiées sont limitées en nombre et sont d'extension réduite sauf dans la partie supérieure de la rive gauche où plusieurs cavités importantes sont observées (ANBT.1999).

La perméabilité des calcaires est anisotrope. Elle est plus élevée parallèlement que transversalement aux couches, impliquant des circulations préférentielles parallèlement à la stratification. Il est probable que la « zone de karstification/ bréchification » du fond d'excavation constitue, au moins localement, une zone de circulation préférentielle (ANBT.1999).

III. Relation barrage-nappe :

Après la mise en eau du barrage, l'hydrogéologie du site de barrage a été influencée, le barrage est ému par les eaux souterraines, c'est l'indice d'une relation entre la nappe d'eau souterraine et le barrage:

III.1 Piézométrie de la nappe:

Les piézomètres installés dans le site du barrage (Fig.IV.10) montrent un contrôle piézométrique du lac de retenue sur l'aquifère calcaire de rive gauche, au droit du volet sud du synclinal.

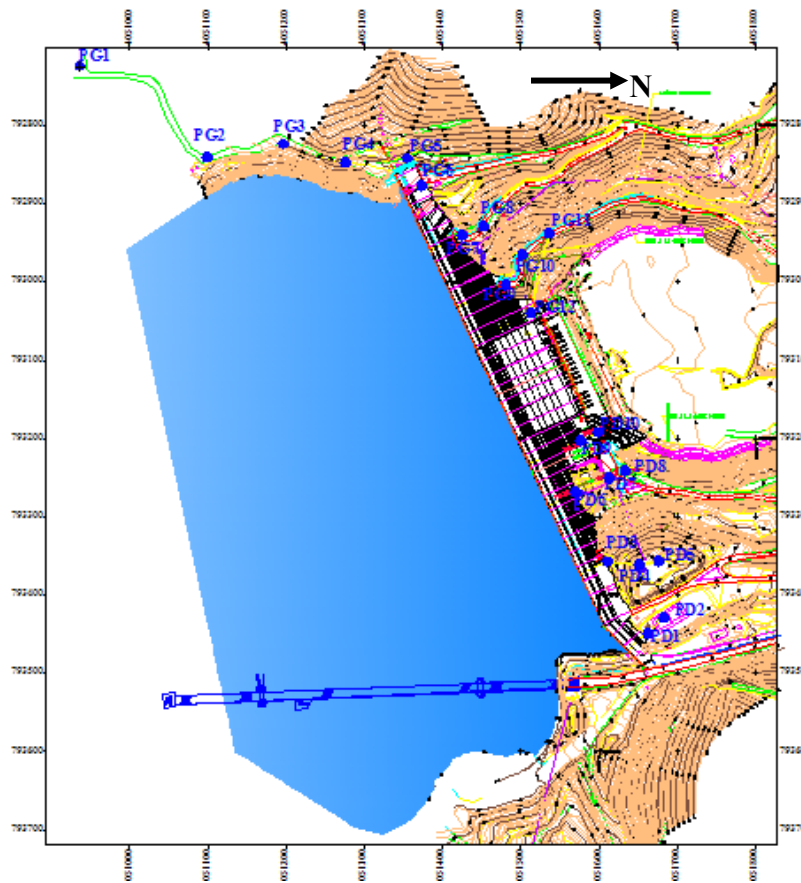


Figure IV.10 : situation des Piézomètres installées dans le site du barrage (Rapport ANBT.2007)

Rive droite		Rive gauche	
Piézomètre	Référence	Piézomètre	Référence
POL.1	PD1	PCV-37	PG6
POIII.1	PD5	POVI.1	PG9
POIV.2	PD9	POIX (226)	PG5
POL.2	PD2	PO.RG.A4.bis	PG1
POIII.2	PD6	POV.2	PG10
POII.1	PD3	PORG.A1	PG4
POIII.3	PD7	POVIII.1	PG7
POII.2	PD4	PORG.A2.bis	PG3
POIV.1	PD8	POVII.2	PG8
		PORG.A3.bis	PG2

Par ailleurs, ces piézomètres à l'état sec, présentent des niveaux inférieurs à l'altitude du plan d'eau du lac, traduisant entre 3 et 15 m de rabattement, Cela confirme :

- Un gradient hydraulique susceptible d'entretenir des circulations souterraines entre le lac et l'aval du barrage, qui s'exprime préférentiellement en rive gauche, et qui reste à vérifier en rive droite.
- Une forte hétérogénéité de l'aquifère des calcaires, cohérente avec une structuration karstique

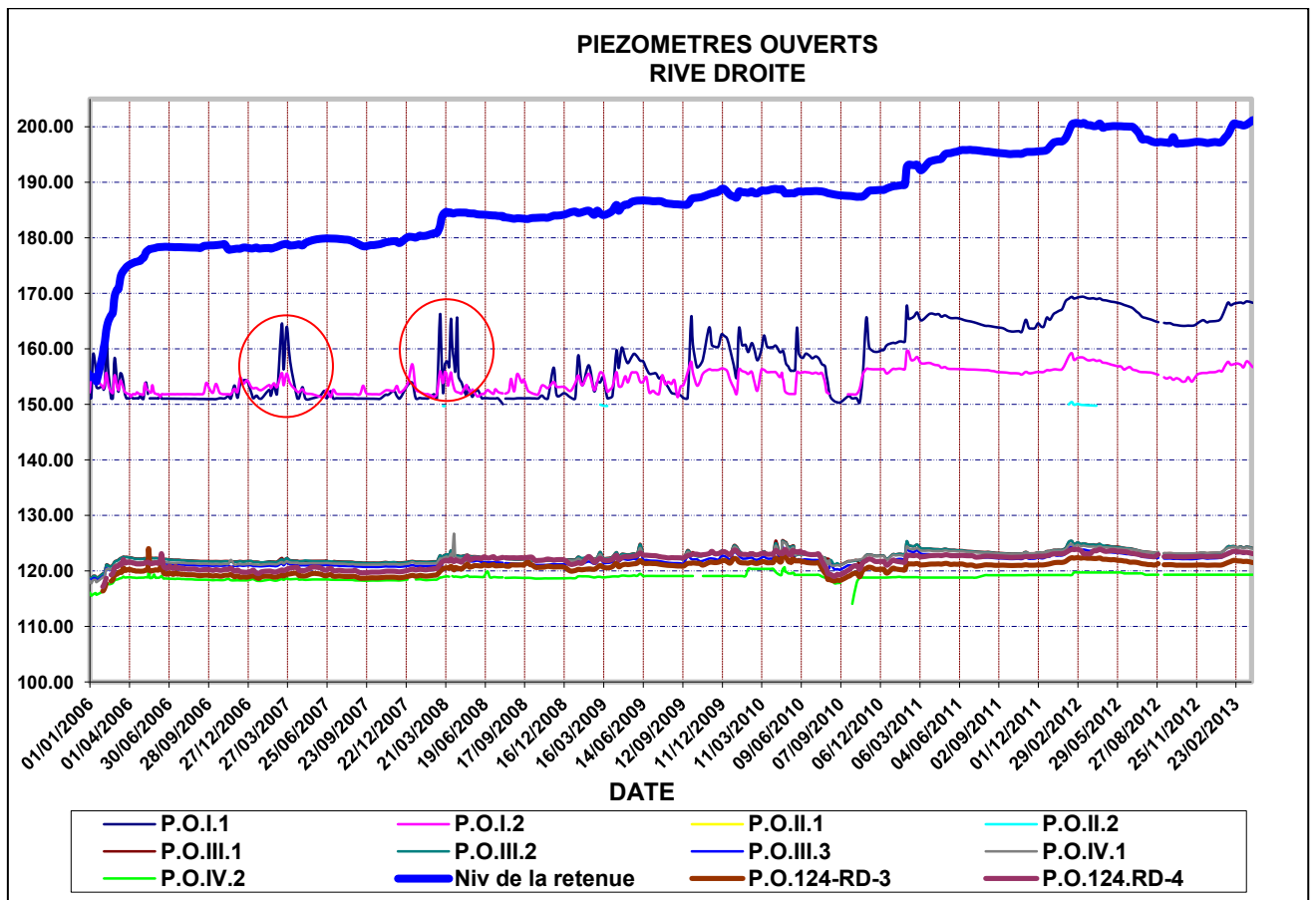


Figure IV.11 : Piézométrie de la nappe rive droite et le niveau d'eau de la retenue

Le graphe (Fig.IV.11) donne le niveau d'eau dans la nappe en rive droite du barrage durant la période 2006-2013, on remarque l'augmentation du plan d'eau du barrage d'environ 45m , alors que le niveau d'eau dans la plupart des piézomètres ne bouge pas sauf des petites perturbations au cours des saisons.

Au piézomètre POI1 et POI2 on observe une réponse différente, c'est-à-dire le niveau d'eau est plus haut que celui des autres piézomètres, et le niveau augmente au moment de crue, cela signifie une relation avec la pluviométrie et que l'infiltration est rapide dans des endroits limités.

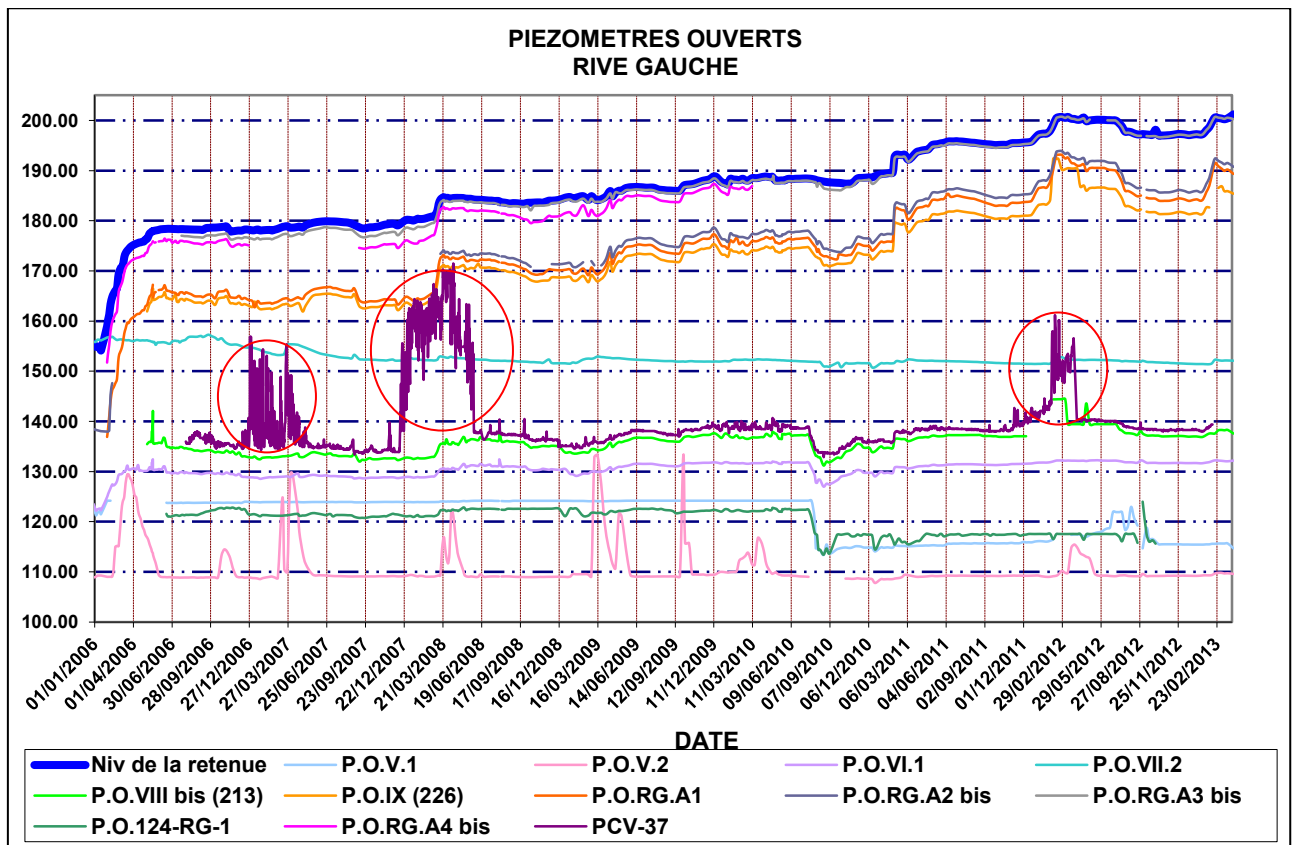


Fig. IV.12 : Piézométrie de la nappe rive gauche et le niveau d'eau de la retenue

La rive gauche présente une différenciation remarquable par rapport au rive droite, cette différence est situé au niveau des piézomètres P.O.RG.A3, P.O.RG.A4 où le niveau d'eau dans ces piézomètres évolue avec celui du plan d'eau du barrage, cela signifie l'existence d'une relation directe barrage -nappe.

En d'autre part dans le piézomètre PCV37 la perturbation du niveau d'eau montre des pics durant la période de crue surtout l'année 2007-2008 qui s'est distinguée par une pluviométrie intense d'ordre 134.3mm au mois de Décembre.

Après cette analyse on peut voir le contact barrage –nappe en rive gauche qui est confirmé par le degré de karstification et l'ensemble des fractures.

III.2 Gradient hydraulique :

Lors de la mise en eau, il semble que les gradients hydraulique au sein du massif rocheux se soient localement inversés (niveau d'eau dans le massif inférieur au niveau de la retenue) (Fig.IV.13)

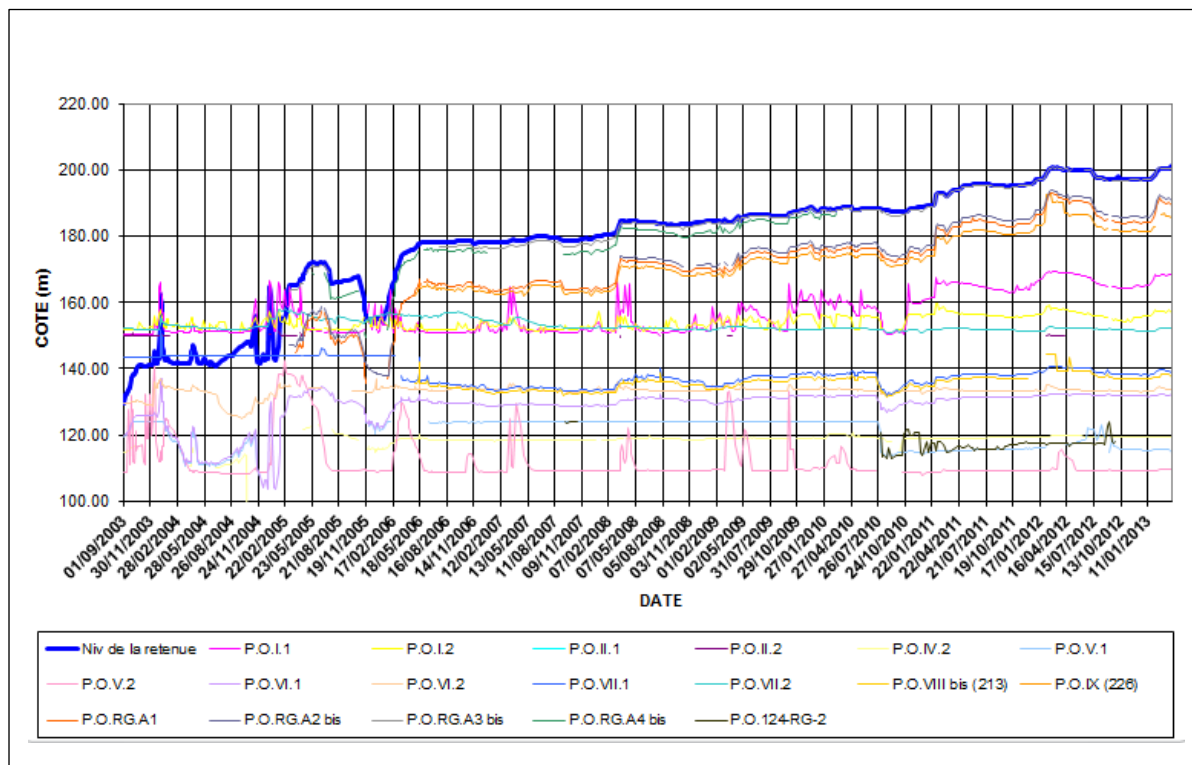


Figure IV.13 : Piézométrie de la nappe et le niveau d'eau de la retenue

Cela signifie que l'établissement d'un nouvel équilibre n'a pas été possible, en raison d'écoulements en direction des exutoires en aval du barrage et dans les drains de la fondation. Cette observation parle en faveur de la coexistence, parallèlement avec l'hypothèse du jeu des pressions, d'un transfert physique de l'eau de la retenue vers l'aval du barrage.

III.3 Infiltrations à travers la fondation du barrage :

L'agence nationale des barrages et de transferts utilise des méthodes fiables pour confirmer l'existence des zones d'infiltrations au niveau du barrage, parmi ces méthodes; la polarisation spontanée et le sonar latéral.

III.3.1 Le sonar latéral :

Le sonar latéral est un émetteur-récepteur d'ondes acoustiques qui présente l'avantage de visualiser les fonds sur une largeur importante. Le signal acoustique réfléchi par les fonds marins est restitué à bord du navire sur écran. Sont ainsi obtenues des informations sur la morphologie et la nature texturale du fond. Les résultats obtenus sont les suivants :

-Un alignement d'entonnoirs, parallèle à l'ancien cours de l'oued, a été repéré à la surface des sédiments fluviatiles. La proximité des affleurements calcaires du volet sud du synclinal en rive droite a pu laisser présumer une zone d'infiltration attribuée à des pertes karstique, et susceptible d'alimenter une circulation profonde passant sous le cœur marneux du pli.

Les infiltrations traversent ces marnes pour rejoindre l'aquifère karstique, ce type de percée pourrait éventuellement être induite par une fracture méridienne, mais ceci reste à démontrer il n'en reste pas moins que ces entonnoirs impliquent un possible soutirage de matériel.

-La même morphologie peut être modelée par soutirage et /ou expulsion par des points émissifs d'un système hydro-sédimentaire au sein des sédiments de remplissage du barrage. Ces phénomènes de soutirage /expulsion rappellent les circulations d'interface entre le remplissage sédimentaire de la retenue et le substratum calcaire, mises en évidence par les mesures de polarisation spontanée sur la rive W de la retenue.

Ce système hydro-sédimentaire implique une fuite en aval pour déclencher et entretenir le transit sédimentaire, une telle fuite peut être située au niveau des galeries de dérivation ou de trompette chinoise et de l'ouvrage au niveau de fractures ouvertes ou de conduits karstiques au contact entre les marnes et les calcaires en fond de retenue.

La circulation entre cet alignement d'entonnoirs et ces points de fuite emprunterait alors les points bas de l'interface entre le remplissage sédimentaire du barrage et les marnes du substratum.

Le drainage à cette interface est favorisé par la présence d'alluvions en place ou remaniées et/ou par la zone de foisonnement des terrassements et les modifications topographiques liées aux travaux.

En ce qui concerne la position et l'alignement de ces structures en entonnoir, on remarquera seulement qu'il est parallèle au cours de l'oued El kébir, lui-même parallèle à une fracturation méridienne importante dans les alentours. Il est donc tout à fait possible que le thalweg constituant les points bas de l'interface marnes/sédiments soit également orienté suivant cet alignement (ANBT.2007)

III.3.2 La polarisation spontanée :

La polarisation spontanée est une méthode géophysique qui consiste à mesurer les variations naturelles de potentiel électrique dans un environnement donnée s'agissant de la recherche de fuite. On sait que la circulation d'un fluide dans un milieu semi perméable engendre une différenciation ionique qui induit des petits courants électriques, et donc des différences de potentiel, cette méthode permet de repérer 4 zones principales d'infiltration présumée en rive gauche du lac :

-Dans l'angle NW du lac, sur le versant redressé du banc calcaire et près des entrées bouchées des galeries de dérivation et de la trompette chinoise, avec en outre une anomalie linéaire au contact entre les sédiments de colmatage de la retenue et le substratum calcaire

-Autour de la faille supposée qui coupe le banc calcaire au niveau de son rétrécissement et à proximité de son intersection avec la faille chevauchante méridienne supposée ; cette zone, localisée au niveau du renforcement du banc calcaire à l'ouest correspond à la limite ouest du cœur marneux éocène et à ce titre constitue une interface privilégiée d'infiltration

-Dans l'axe de la barre de calcaire Eocène correspond à la remontée au volet sud du synclinal et à un secteur faillé.

- Au niveau où s'amorce l'élargissement de la vallée en rive gauche, c'est-à-dire à un endroit où le surcreusement de l'ombilic fluviale exhume le toit des calcaires pour les recouvrir d'alluvions (ANBT.2007)

III.4 Les températures dans le lac de retenue :

Les mesures de températures ont permis de mettre en évidence des vitesses de circulation significatives dans les zones correspondant aux secteurs d'anomalies de polarisation spontanée. Ce bon degré de corrélation entre deux méthodes complètement indépendantes valide la réalité et la localisation de ces zones de circulation d'eau. Par ailleurs, la stratification thermique saisonnière permet d'établir les thermoclines des 16°C, 18°C et 20°C, séparant la couche superficielle chaude, épaisse de 18 à 20m, de la partie profonde de la retenue présentant des températures de 14°C à 16°C (Fig.IV.14)

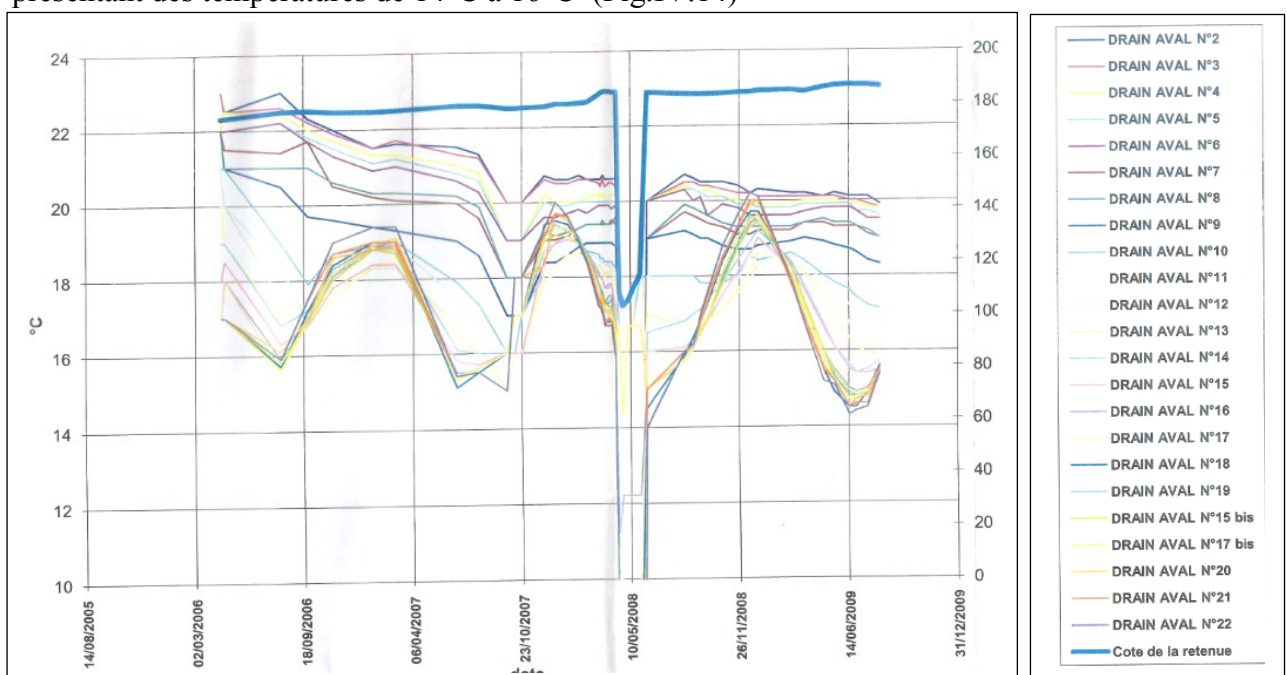


Figure.IV.14 : Température des drains en aval et de retenue 2004-2009 (ANBT. 2009)

III.5 Les températures des effluents des drains du barrage :

Ces mesures de températures (Fig.IV.15) montrent un très net gradient de température (15.4 à 22°C) croissant d'ouest en Est à la sortie des drains de galerie et de parement en pies de barrage. Cette différence thermique apparaît aussi entre les sources de rive gauche (16.3 à 16.38 °C) et les sources de rive droite (20.14°)

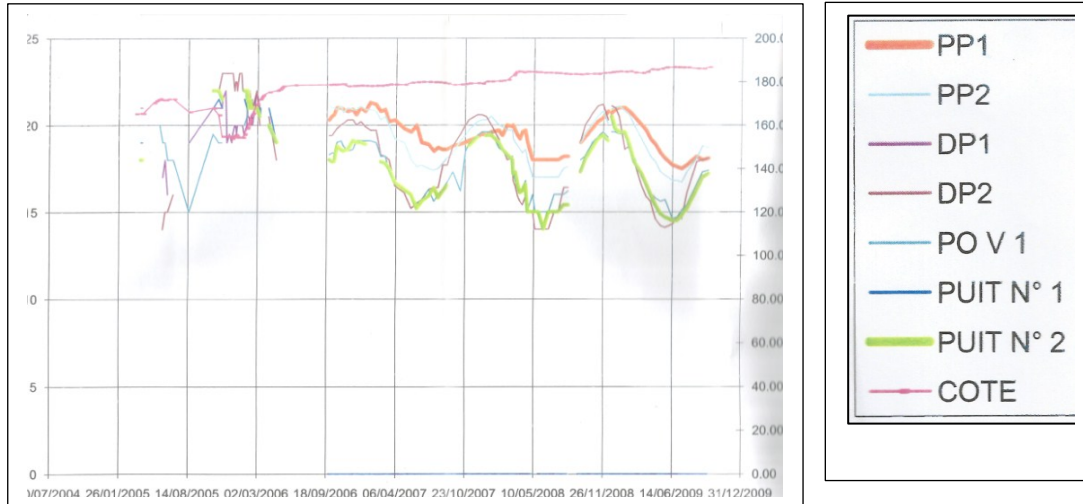


Figure IV.15 : Température des drains en aval et de retenue 2004-2009 (ANBT.2009)

-Les températures froides peuvent raisonnablement être attribuées à des fuites d'eau du fond de la retenue, sauf si la température moyenne du site est du même ordre.

-Les températures chaudes peuvent être en relation avec :

- Les températures hautes de la couche superficielle du lac
- Des anomalies thermiques en relation avec des sources thermo-minérales connues dans ce secteur ;

- La température moyenne liée à l'ensoleillement annuel de l'ouvrage et des versants.

Les températures froides proviennent bien de fuite d'eau de fond de retenue, la thermocline des 20°C permet d'éliminer les secteurs situés au-dessus d'elle comme zone d'infiltration significative, dans les conditions actuelles de remplissage de la retenue. Cela peut évoluer en cas de montée du niveau du lac et des variations du régime hydrologique : crue, crues successives, sécheresse.

Les zones d'infiltration d'eau froide (< à 16°C) se trouvent donc sur les contacts anormaux et les contacts calcaires/marnes, sous la thermocline des 20°C. Trois sites potentiels sont repérés :

-Les entonnoirs qui soutirent l'eau et les sédiments de remplissage du barrage sous l'action des circulations d'interface, initiées par des fuites en pied de barrage au niveau du contact marnes Eocène/calcaire, par des fuites résultant de problème d'étanchéité au niveau de certains ouvrages (trompette chinoise, galeries de dérivation) ou sous l'effet d'une combinaison des deux (ANBT.2007).

-Les zones d'infiltration suggérées par les mesures de température et de polarisation spontanée, mais situées sous la thermocline des 20°C.

-Les zones d'infiltration d'eau chaude (> 18°C) se trouvent sur les contacts anormaux et sur les discontinuités dans la direction du pendage (mur des calcaires, zones de brèche, joints de strates et fractures méridiennes susceptibles d'avoir été exploités par des conduits karstiques, puis ennoyés par la mise en eau du barrage) (ANBT.2007).

La carte schématique des circulations (Fig.IV.7) présente les circulations gravitaires affectant l'ensemble du banc calcaire, y compris le volet synclinal sud. Les pertes de contacts calcaires/marne concernent également le flanc interne de ce volet (remontée du synclinal)

III.6 Les exutoires :

Avant la construction du barrage, la région est caractérisée par la présence de résurgences minéralisées et thermales (Fig.IV.16). En aval et en amont de l'axe du barrage, on observe des points de suintement dans les marnes, on remarque également la présence de sources thermales sulfureuses à l'est, à l'ouest et en aval du barrage. Celles-ci peuvent être l'indice d'une décharge de nappe profonde liée à une zone de failles.

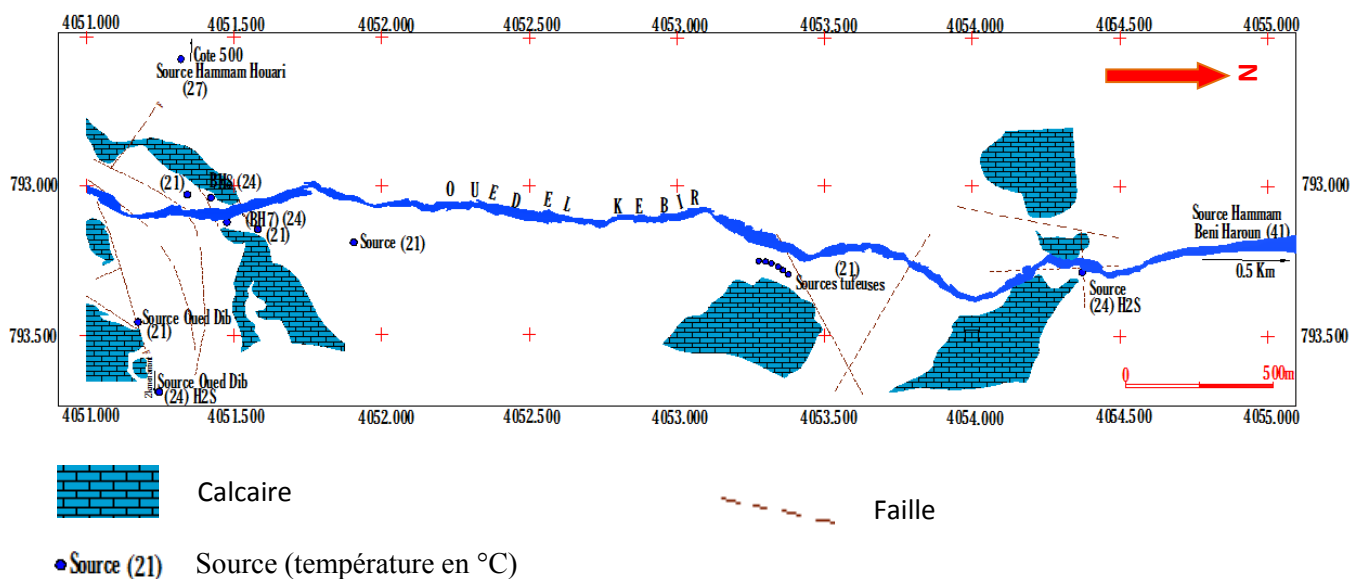


Figure IV.16: Carte schématique de situation des quelques sources existant dans la région du barrage avant la construction de l'ouvrage (Harza;1985), modifié

La température de ces sources et des venues d'eau est la même au cours des deux premières années après le début de la mise en eau de l'ouvrage de l'ordre de 20°C, nettement supérieure à la température des eaux de la retenue. Leur conductivité électrique élevée (minéralisation), tant en aval de la rive gauche que dans le système de drainage, attestent de la circulation profonde des eaux en début de vie de l'ouvrage.

Par la suite les eaux de la rive gauche sont devenues plus froides (approchant la température de la retenue) ; dans les drains en rive droite elles sont encore chaudes, mais la température y décroît également avec le temps.

La signature hydrochimique indique une même origine pour ces eaux, le transit étant différent : en profondeur avant et au début de la vie de l'ouvrage, principalement latéralement par la rive gauche actuellement. Il importe à ce titre, de prendre en compte à la fois la minéralisation des eaux et les variations de température des drains, qui reflètent avec 5 à 6 mois de retard les variations de température de la tranche superficielle des eaux de la retenue. Ce décalage dans le temps témoigne d'une perméabilité en grand tout de même limitée des calcaires, même si on doit admettre localement des porosités cinématiques élevées.

Après la mise en service du barrage et le niveau d'eau atteint, beaucoup de sources d'eau sont inondées, comme les sources existant au niveau d'oued Dib et les sources situées juste en aval de l'axe du barrage, (Fig.IV.17)

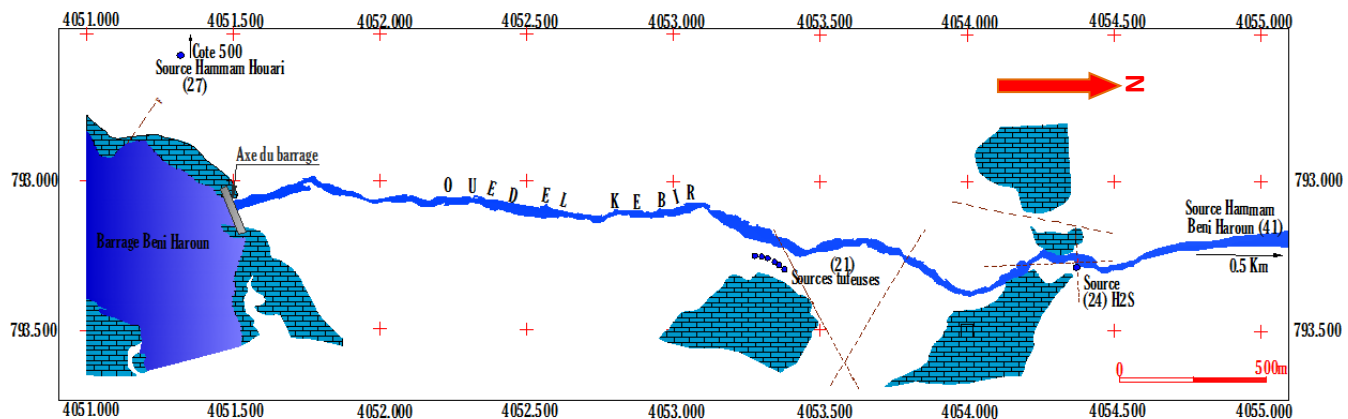


Figure IV.17: Carte schématique de situation des quelques sources existant dans la région du barrage après la construction de l'ouvrage (Harza;1985), modifié

IV. La nappe alluviale d'oued Enndja :

IV.1 Définition :

La plaine d'oued-Enndja est une dépression constituée essentiellement des formations du Mio-plio quaternaire, elle est entourée par la chaîne sud numidique (chaînon de zouagha) au nord, le massif montagneux de la nappe de Djamila au sud et la nappe peni-tellienne des fenêtres du Dj.boucherf et Dj.oukissene au sud-ouest.

IV.2 Caractéristique hydrodynamique de la nappe :

Les essais de débit par pompage, ont donné les résultats des paramètres hydrodynamiques concernant les forages AM6 et AM8 (Fig.IV.20) sont présentés dans le tableau suivant (Tab, IV.1) :

Tb : Transmissivité calculée à partir de la courbe descente.

Tr : Transmissivité calculée à partir de la courbe remontée.

Tableau N° IV.1: récapitulatifs des résultats des essais de pompage réalisés de la plaine :

Forage	Td (m ² /S)	Tr (m ² /s)	S(%)	K(m/s)
AM2	0.87*10 ⁻²	6.1*10 ⁻²	-	6.1*10 ⁻²
AM3	1.8*10 ⁻²	-	14.8%	-
AM6	1.1*10 ⁻²	1.6*10 ⁻²	-	1.6*10 ⁻³
AM7	3.5*10 ⁻²	4.57*10 ⁻²	-	3.1*10 ⁻²
AM8	0.9*10 ⁻²	1.56*10 ⁻²	-	2*10 ⁻³

La nappe alluviale présente une bonne perméabilité, elle est de l'ordre de 10⁻³ m/s. Pour le coefficient d'emmagasinement la valeur représentative dans notre aquifère est de 15%.

IV.3 Piézométrie de la nappe avant la construction du barrage :

La carte piézométrique de la nappe pendant la période des basses eaux Juin 1997 (Fig.IV.18). La cote piézométrique la plus élevée est de 215m en amont de la nappe, tandis que la plus faible est de 198m en aval, donc l'écoulement des eaux de la nappe en amont se fait vers l'oued par un grand axe de drainage de direction E-W, c'est-à-dire l'oued draine la nappe, en amont et même en aval où les courbes iso pièzes sont incurvées vers l'aval,

En général, le sens d'écoulement est de l'Ouest vers l'Est parallèle dans le sens d'écoulement de l'oued. Donc, la relation nappe-oued existe.

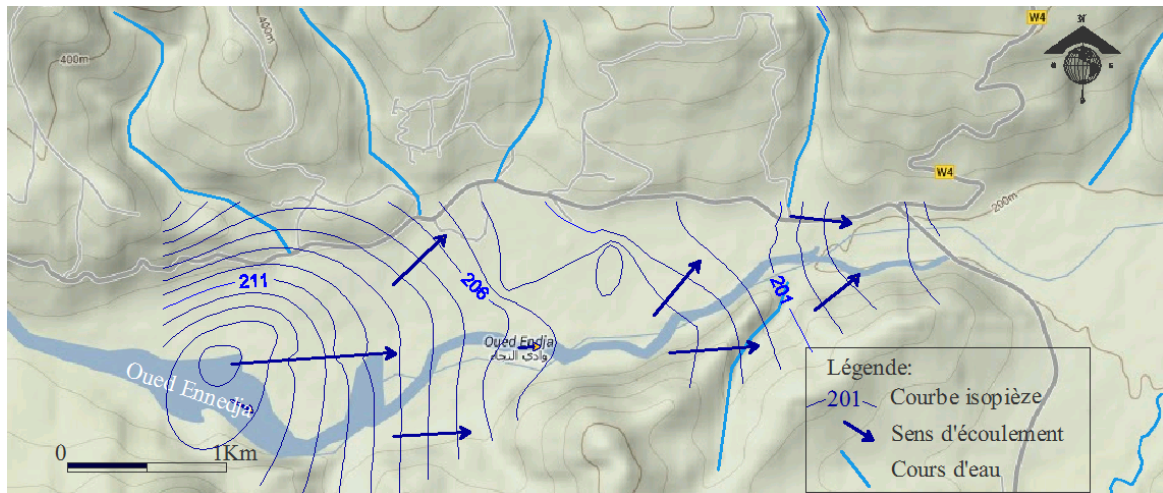


Figure IV.18 : carte piézométrique de la plaine d'Oued Endja Juin 1997

IV.4 Piézométrie de la nappe après la construction du barrage :

Après la construction du barrage, la piézométrie de la nappe est influencée par l'oued en amont et du barrage en aval. (Fig.IV.19)

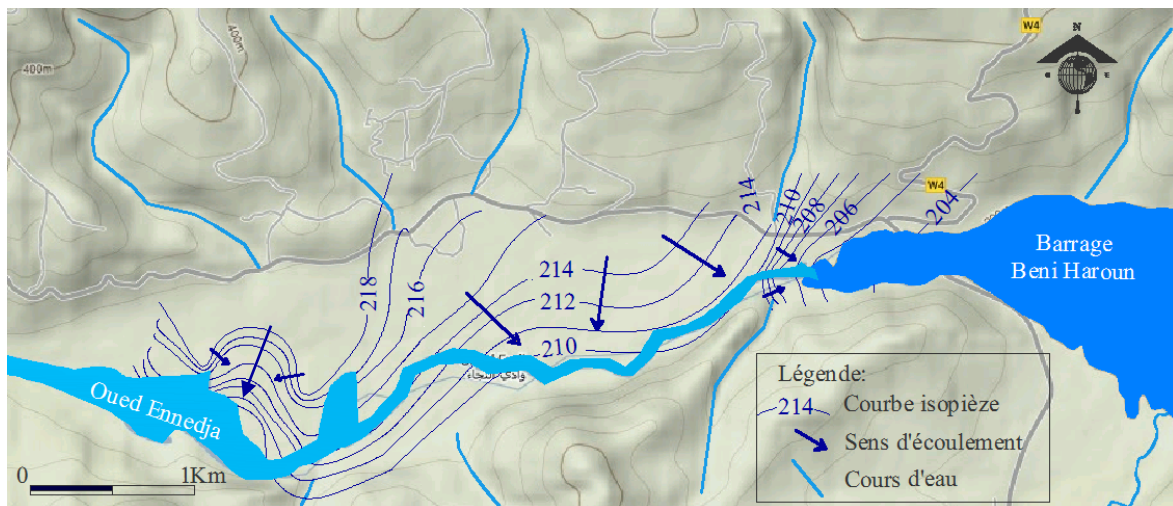


Figure IV.19 : carte piézométrique de la plaine d'Oued Enndja Mai 2013

Dans cette période des hautes eaux, Le sens des écoulements entre l'oued et la nappe est contrôlé par la différence entre la charge hydraulique de l'aquifère et la cote de la surface libre de l'oued, en amont les lignes de courants sont convergents vers l'oued, c'est-à-dire l'oued va drainer la nappe avec un gradient hydraulique variant de l'ordre de 2.98% à 2.0%.

En aval, l'influence du barrage est marquée par l'élévation du niveau d'eau dans la nappe qui provoque une surpression sur cette partie et cela se traduit par les lignes de courants qui deviennent plus serrées avec un gradient hydraulique d'ordre 0.37%.

En général, le sens d'écoulement est dirigé vers l'oued, et la cote la plus élevée est de 218m alors que la plus basse est de 204m. Donc l'invasissement du barrage sur la partie aval de la plaine d'oued Ennedja est la cause principale de l'augmentation du niveau d'eau dans la nappe qui atteint 4 à 5 m de hauteur d'eau pendant l'année 2005 jusqu'à 2013. Ainsi l'inondation des puits et forages au voisinage de cette partie de la nappe durant la période des hautes eaux et l'augmentation du niveau d'eau dans des puits secs durant la période des basses eaux.

IV.5 Coupe hydrogéologique :

La coupe hydrogéologique de la nappe (Fig.IV.20) de direction ENE-WSW est alignée le long d'oued Enndja.

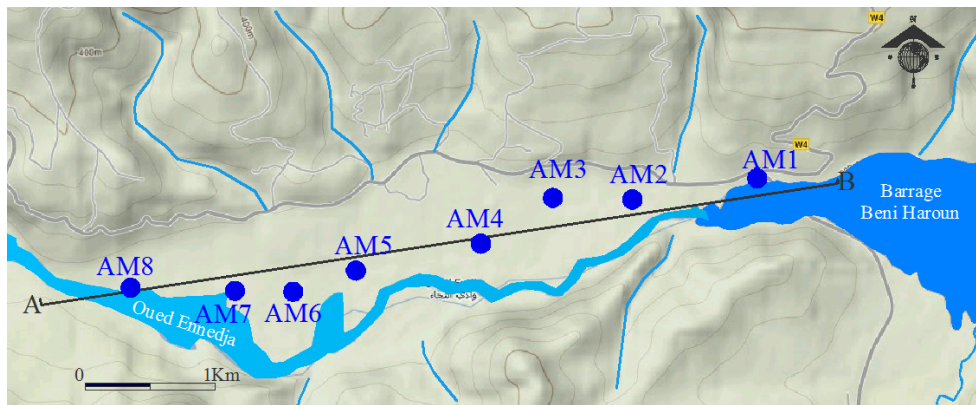


Figure IV.20 : Carte de positionnement des forages et coupe hydrogéologique

Cette coupe (Fig.IV.21) montre que la profondeur du substratum est de 14m, au niveau du forage AM1, et 15m au forage AM8, et la plus grande profondeur est observée au forage AM3 (29m), l'épaisseur de l'aquifère diminue sur les bordures, la corrélation entre les coupes géologiques des forages montre que c'est un aquifère hétérogène constitué essentiellement de graviers, galets, et sable. Cette coupe donne la variation de l'épaisseur totale de cet aquifère d'amont en aval.

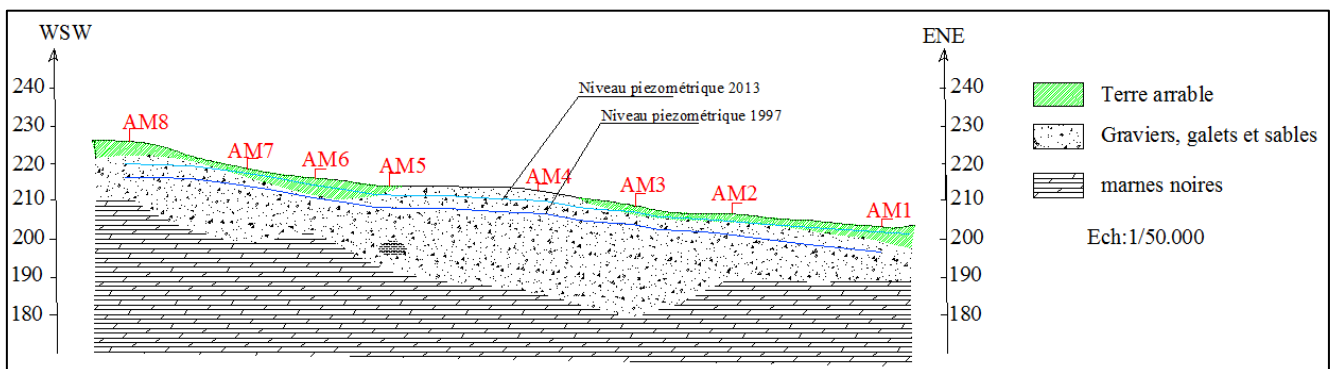


Figure IV.21 : Coupe hydrogéologique de la nappe alluviale d'oued Endja

A partir de cette coupe, on peut voir l'évolution piézométrique avant et après la mise en eau du barrage Beni Haroun. La pluviométrie a joué un rôle important, dans les dernières décennies, aussi l'invasion des eaux du barrage qui va inonder probablement toute la plaine dans les prochaines années avec l'augmentation rapide de niveau d'eau de la retenue.

Conclusion :

La zone d'étude est caractérisée par la présence de deux nappes, nappe karstique et nappe alluviale, la première est située au niveau de la fondation et des appuis du barrage et la deuxième se trouve au niveau de l'oued Enndja.

L'étude hydrogéologique de ces deux nappes permet de comprendre l'état actuel de ces réserves durant la mise en eau du barrage. L'aquifère karstique est caractérisé par une structure rectiligne qui dépend de processus de karstification avec deux types de dynamisme, l'un est hypogène et l'autre karstification de sub-surface, ce qui bénéficie d'une double alimentation profonde et de sub-surface.

La circulation d'eau est concentrée en rive gauche par deux axes de drainage : le contact entre le calcaire et le marne paléocène au NW et le réseau de discontinuité de brèche et fracture. La piézométrie de la nappe présente une différenciation au niveau de caractéristique hydrodynamique de l'aquifère ce qu'on a vu au niveau des deux rives du barrage. Le système karstique montre un développement bien marqué en rive gauche par rapport à la rive droite.

La relation entre le barrage et l'aquifère karstique est confirmée par la présence des zones d'infiltration et des anomalies thermiques.

La nappe alluviale d'oued Enndja est une nappe en relation avec l'oued durant les deux périodes hautes et basses eaux, c'est-à-dire la relation nappe-rivière est toujours existante.

Actuellement, la nappe est influencée par l'invasion du barrage Beni Haroun qui provoque une surpression et élévation du niveau d'eau souterraine.

CHAPITRE V

Hydrochimie

I. Introduction :

L'hydrochimie est utilisée comme outil de compréhension des circulations au niveau de l'aquifère. L'étude de la répartition dans l'espace et de l'évolution dans le temps des concentrations en ions majeurs vient compléter et préciser le schéma lithologique et celui des circulations. Dans l'aquifère, il s'établit un équilibre entre la composition chimique de l'eau et celle des roches. L'eau prend une minéralisation qui demeure stable dans le temps et sert à caractériser un faciès hydro chimique. Les ions majoritairement présents dans l'eau vont refléter la nature des roches rencontrées.

II. Différentes sources des ions de l'eau souterraine :

La solubilité d'une substance dans un solvant correspond à la quantité maximale que l'on peut en dissoudre dans un volume précis de ce solvant, à température et pression données, elle varie avec la nature du soluté et avec celle du solvant.

II.1 Les ions majeurs :

➤ Calcium (Ca^{2+}) et magnésium (Mg^{2+}) :

L'origine de ces ions est interne en relation avec le système. Ils proviennent de la dissolution des roches calcaires et dolomitiques. Le calcium peut provenir du gypse. Ils indiquent, principalement le temps de séjour de l'eau dans l'aquifère.

➤ Sodium (Na^+) et potassium (K^+) :

Ils sont d'origine externe, à partir des formations salifères du Trias ou des formations marneuses et argileuses. Na et K peuvent provenir de l'altération des minéraux silicatés. Alors que l'élément Cl peut avoir une origine météorique. Ces ions sont, généralement, très peu abondants dans les terrains carbonatés (Bakalowicz, 1979).

➤ Sulfates (SO_4^{2-}) :

Les eaux naturelles contiennent, pratiquement, toujours des ions sulfates dans des proportions très variables. Leur présence résulte de la légère solubilité des sulfates de calcium dans les roches gypseuses et de l'oxydation des sulfures se trouvant dans les roches. Cependant, ils peuvent aussi provenir de l'oxydation dans l'atmosphère, de l'anhydrite sulfureuse par combustion des hydrocarbures (Bakalowicz, 1979).

III. Analyses chimiques :

Les analyses chimiques ont concerné les eaux de la plaine d'oued Endja et les sources froides autour du la cuvette de barrage, ainsi que la source thermique de Hammam béni Haroun.

A partir d'échantillonnage effectués (Fig.V.1) en deux périodes différentes, en hautes eaux (mai-juin 2013) et en basses eaux (Octobre 2013), l'un des paramètres a fait l'objet de mesures in situ et les autres analyses au laboratoire de l'université de Constantine. Les résultats obtenus donnent la démarche de l'interprétation, (Tableaux d'analyses en annexe).

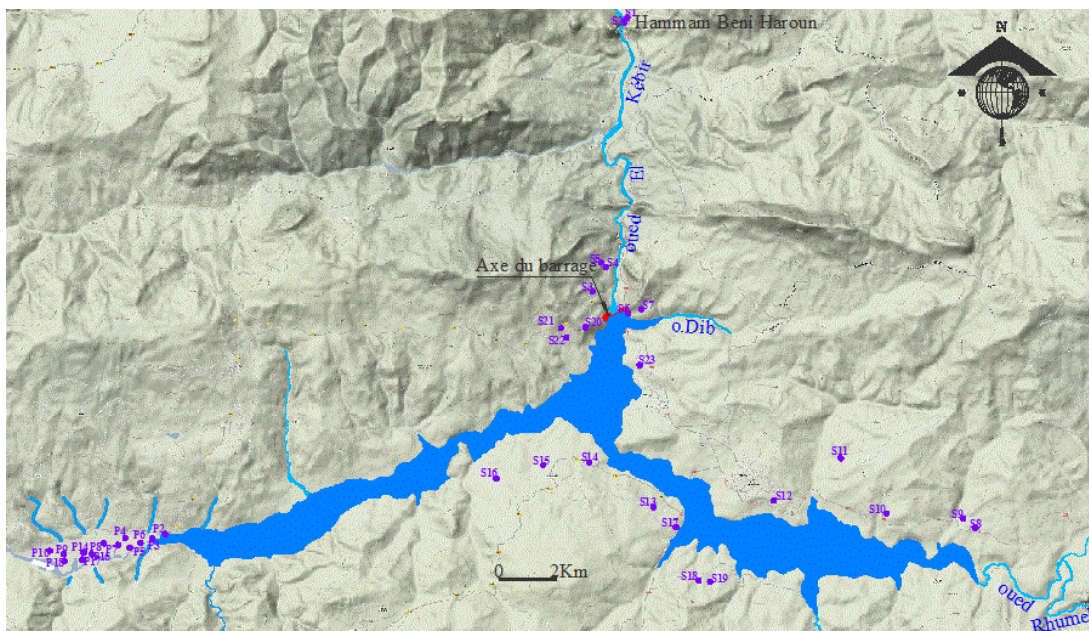


Figure V.1 : Situation des points d'eaux analysées

III.1 Paramètres physico-chimiques :

III.1.1 Paramètres physiques :

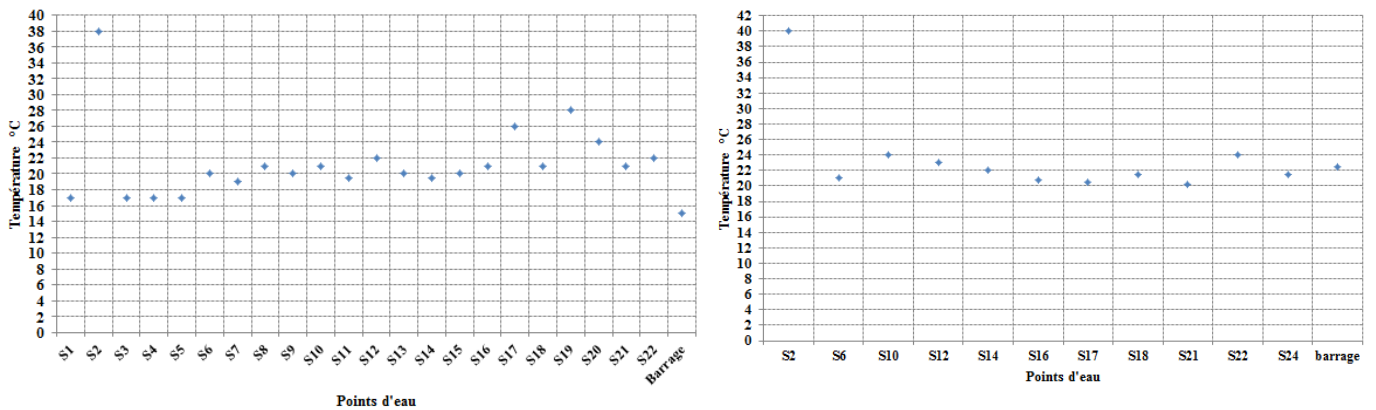
III.1.1.1 Température (°C) :

Pour la région d'étude, la température des eaux de la plaine d'oued Endja varie entre 17 °C et 22°C, ce qui confirme la nature phréatique de la nappe.

-Au niveau des eaux de sources (Fig.V.2) la température oscille entre 15 et 28 °C au mois de mai-juin et entre 19 et 24 °C au mois d'Octobre

-L'eau de barrage présente des valeurs de température de 15°C au mois de mai et 21°C au mois d'octobre.

-Au niveau de Hammam béni Haroun (S2), la température est d'ordre de 38°C au mois de mai, tandis qu'au mois d'octobre, elle va atteindre les 40°C.



a. Hautes eaux (Mai. 2013)

b. Basses eaux (Oct. 2013)

Figure.V.2 : Variations de la Température des eaux des sources

Les températures s'échelonnent entre 15°C et 40°C, suivant ce large éventail des températures, nous pouvons adopter selon P.Verdeil la classification ci-dessous :

Eaux hypothermales : concernant les sources dont la température des eaux à l'émergence est inférieure à la température extérieure moyenne interannuelle +4°C (pour notre région d'étude la température interannuelle est de l'ordre de 16.43°C). C'est la définition même des eaux thermales.

Eaux métriothermales : correspondent aux eaux dont la température est inférieure à 30°C mais supérieure à celle des eaux hypothermales.

Eaux mésothermales : regroupent les eaux dont la température se situe entre 30°C et 50°C.

Eaux hyperthermales : sont les eaux dont la température est supérieure à 50°C et inférieure à 100°C.

Cette classification montre que 63.63% des sources prélevées sont des eaux métriothermales, et 31.81% des sources présentent des eaux hypothermales. Alors que l'eau de Hammam Beni Haroun est une eau mésothermale.

III.1.1.2 Potentiel hydrogène pH : Par définition, c'est une mesure de l'activité des ions H contenues dans une eau. Ce qui traduit la balance entre acide et base, le pH de neutralité étant 7. Le pH conditionne un grand nombre d'équilibres physico-chimiques, et dépend de facteurs multiples dont la température et l'origine de l'eau.

Le pH varie de 7.10 pour la source S12 à 7.9 pour la source S19 au mois de mai et de 6.95 pour S12 à 7.93 pour S19 au mois d'Octobre au niveau des eaux de source. Les eaux de la plaine d'oued Endja présentent des valeurs de 6.9 à 7.8. Les valeurs du pH d'eau de barrage au mois de mai est de 7.89 alors qu'au mois d'Octobre elle est de 7.62.

Donc le pH des eaux sont légèrement basique durant la période des hautes eaux, alors que durant les basses eaux, les valeurs du pH oscillent autour de la neutralité.

III.1.1.3 Conductivité électrique: La conductivité présente la plupart des matières dissoutes dans l'eau sous forme d'ions chargés électriquement, et permet donc d'apprécier la quantité de sels dissous dans l'eau.

-Au niveau de la plaine d'oued Endja, la conductivité de l'eau varie de 1358.9 à 1850 $\mu\text{s/cm}$, ce qui caractérise des eaux chargées.

-l'évolution temporelle (mai 2013-Octobre 2013) de la conductivité au niveau de sources est marquée par une variation des teneurs de 420 à 2330 $\mu\text{s/cm}$ durant la première période, et de 730 à 2660 $\mu\text{s/cm}$ durant la deuxième période, la diminution pendant la période des hautes eaux est expliquée par un apport des eaux pluviales.

Alors que l'eau de hammam béni Haroun a une conductivité d'ordre de 5500 $\mu\text{s/cm}$ durant les deux périodes.

La conductivité d'eau de barrage est de l'ordre de 1100 $\mu\text{s/cm}$ durant la période de hautes eaux et de 1730 $\mu\text{s/cm}$ durant la période de basses eaux.

La diminution pendant la période des hautes eaux est expliquée par un apport d'eau pluviale.

La conductivité permet de regrouper les sources minérales et thermales algériennes en quatre classes (A.Issaadi.1992) :

Classe 1 : les conductivités inférieure à 2000 micromhos/cm.

Classe 2 : les conductivités sont comprises entre 2000 et 7500 micromhos/cm.

Classe 3 : les conductivités sont comprises entre 7500 et 15000 micromho/cm.

Classe 4 : les conductivités sont supérieures à 15000micromho/cm.

La région d'étude se range dans les classes 1 et 2. La classe 1 regroupe des eaux que l'on peut qualifier de faiblement minéralisées.

La classe 2 est présentée par les sources de Hammam Beni Haroun(S2), S8.S9.S14.

III.1.2 Paramètres chimiques :

III.1.2.1 Minéralisations : C'est la somme des principaux cations et anions analysés, le résultat montre que la minéralisation élevée des eaux des sources varée de 2481.94 mg/l durant la période des hautes eaux à des valeurs faibles de l'ordre de 312.38 mg/l, alors que durant la période des basses eaux la minéralisation s'échelonne entre 626.56 mg/l et 1303.59 mg/l.

A Hammam Béni Haroun, la source thermale présente une minéralisation presque similaire durant les deux périodes d'échantillonnages 1135.01 mg/l et 1159.68 mg/l. L'eau de barrage donne une minéralisation de 639.74 mg/l.

La plaine d'oued Endja présente une minéralisation maximum de 1168.36 mg/l, pour P11 et une minéralisation minimale de 723.6 mg/l pour P13.

III.1.2.2 Alcalinité ou basicité :

Titre alcalimétrique (T.A) : Il représente la teneur en hydrates alcalins NaOH et KOH, en carbonates alcalins et les alcalinaux terreux (Ca, Mg), il se mesure en présence de la phénophtaline. Généralement les eaux naturelles ont un T.A=0.

Titre alcalimétrique complet (T.A.C) :

Le T.A.C donne la teneur en CO_3^{2-} , HCO_3^- , alcalino-terreux (Ca, Mg), alcalins (Na,K), OH^- due aux NaOH et KOH.

Il traduit le caractère basique de l'eau, est exprimé en mé/l ou F°

$$\text{T.A.C mé/l} = r \text{CO}_3^{2-} + r\text{HCO}_3^- + r \text{OH}^-$$

$$\text{T.A.C. F}^\circ = \text{T.A.C. (mé/l)} \times 5$$

Les eaux de source présentent des valeurs entre 48.8 °F à S5 et 21 °F pour S16. Alors que la source de hammam donne 18.9°F, et l'eau de barrage 13.8°F.

III.1.2.3 Dureté totale (DHT) : Elle indique la teneur totale en sels de Ca^{2+} , Mg^{2+} et accessoirement d'autres éléments tel que : Al_3 , Sr^+ , Mn^{2+} .

$$\text{La DHT est exprimée en mé/l ou }^\circ\text{F.} \quad \Delta\text{HT}_{\text{mé/l}} = r \text{Ca}^{2+} + r \text{Mg}^{2+}$$

$$\Delta\text{HT}_{\text{F}^\circ} = (r \text{Ca}^{2+} + r \text{Mg}^{2+}) \times 5$$

Les eaux du secteur d'étude présentent une dureté variant entre 21.6°F pour S1 et 167 F° pour S14. Au niveau de hammam Beni Haroun la dureté diminue de 62.8°F durant la période des hautes eaux à 11.8°F durant la période des basses eaux. L'eau de barrage est aussi variable, elle présente des valeurs de la dureté de 37°F et 11.92°F.

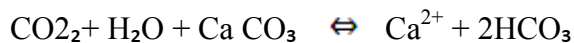
La plaine d'oued Endja donne des valeurs de la dureté variant entre 40°F et 88°F.

Selon l'OMS, les eaux sont classées entre dures et très dures pour les eaux de sources et les eaux de la plaine d'oued Endja, alors que l'eau de barrage et l'eau de hammam Beni Haroun sont classée très dures puis elles deviennent douces durant la période des basses eaux.

III.1.2.4 Les ions chimiques : (Tableau N°V.1 et V.2)

III.1.2.4.1 Les Cations :

Calcium Ca^{2+} : Les roches carbonatées et les roches gypseuses sont à l'origine de Ca^{2+} . Les roches carbonatées libèrent le calcium par l'attaque de gaz carbonique (CO_2) :



Et par dissolution dans le cas des roches gypseuses. Les teneurs en calcium oscillent entre 45.69 mg/l (S1) et 411.22mg/l pour S14 durant la période des hautes eaux, et durant la période des basses eaux, la teneur du calcium varie de 186.77 mg/l (S14) et de 68.14 mg/l pour S6.

La teneur en calcium de la source de hammam béni Haroun, diminue légèrement durant les deux périodes de 184.37mg/l à 180.35 mg/l.

La plaine d'oued Endja donne des teneurs comprises entre 200.4mg/l au niveau de P2 au Nord-Est de la plaine et 96.19mg/l au niveau de P13 au centre de la plaine.

L'eau de barrage présente une valeur de calcium de 82.56mg/l dans la période des hautes eaux, et des valeurs de 149.90 mg/l durant la période des basses eaux.

Magnésium Mg^{2+} : L'ion Mg^{2+} présente deux origines principales :

La dissolution des formations dolomitiques en présence de l'acide carbonique, la dissolution de Mg SO_4 dans les terrains gypseux.

La concentration maximale est de l'ordre de 154.07 mg/l au niveau du S14 alors que la concentration minimale est de 3.14 mg/l pour S16.

Alors que les eaux de Hammam Beni Haroun et les eaux de barrage ont une concentration similaire de 40 mg/l durant la période des hautes eaux, et durant la période des basses eaux, on observe une augmentation pour les eaux du barrage (53.10mg/l), et une diminution pour les eaux du Hammam (33.35mg/l).

Dans la plaine d'oued Endja la concentration maximale en Mg^{2+} est de 97.8mg/l, tandis que la concentration minimale est de 5.16mg/l.

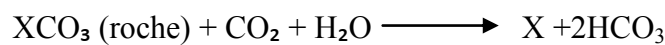
Sodium et le potassium Na^+ et K^+ : Le sodium est toujours existe dans les eaux naturelles en proportions variables, et le potassium est moins abondant dans les eaux naturelles, il ne dépasse pas généralement 10mg/l.

La valeur maximale du sodium est observée au niveau de la source S10 durant les deux périodes hautes eaux et basses eaux par 132.09 mg/l et 156.52 mg/l respectivement, alors que la valeur minimale est présentée par la source S1 avec 0.19mg/l. Alors que la plaine d'oued Endja présente une valeur du sodium de 164.91 mg/l au niveau du puits P18.

La concentration du sodium des eaux du barrage est de l'ordre de 54.86mg/l durant la période des hautes eaux, alors que durant la période des basses eaux, elle augmente pour atteindre 92.62mg/l.

III.1.2.4.2 Les anions :

Bicarbonates HCO_3^- : Les carbonates sont le résultat de l'équilibre physico-chimique entre la roche, l'eau et le gaz carbonique selon l'équation générale :



Ils proviennent essentiellement de la dissolution des roches carbonatées. La concentration des HCO_3 est de 595.36 mg/l pour S5 qui présente la valeur la plus élevée durant la période des hautes eaux avec une valeur minimale de l'ordre de 190.32 mg/l au niveau de S1. Pour la période des basses eaux, la source S12 donne la valeur maximale (448.96 mg/l), et la source S6 qui donne la valeur minimale (113.46 mg/l).

Au niveau barrage la concentration des HCO_3 est faible (168.36 mg/l) durant la période des hautes eaux par rapport à la période des basses eaux (292.8 mg/l).

Dans la plaine d'oued Endja, l'eau présente une concentration en HCO_3 comprise entre 214.72 et 350.14mg/l.

Sulfates SO_4 :

La concentration des sulfates dans l'eau durant la période des hautes eaux est de l'ordre de 34 mg/l pour la source S1 qui présente la valeur la plus faible, alors que la valeur la plus élevée est de 1230 mg/l pour la source S14. La concentration la plus faible durant la période des basses eaux est de 102 mg/l à S20, et la source S19 donne la valeur la plus forte par 214 mg/l.

L'eau du barrage donne une concentration de l'ordre de 174 mg/l pour la première période, puis la concentration des sulfates va augmenter durant la deuxième période (262 mg/l).

La plaine d'oued Endja est caractérisé par des concentrations comprises entre 180 et 400 mg/l.

Chlorures Cl^- : Ils proviennent de la dissolution des sels naturels, les chlorures peuvent exister aussi dans l'eau à partir des engrais chimiques et des rejets industriels.

La concentration est faible de l'ordre de 3.55 mg/l pour la source S20, alors que la concentration la plus forte existe au niveau de la source S17 (248.5 mg/l) durant la période

des hautes eaux. Durant la période des basses eaux la source S20 présente des valeurs de 31.95mg/l jusqu'à 308.85mg/l à S8.

A Hammam Beni Haroun les chlorures présentent une concentration élevée de l'ordre de 298.2mg/l durant les hautes eaux, alors que durant les basses eaux elle est de 337.25mg/l.

Dans la plaine d'oued Enndja, la concentration en chlorure est comprise entre 113.6 et 224.95 mg/l.

Tableau N°V.1 : Tableau des analyses des sources et l'eau du Barrage 2013

	T	COND	pH	HCO3	CL	SO4	Ca	Mg	Na	minéralisation
	°C	µs/cm		mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
S1	17	420	7.8	190.32	17.75	34	45.69	24.43	0.19	312.38
S2	38	5500	7.24	230.58	298.2	264	184.37	40.10	117.76	1135.01
S3	17	740	7.74	306.22	31.95	50	64.93	37.84	12.92	503.86
S4	17	1180	7.55	485.56	56.8	130	123.45	60.33	24.57	880.71
S5	17	1390	7.16	595.36	92.3	130	113.03	62.26	97.25	1090.20
S6	20	1030	7.36	478.24	49.7	62	106.61	51.23	21.43	769.21
S7	19	1440	7.4	342.82	31.95	388	211.62	47.27	1.92	1023.58
S8	21	2330	7.5	459.94	230.75	172	113.03	136.18	14.17	1126.07
S9	20	2090	7.5	569.74	220.1	178	113.03	139.54	45.09	1265.50
S10	21	1250	7.6	491.66	127.8	156	83.37	59.90	132.09	1050.82
S11	19.5	660	7.45	325.74	10.65	68	94.59	17.17	20.56	536.70
S12	22	1220	7.1	351.36	99.4	160	152.30	28.62	43.39	835.07
S13	20	1190	7.2	315.98	106.5	160	144.29	24.31	52.13	803.20
S14	19.5	3240	7.3	366	220.1	1230	411.22	154.07	100.55	2481.94
S15	20	1380	7.3	307.44	134.9	236	190.78	10.81	76.05	955.98
S16	21	1430	7.4	256.2	159.75	182	185.17	3.14	68.17	854.42
S17	26	1700	7.8	362.34	248.5	164	121.04	55.06	131.32	1082.26
S18	21	1320	7.5	439.2	124.25	141	113.03	70.90	47.64	936.02
S19	28	1690	7.9	456.28	213	200	92.99	105.01	97.47	1164.75
S20	24	670	7.5	390.4	3.55	79	112.22	17.63	24.44	627.24
S21	21	900	7.3	464.82	17.75	79	117.84	24.34	42.38	746.12
S22	22	940	7.3	467.26	35.5	92	113.03	40.18	36.17	784.14
S23	22	1.64	7.5	329.4	198.8	330	176.35	55.47	101.68	1191.70
S24	22	1.09	7.4	298.9	88.75	122	135.47	29.12	16.94	691.17
Barrage	15	1100	7.89	168.36	120.7	174	82.56	39.26	54.86	639.74

Tableau N° V.2 : Tableau des analyses de l'eau de la plaine d'oued Enedja2013

	Ca	Mg	Na	Cl	SO4	HCO3	Cond	T	pH	minéralisation
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	µs/cm	°C		mg/l
PN 2	200.4	58.8	30.59	163.3	310	317.2	1720	20	7.1	1080.29
PN 3	189.17	97.8	52.21	166.85	261	307.44	1647.03	19	7.2	1074.47
PN 4	188.37	55.08	22.54	156.5	268	305	1576.19	21	7.2	995.49
PN 5	155.5	31.56	22.31	145.55	180	214.72	1358.9	17	7.3	749.64
PN 6	169.93	50.76	32.43	142	236	318.42	1544.73	19	7.2	949.54
PN 7	149.89	54.6	41.17	134.9	232	317.2	1485.32	18	7.2	929.76
PN 8	141.08	57	123.05	166.85	400	251.32	1600.38	18	7.8	1139.3
PN 9	161.12	51.72	87.12	166.85	290	330.62	1589.92	18	7.1	1087.43
PN 10	149.09	46.92	80.96	181.05	224	312.32	1590	20	7.2	994.34
PN 11	181.96	58.44	84.87	224.95	268	350.14	1850	20	6.9	1168.36
PN 12	160.32	52.68	85.33	227.2	230	300.12	1730	20	7.2	1055.65
PN 13	96.19	38.4	63.71	113.6	186	225.7	1025.06	22	7.4	723.6
PN14	115.43	37.8	96.83	156.2	206	270.84	1421.97	19	7.2	883.1
PN 15	133.86	37.8	85.56	159.75	216	278.16	1391.28	19	7.2	911.13
PN 16	135.47	36.36	72.45	149.1	212	264.74	1410	20	7.2	870.12
PN 17	136.27	20.52	109.02	149.91	224	268.4	1442.43	19	7.1	908.12
PN 18	157.9	5.16	164.91	195.25	230	317.2	1690.6	17	7.5	1070.42
Eau du barrage	90.58	36.96	65.78	120.7	176	207.4	1005.8	17	8	697.42

IV. Classification géochimique des eaux :

Afin de faire une classification des eaux analysées on a procédé à une représentation graphique des résultats obtenus :

- le diagramme de piper
- le diagramme de Schoeller-Berkaloff.
- le diagramme de Stabler

IV.1 Diagramme de piper :

Le diagramme Piper permet de visualiser l'évolution géochimique spatiale, c'est à dire un prélèvement de plusieurs échantillons d'eau d'un même aquifère ou temporelle plusieurs prélèvements d'eau d'un aquifère en différentes saisons climatiques.

Nous avons déterminé des familles d'eau pour des secteurs classés :

IV.1.1 En aval du Barrage :

La distribution des échantillons d'eau (Fig.V.3), donne deux familles d'eau, les plus fréquents sont les eaux bicarbonatées calciques et magnésiennes.

Alors que la deuxième famille caractérise les sources S2 (Hammam Béni Haroun) et S7, elles donnent des eaux Chlorurées ou sulfatées calciques et magnésiennes.

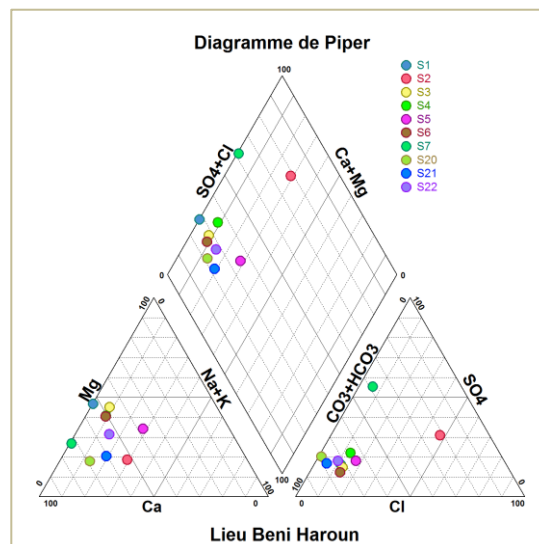


Figure V.3 : Diagramme de Piper en aval du barrage

IV.1.2 En amont du barrage (côté Est) :

On remarque deux familles d'eau dominantes dans les eaux souterraines à cet endroit (Fig.V.4) : les eaux chlorurées ou sulfatées et les eaux bicarbonatées, ainsi ces deux familles font ressortir deux sous familles : les eaux chlorurées, sulfatées ou bicarbonatées calciques et magnésiennes.

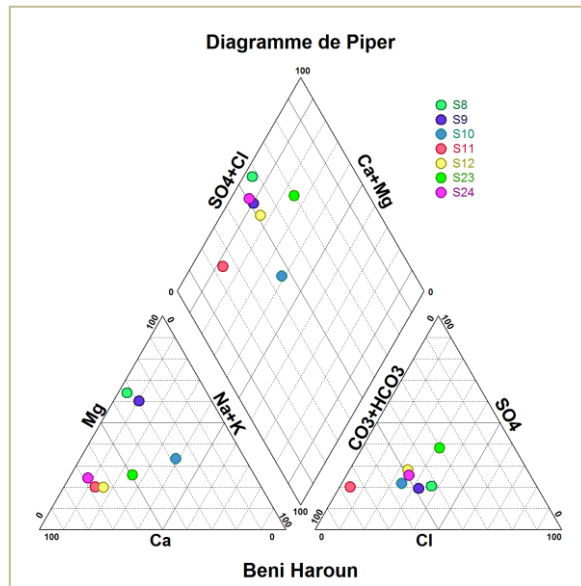


Figure V.4 : Diagramme de Piper en amont du barrage (côté Est)

IV.1.3 En amont du barrage (côté Sud) :

Le diagramme (Fig.V.5) donne une seule famille d'eau bien marquée : famille des eaux chlorurées ou sulfatée calciques et magnésiennes.

La source S18, seule donne une eau bicarbonatée calcique et magnésienne.

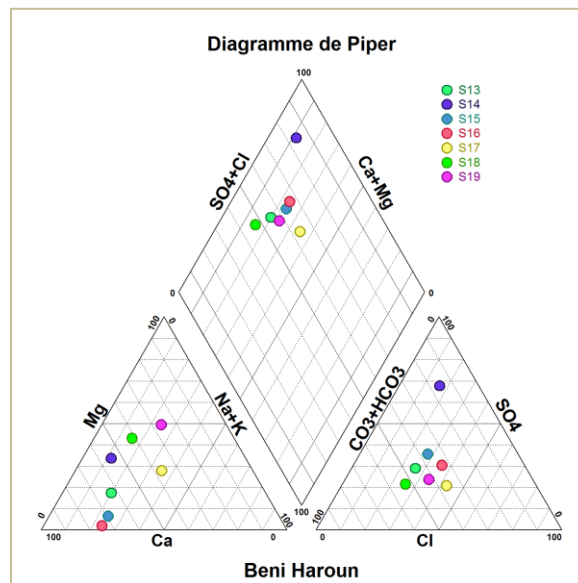


Figure V.5 : Diagramme de Piper en amont du barrage (côté Sud)

IV.1.4 Plaine d'Oued Endja :

Selon le diagramme (Fig.V.6), La plaine d'oued Endja est caractérisée par une seule famille d'eau : Chlorurée ou sulfatée calcique et magnésienne.

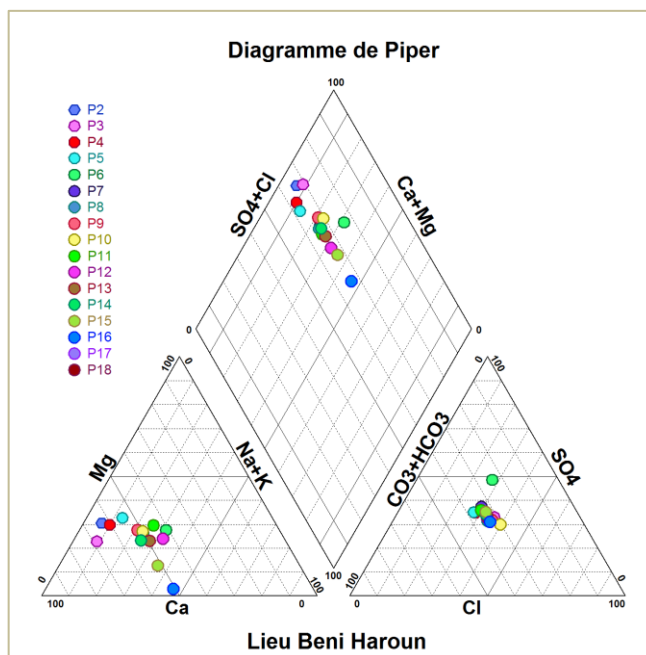


Figure V.6 : Diagramme de Piper de la plaine d'oued Endja

IV.1.5 Eau du barrage :

L'eau du barrage est classée chlorurée ou sulfatée calcique et magnésienne (Fig.V.7)

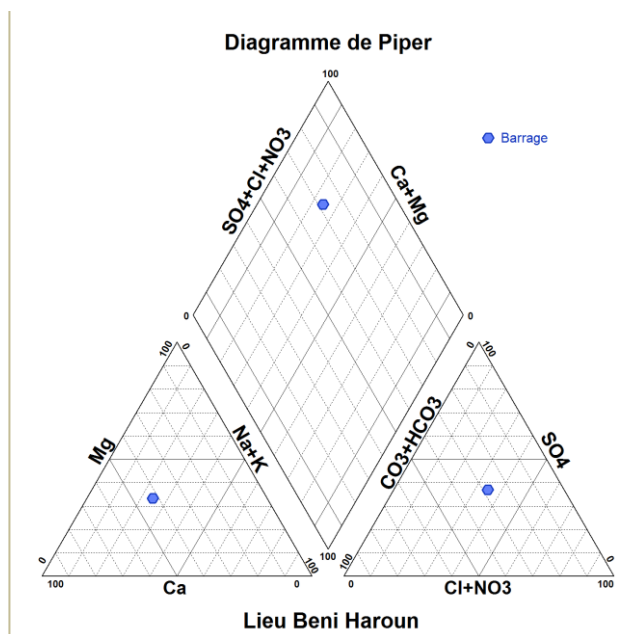


Figure V.7 : Diagramme de Piper d'eau du barrage

IV.2 Diagramme de Schöeller-Berkaloff :

Le diagramme de Schöeller-Berkaloff permet de déterminer le CO₂ libre et le pH d'équilibre (Tableau en annexe) qui donne une idée sur l'agressivité ou l'incrustante des eaux selon l'échelle suivant :

- $\text{pH eq} < \text{pH mesuré}$ \Longrightarrow l'eau est incrustante ;
- $\text{pH eq} > \text{pH mesuré}$ \Longrightarrow l'eau est agressive ;
- $\text{pH eq} = \text{pH mesuré}$ \Longrightarrow l'eau est neutre ;

Le résultat de diagramme donne une agressivité de la majorité des eaux de la plaine, par contre les eaux de source sont totalement incrustante sauf pour la source S11.

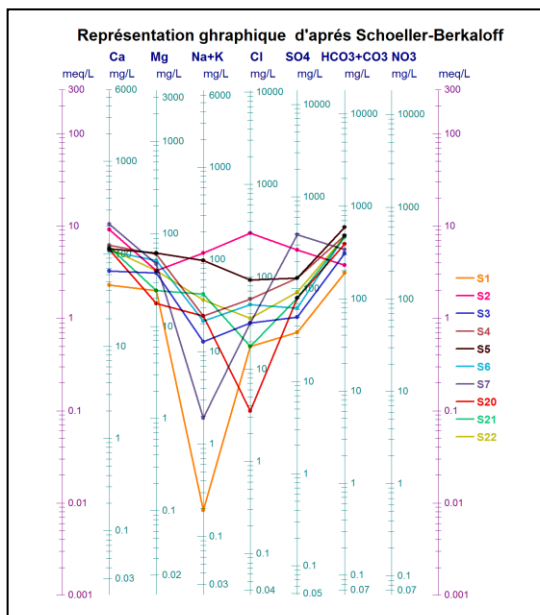


Figure V.8 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff en aval du barrage

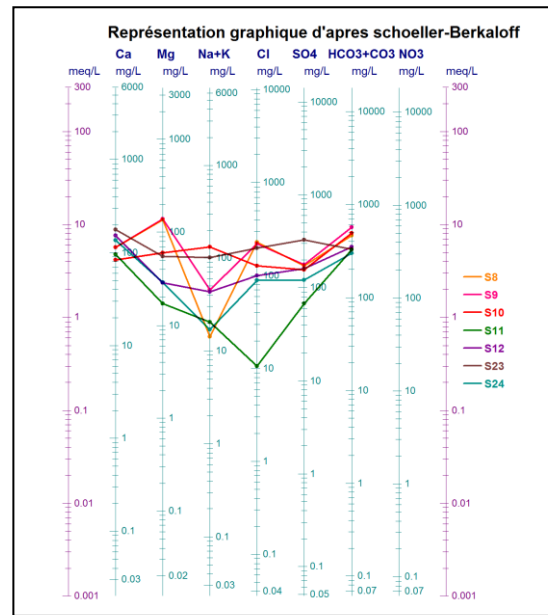


Figure V.9 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff en amont du barrage (côté Est)

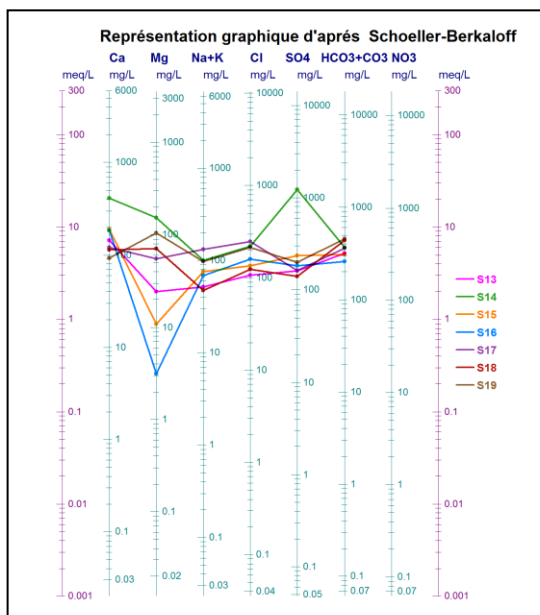


Figure V.10 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff en amont du barrage (côté Sud)

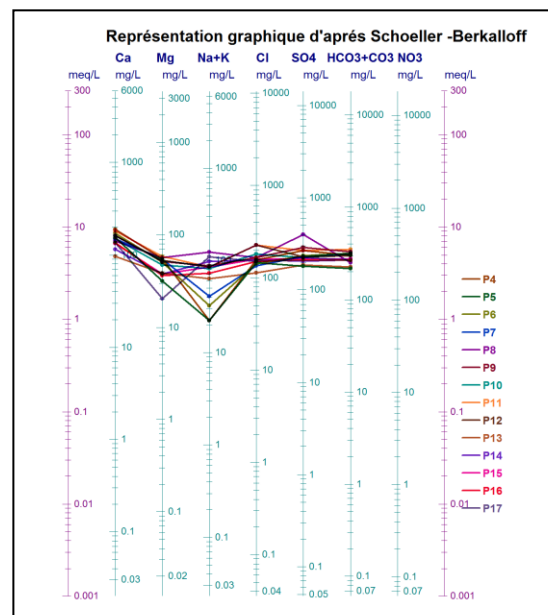


Figure V.11 : Diagramme de Schoeller-Berkaloff de la plaine d'oued Endja

IV.3 Diagramme de Stabler :

Les formules ioniques des différents éléments chimiques sont la base de cette classification.

On utilise les quantités en réaction en %, (tabl.V.3 etV. 4).

Tableau V.3 : Classification de stabler pour les eaux de source.

Formules	Hydrofaciès	Echantillons d'eau	Fréquence (%)
$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$	Eaux bicarbonatées Calciques	S1, S3, S4, S5, S11, S20, S21, S22, S24	37.5%
$r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$	Eaux bicarbonatées Calciques	S6, S12	8.33%
$r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Mg}^{2+} > r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+$	Eaux bicarbonatées Magnésiennes	S8, S9, S18, S19	16.66%
$r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Ca}^{2+}$	Eaux bicarbonatées sodi- potassiques	S10	4.16%
$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Eaux bicarbonatées Calciques	S13, S15	8.33%
$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$	Eaux sulfatées calciques	S14, eau du barrage	4.16%
$r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Eaux chlorurées calciques	S16, 17, S2	12.5%
$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Eaux sulfatées calciques	S23, S7	8.33%

Tableau V.4 : Classification de stabler pour les eaux de la plaine.

Formules caractéristique en r%	Faciès chimiques	N° du puits	Fréquence (%)
$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$	Sulfaté calcique	P2, P4, P9 , P13,	23.53%
$r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$	Chloruré calcique	P3, P5	11.76%
$r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$	Bicarbonaté calcique	P6, P7, P11	17.64%
$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Sulfaté calcique	P8	5.88%
$r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Chloruré calcique	P10, P15	11.76%
$r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$	Chloruré calcique	P12	5.88%

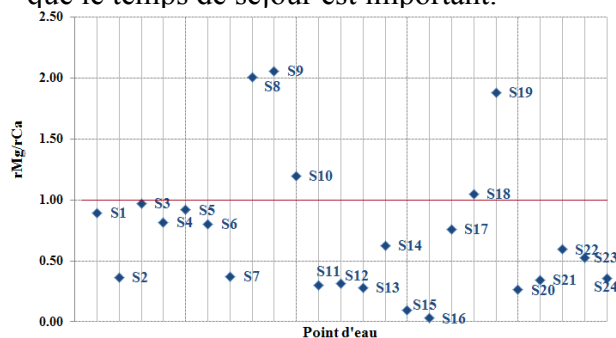
$r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Bicarbonaté calcique	P14	5.88%
$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{HCO}_3^- > r\text{Cl}^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Sulfaté calcique	P16, P17	11.76%
$r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^- > r\text{SO}_4^{2-}$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Na}^+ > r\text{Mg}^{2+}$	Chloruré calcique	P18	5.88%
$r\text{SO}_4^{2-} > r\text{Cl}^- > r\text{HCO}_3^-$ et $r\text{Ca}^{2+} > r\text{Mg}^{2+} > r\text{Na}^+$	Sulfaté calcique	Eau du barrage	

V. Rapports caractéristiques :

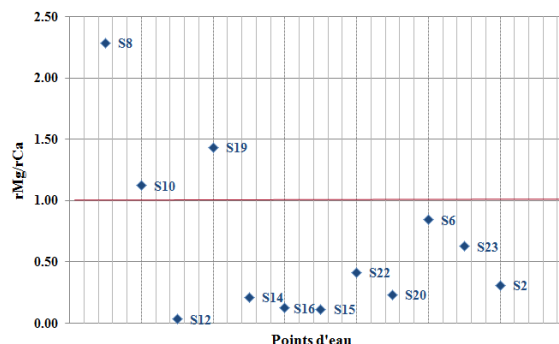
Nous avons utilisé les rapports des quantités en réaction de certains éléments, pour comprendre le fonctionnement des éléments entre eux.

V.1 Le rapport $r\text{Mg}^{2+}/r\text{Ca}^{2+}$:

Le résultat du rapport donne des valeurs inférieurs à 1 pour la plupart des points d'eau (Fig.V.12), ce qui signifie une prédominance des ions calcium sur les ions magnésium, sauf les sources S8, S9, S10, S18, S19 présentant une prédominance de magnésium, c'est-à-dire que le temps de séjour est important.



a. Hautes eaux (Mai 2013)

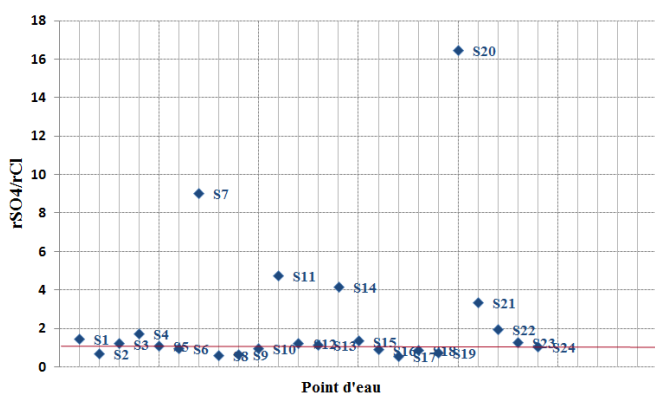


b. Basses eaux (Oct. 2013)

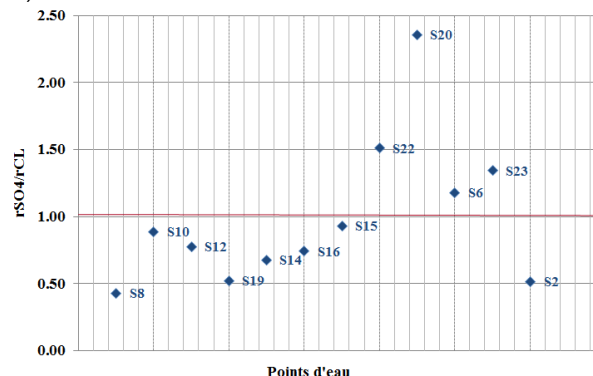
Figure V.12 : Rapport $r\text{Mg}/r\text{Ca}$

V.2 Le rapport $r\text{SO}_4^{2-}/r\text{Cl}^-$:

Ce rapport caractéristique (Fig.V.13) présente un rapprochement entre les ions chlorurés et sulfatés, la présence des terrains triasiques (gypse) et salifères confirme ce résultat.



a. Hautes eaux (Mai 2013)

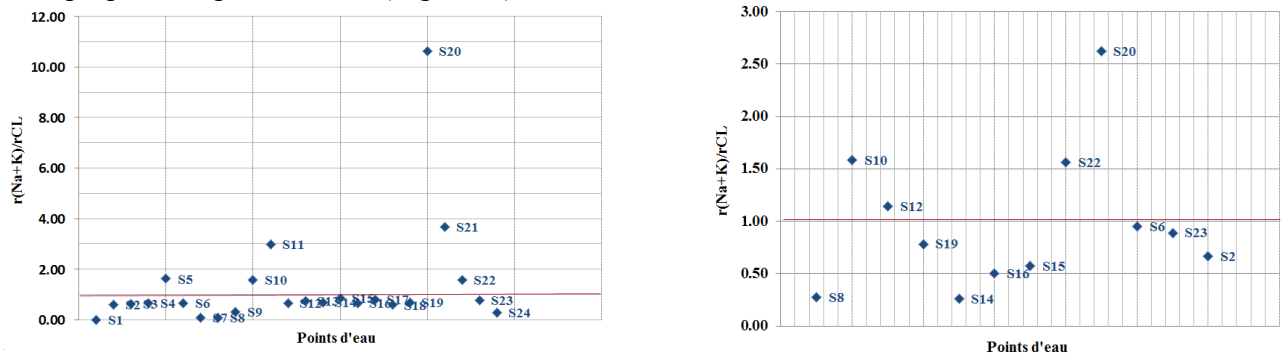


b. Basses eaux (Oct. 2013)

Figure V.13 : Rapport $r\text{SO}_4/r\text{Cl}$

V.3 Le rapport ($r(\text{Na}^+ + \text{K}^+) / r\text{Cl}$) :

La prédominance des chlorures est confirmée par le rapport caractéristique inférieur à 1, pour la plupart des points d'eau (Fig.V.14)



a. Hautes eaux (Mai 2013)

b. Basses eaux (Oct. 2013)

Figure V.14 : Rapport $r(\text{Na} + \text{K}) / r\text{Cl}$

VI. Évolution chimique de l'eau souterraine :

L'écoulement de l'eau souterraine entraîne des modifications dans la composition chimique de l'eau à partir des zones de recharge aux zones d'émergence.

C'est-à-dire les espèces ioniques changent avec l'écoulement et l'eau évolue avec la distance, cette évolution chimique est la conséquence des processus géochimiques et les réactions se produisant dans le système aquifère.

Donc, la composition finale dépend de la lithologie du milieu, le temps de résidence de l'eau souterraine, la température, la pression et la vitesse d'écoulement...etc.

Selon le type de faciès, on peut classer les eaux suivant leur stade d'évolution comme suit :

En premier stade : le faciès bicarbonaté qui caractérise la majorité des points d'eau surtout en première période, avec deux sous familles bicarbonaté calcique et bicarbonaté magnésienne.

En deuxième stade : les eaux sulfatées avec une seule famille sulfatée calcique au niveau des sources 7, 14 et 23. Ces eaux sont moyennement évoluées.

En troisième stade : l'existence du faciès chloruré calcique pour les sources S2, S16 et S17, ce faciès est un signe de pollution ou la présence des terrains salifères.

VII. Chimisme de la source de Hammam Beni Haroun avant et après la réalisation du barrage :

Pour les données de l'année 1979 sont tirées de la thèse de M^{ème} Dib (H.Dib.1985), les données de l'année 2003/2004 sont des analyses faites par l'ANBT, et les données de l'année 2013 sont des analyses faites au laboratoire de l'université de Constantine.

Les graphes (Fig.V.15) donnent les variations des paramètres physiques et les concentrations des ions majeurs existant dans l'eau de Hammam Beni Haroun avant et après la réalisation du barrage.

A partir de ces graphes, nous constatons que la température et la conductivité ne changent pas avant et après la réalisation du barrage, par contre le potentiel d'hydrogène (pH) diminue après la réalisation du barrage.

Pour les paramètres chimiques, on observe la diminution des concentrations des éléments, on remarque la même évolution que le pH. Par contre, la concentration du calcium augmente, ce qui explique le changement du faciès de l'eau, de chloruré sodique vers le faciès chloruré calcique.

Ces remarques traduisent l'évolution du système karstique à partir de l'élargissement des fissures qui jouent le rôle de conduits permettant la circulation rapide de l'eau du barrage infiltrée, alors le temps de séjour est petit ce qui confirme les valeurs faibles de Mg, et que l'eau traverse les terrains calcaires ce qui donne les concentrations élevées du calcium.

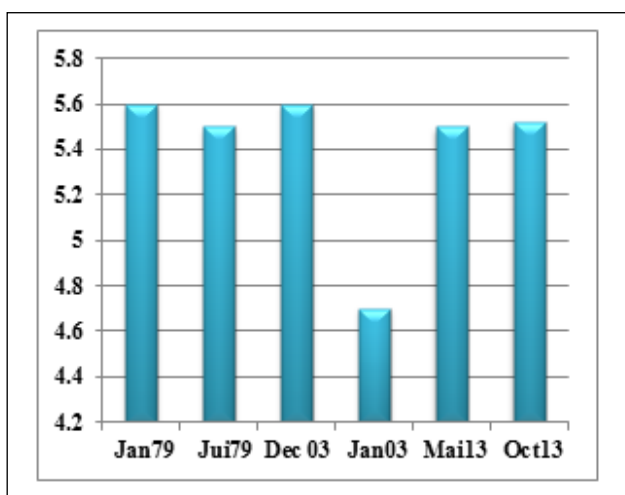


Figure V.15 : Variation de la Conductivité (ms/cm)

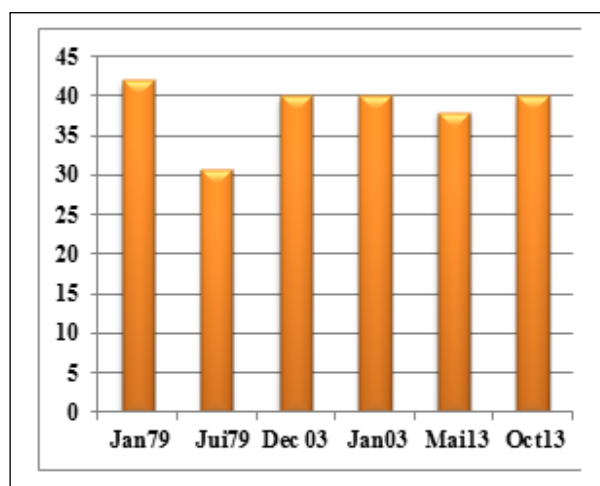


Figure V.16 : Variation de la Température (°C)

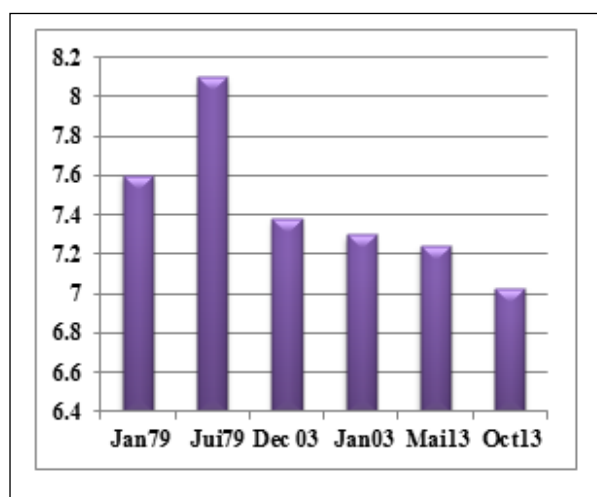


Figure V.17 : Variation du pH

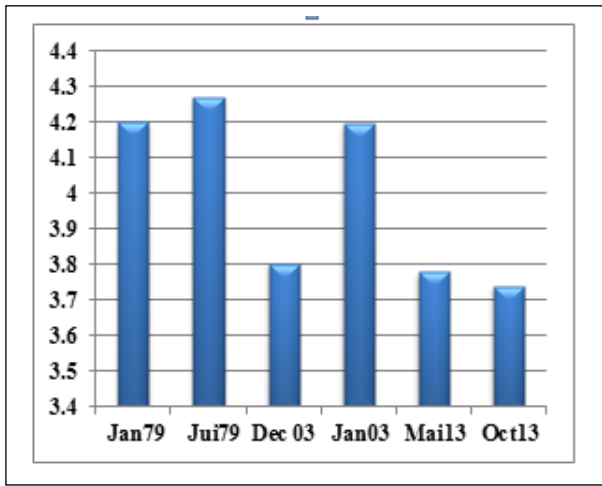


Figure V.18 : Variation du HCO₃⁻ (mé /l)

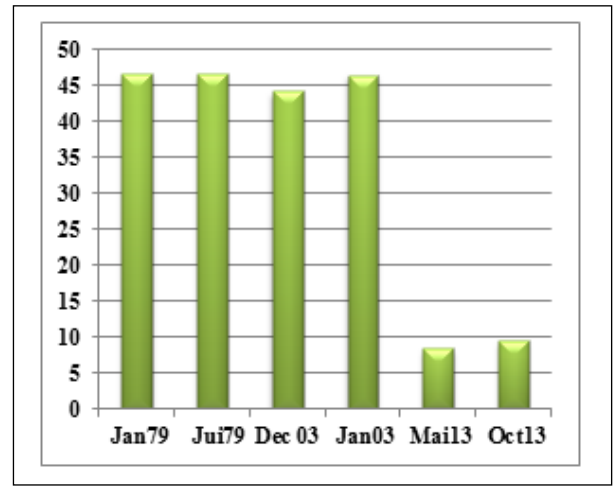


Figure V.19 : Variation du Cl⁻ (mé /l)

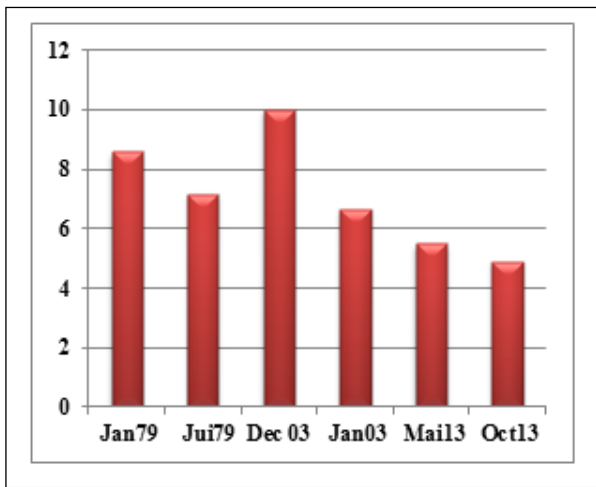


Figure V.20 : Variation du SO₄⁻ (mé /l)

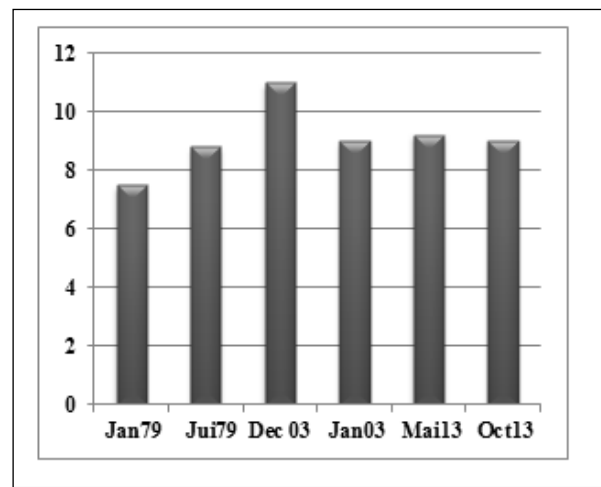


Figure V.21 : Variation du Ca⁺⁺ (mé /l)

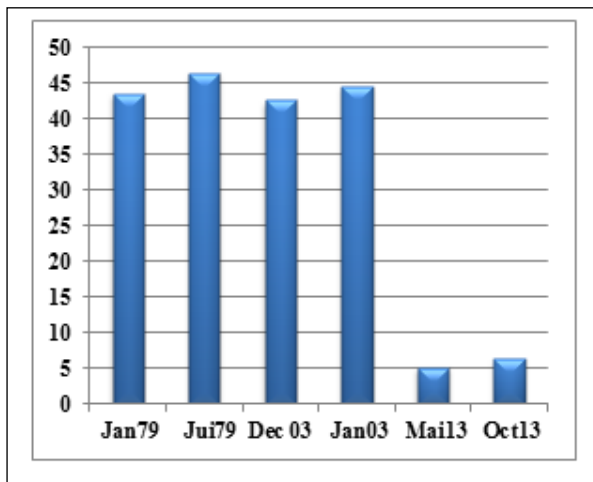


Figure V.22 : Variation du Na⁺ (mé /l)

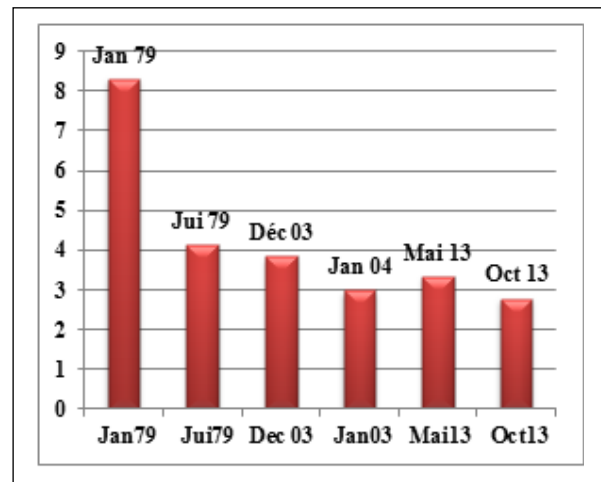


Figure V.23 : Variation du Mg⁺⁺ (mé /l)

VIII. Chimisme de l'eau de la plaine d'oued Endja avant et après la réalisation du Barrage (1997 et 2013) :

L'évolution temporelle de la moyenne des concentrations des éléments a montré :

- Un abaissement des concentrations des éléments Na et SO₄.
- Une augmentation bien marquée des concentrations des éléments Ca, HCO₃ et la conductivité.
- Une légère augmentation pour les concentrations des éléments Mg et Cl (Tableau N°.V.5).

Ces changements de concentrations enregistrés durant le temps, indiquent un changement du faciès de l'eau (de sulfaté sodique à bicarbonaté calcique) c'est-à-dire l'eau traverse les formations calcaires beaucoup plus que les formations gypseuses et salifères.

Tableau N°.V.5: Variation des moyennes des concentrations des éléments chimiques.

Années	Moyenne des concentrations						
	Ca (mg/l)	Mg (mg/l)	Na (mg/l)	Cl (mg/l)	SO ₄ (mg/l)	HCO ₃ (mg/l)	Cond (μs/cm)
1997	136.96	44.45	604.09	163.98	1323.71	197.97	1386.19
2013	154.23	46.55	73.83	164.69	245.47	291.15	1533.75

Conclusion :

L'aquifère karstique est caractérisé par un faciès dominant bicarbonaté calcique, alors que la nappe alluviale et l'eau de barrage sont sulfatées calciques.

L'influence du chimisme des eaux de cette région est dû au :

- Phénomène d'infiltration à partir des failles et fractures élargis dans l'aquifère karstique.
- L'envahissement de la nappe alluviale par les eaux du barrage.

Ce mélange d'eau n'est pas facile de démontrer par une étude hydro chimique classique. Une recherche plus profonde menée par l'étude des isotopes et le suivi au niveau des exutoires permet d'améliorer les connaissances sur l'origine de l'eau et confirmer la relation nappe-barrage.

Conclusion générale :

La zone d'étude fait partie du bassin versant Kébir- Rhumèl qui appartient à la zone septentrionale du bassin néogène du Constantine-Mila.

Elle est caractérisée par la présence du barrage de Beni Haroun, le plus grand barrage d'Algérie. Le lac du barrage se développe en deux branches, l'une alimentée par l'oued Endja et l'autre par oued Rhumel, ces deux oueds se rejoignent pour donner l'oued El Kébir,

La région a un climat du type continental caractérisé par l'élévation d'humidité surtout en hiver avec une précipitation moyenne annuelle de 654.80mm et une température de l'ordre de 16.43°C.

Sur le plan géologique, le barrage est fondé sur une assise calcaire en forme de synclinal, enchâssée entre deux formations marneuses (Eocène en aval, Paléocène en amont). Ce synclinal, évasé en auge sur la rive droite, se resserre en direction de la rive gauche où les couches deviennent verticales, en même temps que son plan axial subit une incurvation vers le Sud.

La tectonique a affecté cette structure par un système de failles, passant au Sud du barrage (dans la retenue), plongeant vers le NW, ainsi que par un système de fractures de traction d'orientations plus ou moins NS.

Au niveau de la plaine d'oued Enndja, la géologie, est caractérisée essentiellement par la présence des formations Quaternaires constituent l'aquifère, et les formations Miocène constituent le substratum de cette aquifère.

Les eaux souterraines sont contenues dans deux systèmes : un aquifère karstique et une nappe alluviale. La nappe du karst bénéficie d'une double alimentation profonde par les eaux chaudes et des eaux froides de sub-surface, par infiltration en aval du barrage. Les observations piézométriques en rive gauche du barrage montrent que la perméabilité de ces calcaires est anisotrope, elle est plus élevée parallèlement que transversalement aux couches, impliquant des circulations parallèle à la stratification.

La sous pression du barrage est plus développée en rive gauche qu'en rive droite.

La nappe alluviale d'oued Endja est une nappe en relation avec l'oued durant les deux périodes hautes et basses eaux.

Conclusion générale

Actuellement, la nappe est influencée par l'invasion du barrage Beni Haroun qui provoque une surpression et élévation du niveau d'eau souterraine.

L'aquifère karstique est caractérisé par un faciès dominant bicarbonaté calcique, alors que la nappe alluviale et l'eau de barrage sont sulfatées calciques.

Résumé :

Le barrage de Beni Haroun est implanté dans une zone à fortes potentialités en eau, superficielle (oued Rhumel, oued Endja...), comme souterraines (aquifère karstique, nappe alluvial d'oued Endja...). L'objectif de notre étude consiste en la connaissance des hydrosystèmes de la région et l'évaluation de l'impact de la mise en eau du barrage sur les ressources en eau souterraines. Le résultat du suivi piézométrique au niveau des piézomètres installés au site du barrage donne un aperçu sur l'infiltration des eaux du barrage vers le karst représentant l'assise de la digue. Il en ressort que la circulation de l'eau est concentrée en rive gauche suivant deux axes de drainage : le contact entre les calcaires et les marnes paléocènes au NW et le réseau de discontinuité de brèche et fracture. Les dernières années humides ont permis le remplissage du barrage et par là même, la remontée du niveau piézométrique dans les aquifères situés à l'aplomb du barrage ainsi que celui de la nappe de l'inféoflux de l'Oued Endja. L'étude hydrochimique montre un faciès influencé par les formations carbonatées (faciès bicarbonaté calcique) et les formations triasiques (faciès sulfaté). L'évolution de ce chimisme traduit l'effet des eaux du barrage sur les eaux souterraines environnantes après remplissage et débordement du plan d'eau.

Mots clé : aquifère karstique, nappe alluvial, hydro système, piézomètres, inféoflux.

ملخص:

يتواجد سد بني هارون في منطقة غنية بالموارد المائية السطحية (واد الرمال، واد النجا.....) و الجوفية (الخزان الكارستي، المائدة الجوفية لوادي النجا.....). الهدف من دراستنا هو التعريف بالأنظمة الهيدرولوجية للمنطقة و كذا تبيين أثر مياه السد على المياه الجوفية منذ بداية عمله. الرصد المتتالي لمستوى المياه الجوفية يظهر لنا وجود تسرب لمياه السد نحو الكارست المتواجد على مستوى الدعامة خاصة الضفة اليسرى للسد أين يتركز تدفق المياه وفق محورين: منطقة الاتصال بين الحجر الكلسي و المارل الباليوساني في الجهة الشمالية الغربية وكذا شبكة التشققات والانكسارات.

السنوات الرطبة الأخيرة سمحت بامتلاء السد وبالمقابل ارتفاع منسوب المياه الجوفية على مستوى الخزانات الجوفية المجاورة للسد وكذلك المائدة الجوفية لوادي النجا.

الدراسة الهيدروكيميائية تبين سيادة السحنة البيكاربونية الكلسية المتأثرة بالبنيات الكربونية وكذا السحنة الكبريتية الناتجة عن البنيات الترياسية . تطور النوعية الكيميائية للمياه يعكس تأثير مياه السد على المياه الجوفية المحيطة به بعد امتلائه وفيضان مياهه.

الكلمات المفتاحية: الخزان الكارستي، المائدة الجوفية، الأنظمة الهيدرولوجية، السحنة

Abstract:

The Beni Haroun dam is situated into an area characterised by a high potentialities of surface water (Oued Rhumel, Oued Endja...), and ground water (karstic aquifer, alluvial aquifer of Oued Endja...). The study target consists of the region hydro systems knowledge and the evaluation of the dam water impact on the ground water resources. The result of the piezometric level monitoring of the dam piezometers reveal the infiltration of dam water towards the karst representing the seat of the dike. The water flow is concentrated in left bank following two drainage axes: the contact between the limestone and the Paleocene marl in the NW part and the discontinuities network of breach and fracture. The last dry years have allowed the filling of the dam and also the increasing of the piezometric level of the aquifers located directly below the dam and the inferoflux of Oued Endja.

The chemical study of water has shown a facies influenced by the carbonated formations (calcic carbonated facies) and also the Triassic ones (sulfat facies), water chemistry evolution shows the effect of water dam on ground water after the filling and overflowing of water.

Key words: karstic aquifer, alluvial aquifer, hydrosystems, piezometers, inferoflux.

Bibliographie:

ANBT.1999, Rapport de Synthèse, « Transfert de Beni Haroun ».Tractebel, Ingénierie, vol.1, Alger.

ANBT.2007, Rapport final de la campagne géophysique, Barrage de Beni Haroun (wilaya de Mila, Algérie).

Bailly-Comte.V., (2008): Interactions hydrodynamiques surface/souterrain en milieu karstique, Thèse de Docteur. Université Montpellier II.France.288P

Bouedja .F., (2010) :Tectonique actuelle et récente et risque sismique de la région de Constantine. Thèse de Magister, université de Constantine 1,154p

Cécile.P., (2011) : Etude hydrochimique du système aquifère de la basse vallée du Var.Apport des éléments traces et des isotopes (Sr, Pb, d18O, 226, 228Ra), Thèse de Docteur en Sciences. Université de Nice-Sophia Antipolis. 240 P.

Chabour.N, (2006) : Hydrogéologie des domaines de transition entre l'Atlas saharien et la plateforme saharienne à l'Est de l'Algérie. Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine 1,177p

Coiffait Ph.-E. (1992): Un bassin post-nappes dans son cadre structural : l'exemple du bassin de Constantine (Algérie Nord Orientale). Thèse ès Sciences, Université H. Poincaré, Nancy I, France, 502 p.

Djebbar, M., (2005) : Caractérisation Du système karstique hydrothermal Constantine-Hamma Bouziane-Salah Bey dans le constantinois central (algérie nord orientale), Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine 1, 235 P.

Dib. H., (1985) : Le thermalisme de l'Est Algérien, Thèse de Doctorat d'Etat.

Hamel. A., (2009):Hydrogéologie des systemes aquiferes en pays montagneux a climat semi - aride.Cas de la vallee d'oued el abiod (Aures). Thèse de Magister.Université de Constantine 1

Harza Engineering Company, 1985, Etude d'Avant-Projet Détaillé d'un barrage sur l'oued Kébir ou l'un de ses affluents, Alger, A.N.B.

Issaadi.A., (1992): Le thermalisme dans son cadre géostructural, Apports à la connaissance de la structure profonde de l'Algérie et de ses ressources géothermales.Thèse de Doctorat d'Etat ès Sciences.Université Houari Boumédiene.250 P

Mibarki.A et Benabbes.C., (2008) : Le systeme Beni-Haroun (oued kebir-rhumel, algerie) aménagements hydrauliques et contraintes morpho-geologiques.Ann,géographie,105. pp37-51

Mebarki, A., (2005): Hydrologie des bassins de l'Est algérien : ressources en eau, aménagement et environnement , Thèse de Doctorat d'Etat, Université de Constantine 1, p. 360.

Merabet, S., (2010): Evaluation de la qualite physico-chimique des eaux brutes et distribuees du barrage reservoir de Beni Haroun, Thèse de Magister.Université de Constantine 1,104 P

- Mangin,A. (1975) : Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques, constitution et fonctionnement des aquifères karstiques, Ann. Spéléol.,30, pp. 21-124
- Marmi.R., kacimi. M., Boularak.M. (2008) : Les mouvements de terrain dans la region de Mila (Algérie nord-orientale) : impact sur les infrastructures,Revista de Géomorphologie, 10, Bucarest, pp. 51-56.
- Marsaud, B (1996) : Structure et fonctionnement de la zone noyée des karsts à partir des résultats expérimentaux. Thèse, Univ.Paris XI Orsay.
- Seghir. K., (2008) : Vulnérabilité à la pollution, protection des ressources en eaux et gestion active du sous-système aquifère de Tébessa Hammamet (Est Algérien), Thèse de Doctorat. Université Badji Mokhtar-Annaba, 151 P
- Tecult International.,(2006) : Étude de la protection du bassin versant du barrage de Beni-Haroun Phase V – Avant- projet détaillé (APD) et Dossier d'appel d'offres (DAO)
- Tractebel, Ingénierie, (1997): Barrage de Beni Haroun en béton compacté au rouleau. Avant-Projet Détaillé », vol. 1, Rapport de Synthèse, Alger, Agence Nationale des Barrages.

ANNEXE

Chapitre II :

Tableau annexe N°01: Température moyenne mensuelle de la station de Beni Haroun 2004/2012

T°C	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Jui	Juil	Aout	Sept	Oct	Nov	Dec	Somme
2004	9.96	11.99	13.22	13.71	17.33	23.61	26.66	27.90	23.90	20.91	12.40	10.44	17.67
2005	6.48	6.34	10.81	13.13	19.67	24.65	27.97	26.44	23.44	19.61	12.10	9.85	16.71
2006	8.54	9.37	13.73	22.06	17.54	23.00	26.56	26.92	22.46	22.71	16.60	8.87	18.20
2007	9.77	9.61	9.58	14.56	19.06	24.65	25.75	25.49	21.79	15.29	9.59	6.38	15.96
2008	7.11	7.11	8.75	12.18	14.94	21.50	24.87	25.68	22.88	17.21	11.05	8.24	15.13
2009	8.11	7.52	9.34	11.70	17.79	22.88	28.55	26.05	22.13	16.79	10.92	10.19	16.00
2010	8.40	8.48	9.63	13.77	16.23	21.30	25.85	26.10	22.22	17.06	12.99	8.33	15.86
2011	7.45	7.82	10.03	14.66	17.55	21.13	25.94	28.23	21.88	16.50	12.70	8.95	16.07
2012	7.23	4.70	10.37	13.33	17.71	24.30	26.90	29.52	21.43	17.73	13.40	8.55	16.26
moyenne	8.12	8.10	10.61	14.35	17.54	23.00	26.56	26.92	22.46	18.20	12.42	8.87	16.43

Tableau annexe N°02: Précipitation moyenne mensuelle de la station de Beni Haroun 2004/2012

P	Sept	Oct	Nov	Déc	Jan	Fev	Mars	Avr	Mai	Juin	Juil	Aout	Somme
03/.04	30.10	50.00	38.20	190.60	83.40	32.20	50.20	81.60	60.70	44.00	0.90	0.00	661.90
04/.05	35.00	32.10	145.60	228.30	167.60	154.30	50.00	103.30	6.20	0.00	0.50	1.70	924.60
05/.06	12.20	19.20	86.90	84.20	94.80	85.30	37.30	10.60	45.90	0.40	0.00	2.80	479.60
06/.07	35.30	28.00	34.90	151.80	10.30	58.20	175.10	46.10	16.40	11.30	0.00	0.50	567.90
07/.08	33.90	66.70	72.60	134.30	15.20	16.60	120.00	50.80	47.80	6.30	5.40	4.30	573.90
08/.09	25.20	25.80	120.00	50.00	158.00	71.50	86.10	108.80	36.00	5.50	0.30	7.00	694.20
09/.10	157.20	65.10	52.50	80.70	96.10	47.50	58.50	34.60	82.00	21.50	2.50	3.00	701.20
10/.11	33.00	74.00	100.00	59.60	19.50	156.00	38.00	60.00	34.30	34.00	3.50	1.00	612.90
11/.12	25.00	89.00	57.00	99.00	52.50	197.50	40.50	93.50	6.50	10.50	2.00	4.00	677.00
moyenne	42.99	49.99	78.63	119.83	77.49	91.01	72.86	65.48	37.31	14.83	1.68	2.70	654.80

Chapitre IV :

Tableau annexe N°01 : Coordonnées des piézomètres ouverts

Nom piezometres	Profondeur	X	Y	Z
PO.I-1	40	793450,189	4051661,309	191,93
PO.I-2	40	793428,975	4051682,582	192,21
PO.II-1	42	793357,764	4051609,868	192,36
PO.II-2	65	793361,586	4051650,387	215,59
PO.II-3	60	793357,454	4051676,381	218,16
PO.III-1	40	793269,179	4051569,231	169,96
PO.III-2	52	793249,879	4051611,832	149,65
PO.III-3	43	793241,509	4051633,201	143,61
PO.IV-1	40	793202,951	4051575,745	139,45
PO.IV-2	30	793192,808	4051598,103	131,68
PO.V-1	39	793039,523	4051511,710	124,19
PO.V-2	58	792937,841	4051535,928	143,01
PO.VI-1	40	793003,256	4051480,299	140,89
PO.VI-2	40	792966,045	4051502,043	143,41
PO.VII-1bis	70	792941,303	4051424,762	176,71
PO.VII-2	40	792928,575	4051452,058	181,64
PO.VIII bis(213)	130	792884,450	4051374,580	213,00
PO.IX (226)	130	792839,110	4051359,951	226,00
PO.RG-A1	100	792847,340	4051275,600	229,65
PO.RG-A2	60	792822,810	4051210,250	229,00
PO.RG-A3bis	100	792840,820	4051099,880	223,00
PO.RG-A4bis	59	792724,810	4050936,830	204,80

Chapitre V :

Tableau annexe N°01 : résultat de diagramme de schoeller-Berkaloff de la plaine d'oued Enndja

N° du Point d'eau	PH mesuré	PH d'équilibre	Caractères d'eau	CO2 libre (mg/l)
P2	7.1	7.13	Eau agressive	32
P3	7.2	7.18	Eau incrustante	23
P4	7.2	7.18	Eau incrustante	24
P5	7.3	7.45	Eau agressive	12
P6	7.2	7.2	Eau neutre	25
P7	7.2	7.28	Eau agressive	22
P8	7.8	7.38	Eau incrustante	5
P9	7.1	7.2	Eau agressive	33
P10	7.2	7.25	Eau agressive	24
P11	6.9	7.11	Eau agressive	55
P12	7.2	7.25	Eau agressive	23
P13	7.4	7.6	Eau agressive	11
P14	7.2	7.45	Eau agressive	21
P15	7.2	7.35	Eau agressive	22
P16	7.2	7.28	Eau agressive	20
P17	7.1	7.35	Eau agressive	26
P18	7.5	7.22	Eau incrustante	12
Eau du barrage	8			

Tableau annexe N°02 : résultat de diagramme de schoeller-Berkaloff des sources du barrage

N° du Point d'eau	PH mesuré	PH d'équilibre	Caractères d'eau	CO2 libre (mg/l)
S1	7.8	7.7	Eau incrustante	7.80
S2	7.24	6.99	Eau incrustante	34
S3	7.55	7.34	Eau incrustante	22
S4	7.16	6.85	Eau incrustante	98
S5	7.36	6.78	Eau incrustante	65
S6	7.40	6.91	Eau incrustante	46
S7	7.65	/	/	/
S8	7.5	/	/	/
S9	7.5	/	/	/
S10	7.6	6.76	Eau incrustante	20
S11	7.45	7.48	Eau agressive	4.4
S12	7.1	6.88	Eau incrustante	38
S13	7.2	6.80	Eau incrustante	45
S14	7.3	7	Eau incrustante	32
S15	7.3	7.12	Eau incrustante	30
S16	7.4	6.88	Eau incrustante	70
S17	7.8	6.95	Eau incrustante	50
S18	7.5	6.44	Eau incrustante	45
S19	7.9	6.85	Eau incrustante	40
S20	7.5	6.96	Eau incrustante	25
S21	7.3	6.98	Eau incrustante	15
S22	7.3	6.92	Eau incrustante	34
S23	7.5	7.00	Eau incrustante	15
S24	7.4	6.85	Eau incrustante	26
Eau du barrage	7.89	7.02	Eau incrustante	30